



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE ANANINDEUA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

CÉSAR AUGUSTO DE OLIVEIRA GOMES

**ESTUDO DA CARACTERIZAÇÃO E INFLUÊNCIA DO RESÍDUO SIDERÚRGICO
PÓ DE BALÃO EM MASSAS CERÂMICAS PARA PRODUÇÃO DE BLOCO
ESTRUTURAL CERÂMICO.**

Ananindeua-PA

2019

CÉSAR AUGUSTO DE OLIVEIRA GOMES

**ESTUDO DA CARACTERIZAÇÃO E INFLUÊNCIA DO RESÍDUO SIDERÚRGICO
PÓ DE BALÃO EM MASSAS CERÂMICAS PARA PRODUÇÃO DE BLOCO
ESTRUTURAL CERÂMICO.**

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

Orientadora: Prof. Dr. Verônica Scarpini Candido.

Ananindeua-PA

2019

CÉSAR AUGUSTO DE OLIVEIRA GOMES

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO RESÍDUO SIDERÚRGICO PÓ DE BALÃO
EM MASSAS CERÂMICAS PARA PRODUÇÃO DE BLOCO ESTRUTURAL
CERÂMICO.**

Trabalho de conclusão de curso apresentado a Faculdade de Engenharia de Materiais,
do campus universitário de Ananindeua, da Universidade Federal do Pará, como requisito para
obtenção do Bacharelado em Engenharia de Materiais.

Data da Aprovação: 20/02/2019

Conceito: Excedente

BANCA EXAMINADORA

Verônica Scarpini Candido

Profa. Dr. Verônica Scarpini Candido.

Orientadora – UFPA

Alisson Clay Rios da Silva

Profa. Dr. Alisson Clay Rios da Silva

Examinador Interno – UFPA

Roseane de Lima Silva

Profa. Dr. Roseane de Lima Silva

Examinador Interno – UFPA

Ananindeua, PA

2019

Dedico este trabalho à minha mãe Silvia Mara e ao meu pai Antônio Carvalho, que sempre se dedicaram e incentivaram a buscar meus objetivos e sonhos. Dedico também este trabalho a minha avó Maria Amélia.

AGRADECIMENTOS

Ao meu grandioso Deus que através do seu amor e misericórdia me fez forte, me capacitou e amparou diante das lutas, dificuldades, desafios, me concedeu a oportunidade de ter uma família e amigos maravilhosos com quem eu posso contar.

Aos meus pais amados Sílvia e Antônio que sempre tiveram ao meu lado, me ajudaram financeiramente ao longo desses 5 anos de curso, a minha mãe em especial quero agradecer por tudo, agradeço mãe por saber do seu amor incondicional, apoiando sempre os meus sonhos.

A minha avó Maria Amélia por suas orações, me sinto feliz e honrado em poder ser o primeiro neto com nível superior. Aos meus tios Sergio Renato, Suzana e Suziane também dedico essa vitória.

Agradeço os meus amigos de faculdade que tiveram comigo ao longo dessa caminhada William, Paulo Victor, Ana Beatriz, Camilly e Allan.

Aos meus professores Verônica Scarpini e Alisson Rios, pelo apoio a faculdade de engenharia de materiais buscando sempre desenvolver projetos e incentivando seus alunos de iniciação científica.

A minha orientadora professora Verônica Scarpini, pela orientação e apoio no desenvolvimento intelectual deste trabalho.

A Universidade Federal do Pará pela minha formação como Engenheiro de Materiais. Sinto-me honrado em fazer parte da primeira turma de formandos.

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

D278e

De Oliveira Gomes, César Augusto. Estudo da caracterização e influência do resíduo siderúrgico pó de balão em massas cerâmicas para produção de bloco estrutural cerâmico. / César Augusto de Oliveira Gomes, . — 2019. 67 f. : il. color.

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

1. Pó de balão. 2. Bloco estrutural cerâmico. 3. Resíduos. 4. Argila Forte e Fraca . I. Título.

CDD 620.14

“O sucesso nasce do querer, da determinação e persistência em se chegar a um objetivo. Mesmo não atingindo o alvo, quem busca e vence obstáculos, no mínimo fará coisas admiráveis.”

José de Alenca

RESUMO

A indústria metalúrgica é um setor importante dentro da economia brasileira representando 1,26% do PIB nacional. Esta indústria gera uma variedade de resíduos sólidos, efluentes líquidos e emissões gasosas nas suas diversas etapas de processamento. Um dos resíduos gerados pelo setor siderúrgico é o pó de balão que é formado por óxidos de ferro nas formas FeO , Fe_2O_3 e Fe_3O_4 . O pó de balão ainda é pouco utilizado em tentativas de reaproveitá-lo como co-produto, embora possa ser aglomerado por sinterização e adicionado às matérias-primas no alto-forno. Desta forma, a adição de resíduos em cerâmica vermelha, atualmente, apresenta-se como uma das principais soluções tecnológicas para a disposição final de resíduos sólidos industriais. A incorporação do pó de balão em massas de cerâmicas requer uma análise de composição química e mineralógica para obter formulações específicas, que colaborem na busca da melhoria das propriedades dos materiais fabricados. Tendo em vista as suas diversas propriedades, este trabalho tem por objetivo avaliar o efeito da incorporação de 5, 10 e 15% em peso do resíduo pó de balão, em massa argilosa composta por argila forte e argila fraca, para a produção de bloco estrutural cerâmico.

Palavras-chave: Pó de balão, bloco estrutural cerâmico, resíduos.

ABSTRACT

The metallurgical industry is an important sector within the Brazilian economy representing 1.26% of the national PIB. This industry generates a variety of solid wastes, liquid effluents and gaseous emissions in its various processing steps. One of the residues generated by the steel industry and the balloon powder that is formed by iron oxides in FeO, Fe₂O₃ e Fe₂O₄ forms. Balloon powder is still little used in attempts to reuse it as a co-product, although it can be pelleted by sintering and added to the raw materials in the blast furnace. In this way, the addition of waste in red ceramics is currently one of the main technological solutions for the final disposal of industrial solid waste. The incorporation of the balloon powder in red ceramic masses requires an analysis of chemical and mineralogical composition to obtain specific formulations that collaborate in the search of the improvement of the properties of the manufactured materials. The purpose of this study was to evaluate the effect of the incorporation of 5, 10 and 15% by weight of the residue of the balloon powder into a clay mass composed of strong clay and weak clay, for the production of a structural block ceramic.

Key words: Balloon powder, ceramic structural block, waste.

LISTA DE FIGURA

Figura 2.1: Fluxograma do processo de produção do aço em uma usina integrada.....	21
Figura 2.2: Representatividade dos resíduos sólidos gerados no processo de fabricação do ferro gusa em uma siderúrgica integrada.....	23
Figura 2.3: Demonstração do sistema de limpeza de gás de alto-forno.....	25
Figura 2.4: Blocos cerâmicos – definições ABNT NBR 15270-2.....	31
Figura 2.5: Bloco estrutural cerâmico.....	32
Figura 3.1: Pó de balão.....	35
Figura 3.2: Corpos de prova após compactação no molde.....	39
Figura 3.3: Corpos de prova após secagem em estufa.....	39
Figura 3.5: Alguns cps após o processo de queima.....	40
Figura 3.4: Sinterização dos corpos de prova em um forno do tipo mufla.....	40
Figura 4.1: Difatrogramas de raios-x das argilas forte.....	45
Figura 4.2: Difatrogramas de raios-x das argilas fraca.....	46
Figura 4.3: Difatrogramas de raios-x das argilas do pó de balão.....	47
Figura 4.7: Micrografias obtidas por MEV das argilas. (a) forte, fraca (b) e pó de balão (c) respectivamente.....	48
Figura 4.8: Gráfico de massa específica aparente.....	49
Figura 4.9: Gráfico de absorção de água.....	50
Figura 4.10: Gráfico de retração linear.....	51
Figura 4.11: Gráfico de resistência à flexão.....	52
Figura 4.12: Micrografia obtida por MEV com 5 % de resíduo com aumento de (a) 500, (b) 1.000 e (c) 5.000 vezes respectivamente.....	54
Figura 4.12: Micrografia obtida por MEV com 10 % de resíduo com aumento de (a) 500, (b) 1.000 e (c) 5.000 vezes respectivamente.....	55
Figura 4.12: Micrografia obtida por MEV com 15 % de resíduo com aumento de (a) 500, (b) 1.000 e (c) 5.000 vezes respectivamente.....	56

LISTA DE TABELA

Tabela 2.1: Composição do pó de balão de uma siderúrgica não-integrada a carvão vegetal.....	26
Tabela 3.1: Composição em peso dos materiais utilizados. Argila forte, argila fraca e pó de balão.....	38
Tabela 4.1: Composição química da argila Forte, argila Fraca e do pó de balão.....	44

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AA	ABSORÇÃO DE ÁGUA
AFO	ARGILA FORTE
AFR	ARGILA FRACA
ABNT	ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS
ANICER	ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA CERÂMICA
CPs	CORPOS DE PROVA
DTF	DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À FLEXÃO
FRX	FLUORESCENCIA DE RAIOS-X
MEA	MASSA ESPECÍFICA APARENTE
NBR	NORMA BRASILEIRA
RLQ	RETRAÇÃO LINEAR DE QUEIMA
PB	PÓ DE BALÃO
PF	PERDA AO FOGO

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Considerações iniciais	15
1.2 Objetivos	16
1.2.1 Objetivo geral	16
1.2.2 Objetivos específicos	16
1.3 JUSTIFICATIVA	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1 Desenvolvimento sustentável e reciclagem de resíduos.....	18
2.2 Definição e classificação de resíduos sólidos segundo ABNT NBR 10004 2004 ^a	19
2.3 A indústria siderúrgica.....	20
2.3.1 Desempenho econômico e produtivo da Indústria Siderúrgica	20
2.3.2 Processo Siderúrgico	21
2.3.3 Controle ambiental na indústria siderúrgica.....	23
2.3.4 Geração do resíduo pó de balão.....	24
2.4 A indústria cerâmica.....	27
2.5 Argilas.....	27
2.6 O Processo produtivo da cerâmica vermelha	29
2.7 Bloco estrutural cerâmico	31
2.8 Reciclagens de resíduos em cerâmica vermelha.....	33
2.9 Utilização de pó de balão em cerâmica vermelha	35
3 MATERIAIS E MÉTODOS	37
3.1 Materiais utilizados	37
3.2 Metodologia	37
3.2.1 Beneficiamento dos materiais.....	38
3.2.2 Caracterização dos materiais	38
3.2.2.1 Análise química	38

3.2.2.2 Difração de raios-x (DRX)	39
3.2.2.3 Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	39
3.2.3 Preparação dos corpos de prova	39
3.2.4 Determinação das propriedades dos materiais cerâmicos.....	42
3.2.4.1 Massa específica aparente (MEA).....	43
3.2.4.2 Absorção de água (AA)	43
3.2.4.3 Retração linear de queima (RLQ).....	44
3.2.4.4 Determinação da resistência à flexão (DRF).....	44
3.2.5 Avaliação microestrutural	45
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	46
4.1. Caracterização química	46
4.1.1 Caracterizações das matérias-primas por fluorescência de raios-x.	46
4.1.2 Caracterização mineralógica	47
4.1.2.1 - Difratomia de raios-x das argilas e do resíduo.....	47
4.1.3 - Caracterização morfológica.....	49
4.2 Propriedades físicas e mecânicas.....	51
4.2.1 Massa Específica Aparente (MEA)	51
4.2.2 Absorção de Água (AA).....	52
4.2.3 Retração linear de queima (RLQ)	52
4.2.4 Determinação de Resistencia à flexão (DRF).....	54
4.3 Microscopia dos corpos de prova sinterizados	55
5 CONCLUSÃO.....	59
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	60
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A indústria metalúrgica é um setor importante dentro da economia brasileira, no ano de 2017 sua produção gerou 31,3 milhões de toneladas de aço, representando uma receita da ordem de US\$ 32 bilhões, correspondendo a 1,26% do PIB nacional. A indústria do aço desempenha cinco principais atividades: fundição, produção de metais não ferrosos, produção de ferro-ligas e ferro-gusa, fabricação de tubos e siderurgia. O setor siderúrgico é um ramo da metalurgia que está ligada à fabricação e tratamento de aços e ferros fundidos, é um importante fornecedor de insumos para vários outros setores da indústria de transformação, principalmente para a construção civil. (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2017).

A indústria siderúrgica gera uma grande quantidade de resíduos sólidos, como efluentes líquidos e emissões gasosas que poluem o meio ambiente em várias etapas de seu processo produtivo industrial. Para cada tonelada de aço produzido se gera em torno de 607 kg de resíduos de diferentes tipos como escórias, pós, lamas e carepas. Dependendo do tipo de resíduo, ele pode retornar ao processo industrial, como fonte de energia ou como matéria-prima para a produção de aço, ou comercializado como co-produto para outras atividades industriais (VIEIRA *et al.*, 2007).

Um dos resíduos gerados pelo setor siderúrgico é o pó de balão, oriundo do sistema de limpeza de gases a seco, é um material particulado captado no alto-forno pelo sistema de despoeiramento chamado balão gravitacional. O pó de balão é formado por óxidos de ferro nas formas FeO, Fe₂O₃ e Fe₂O₄, identificadas como wustita, hematita e magnetita, respectivamente (MALARD, 2009).

O pó de balão é pouco utilizado dentro do setor siderúrgico como co-produto, embora possa ser aglomerado por sinterização e adicionado às matérias-primas no alto-forno. Para cada tonelada de ferro gusa produzido se gera 28 a 75 kg de pó de balão, é despejado a céu aberto em bags nos pátios das indústrias, correspondendo a 13% dos resíduos sólidos gerados nas indústrias siderúrgicas (JACOMINO *et al.*, 2002).

A utilização de resíduos em cerâmica vermelha vem se mostrando como uma solução ambientalmente correta para o reuso de resíduos sólidos industriais. As características naturais das argilas associada a técnicas de processamento cerâmico relativamente simples, é o baixo

desempenho tecnológico exigido para a fabricação dos produtos, possibilita a presença de níveis de impurezas relativamente elevados. Podendo incorporar outros tipos de materiais das diversas fontes de geração de resíduos (VIEIRA *et al.*, 2007).

A incorporação do pó de balão em massas de cerâmica vermelha requer uma análise de composição química e mineralógica para obter formulações específicas, que colaborem na busca da melhoria das propriedades dos materiais fabricados. A caracterização físico-química das matérias-primas é fundamental para a obtenção de peças com propriedades finais desejadas, que juntamente ao conhecimento e controle de todas as etapas do processo industrial, podem eliminar ou reduzir os defeitos de fabricação, tais como: trincas, retração, absorção de água e resistência mecânica (OLIVEIRA, HOLANDA, 2003).

Este trabalho tem por objetivo de avaliar o efeito da incorporação de 5, 10 e 15% em peso do resíduo pó de balão proveniente de uma siderúrgica localizada no sudeste do estado do Pará, em massa argilosa composta por argila forte e argila fraca, cedida pela Cerâmica Menegalli, empresa situada no município de São Miguel do Guamá-PA, para a produção de bloco estrutural cerâmico tendo como base a norma ABNT NBR 15270-2.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Avaliar a influência da adição do pó de balão nas propriedades das peças fabricadas para produção de bloco estrutural cerâmico.

1.2.2 Objetivos específicos

- Realizar a caracterização física e química das matérias-primas;
- Produzir corpos de prova com incorporação de 5, 10 e 15% em peso do resíduo pó de balão em massa argilosa;
- Estudar as propriedades de massa específica aparente, absorção de água, retração linear de queima e desempenho de resistência à flexão.
- Avaliar a influência da temperatura nas propriedades tecnológicas das cerâmicas sinterizadas a 850, 950 e 1050°C.

1.3 JUSTIFICATIVA

O entendimento da influência da adição de resíduos em massas argilosas nas propriedades tecnológicas da cerâmica vermelha é de extrema importância para a compreensão do comportamento do produto final.

Nesse contexto, esse trabalho justifica-se, pois o estudo da adição de pó de balão faz-se necessário para a determinação da proporção ideal de resíduo adicionado à massa argilosa proporcionando o controle da microestrutura e, conseqüentemente, das propriedades tecnológicas favorecendo a produção de cerâmicas dentro dos requisitos exigidos por lei.

Este trabalho justifica-se ainda, pois objetiva-se a produzir cerâmica vermelha com a incorporação de um resíduo industrial que não possui destino final adequado. Dessa forma, a utilização do pó de balão contribui para a preservação ambiental, e para produção de peças cerâmicas ecologicamente corretas.

Por fim, a reutilização desse resíduo pode contribuir para melhoria dos processamentos tecnológicos nas indústrias de cerâmica vermelha e proporcionar aos ceramistas a diversidade de produção, econômica e de recursos energéticos durante a queima das peças cerâmicas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Desenvolvimento sustentável e reciclagem de resíduos

O termo desenvolvimento sustentável surgiu no relatório Brundtland 1987, redigido pela Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, criada pela ONU “Organização das Nações Unidas”. O conceito corresponde ao desenvolvimento ambiental das sociedades, aliado ao desenvolvimento econômico e social. A definição mais aceita para o termo “desenvolvimento sustentável” é o desenvolvimento capaz de suprir as necessidades da geração atual, sem comprometer a capacidade de atender as necessidades das futuras gerações (BARBIERI, 2011).

O desenvolvimento sustentável vem sendo discutida nos fóruns nacionais e internacionais. O Brasil vem se destacando no cenário internacional em assuntos voltados ao meio ambiente. No país, já foram sediadas as duas mais importantes conferências internacionais sobre sustentabilidade a Rio – 92 no ano de 1992 e vinte anos depois em 2012 a Rio + 20 que teve como objetivo de renovação do compromisso político com o desenvolvimento sustentável (QUADROS, TAVARES 2014).

O mercado globalizado e a preocupação da sociedade com o meio ambiente têm exigido das organizações, atitudes eficientes em relação às questões ambientais. As empresas, em um mercado já bastante competitivo, se deparam de uma nova realidade, onde a sustentabilidade e econômica andam juntas (CIPOLAT *et al.*, 2010). As organizações são obrigadas a inserir em seu planejamento estratégico a gestão ambiental, visando diminuir os impactos ambientais, dando ênfase à sustentabilidade (CAIRES, 2011).

O Brasil fixou em lei “Lei 12.305/2010 Art. 90” que determina a gestão integrada ao gerenciamento de resíduos sólidos, incluindo os perigosos. A lei também instituiu diversos instrumentos, para os planos de gestão ambiental, com incentivos econômicos e licenciamento ambiental para indústrias que apresentam uma destinação adequada aos resíduos gerados em seus processos (MILANEZ, 2009).

A reutilização de resíduos contribui em diversas escalas para a sociedade ajudando na diminuição da poluição do solo, ar e água, melhorando a limpeza das cidades e a qualidade de vida da população e prolongando a vida útil dos aterros sanitários. Gerando emprego e renda, receita com a comercialização dos produtos recicláveis, estimulando a concorrência e a diversidade de produtos (DIAS, 2011).

2.2 Definição e classificação de resíduos sólidos segundo ABNT NBR 10004 2004^a

A ABNT 10004 2004^a é a norma que determina as especificações das atribuições e codificações para a identificação dos resíduos conforme suas características.

Em conformidade com a norma ABNT NBR 10004 2004^a pode-se definir resíduos como: “materiais decorrentes de atividades antrópicas, gerados apartir da sobra de processos ou aqueles que não possam ser utilizados com a finalidade para as quais foram originalmente produzidos”.

De acordo com a ABNT NBR 10004^a o método de classificação de resíduos compreende: o reconhecimento do início do processo ou atividade que originou o resíduo, a identificação de seus elementos e propriedades do resíduo, comparação destes constituintes com listagem de resíduos e substâncias cujo impacto à saúde e meio ambiente é conhecido.

A descrição de um resíduo deve ser bastante cautelosa em conformidade com a matéria-prima tendo como base laudos de resíduos já classificados anteriormente, o reconhecimento do processo ou operação que lhe deu origem também deve ser levado em consideração, os resíduos que não são classificados deve-se submeter a numerosos testes como lixiviação, solubilidade e até mesmo outros tipos de análise como absorção atômica, cromatografia, espectrofotometria UV, dentre outros (VIEIRA *et al.*, 2007)

A metodologia abaixo é a utilizada está de acordo com a norma ABNT NBR 10004, 2004^a para realizar a classificação dos resíduos.

Para os efeitos desta Norma, os resíduos são classificados em:

- a) Resíduos classe I – perigosos;
- b) Resíduos classe II – não perigosos;
 - Resíduos classe II A – não inertes.
 - Resíduos classe II B – inertes.

Resíduos classe I – Perigosos: resíduos que apresentam algum tipo de periculosidade devido à presença das seguintes características: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade podem acarretar riscos à saúde, ocasionando ou colaborando com o aumento da mortalidade, ocorrência de doenças ou causar impactos adversos ao meio ambiente, quando utilizado ou disposto de maneira inapropriada.

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, concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água, não apresentando 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.

2.3 A indústria siderúrgica

A indústria siderúrgica é um ramo da indústria metalúrgica, está associada à transformação do ferro, empregados em várias etapas do processo produtivo, desde a transição do minério em ferro primário (ferro gusa), até a fabricação de variados produtos como bobinas laminadas a quente, a frio ou galvanizadas, tendo como finalidade a utilização de produtos na indústria automotiva, naval, construção civil, bens e serviços, dentre outros. (COMPANHIA SIDERÚRGICA NACIONAL, 2012).

2.3.1 Desempenho econômico e produtivo da Indústria Siderúrgica

O mercado siderúrgico detém de pouca oferta e muita demanda, ou seja, e um mercado oligopolizado no mundo inteiro, incluindo no Brasil. Nas últimas décadas houve inúmeras fusões e aquisições ocorridas no mercado siderúrgico brasileiro, principalmente após a desestatização do setor (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2017).

O Brasil detém o maior parque industrial da América da Latina com 29 usinas, controlado por 11 grupos empresariais. O Brasil exporta aço para cerca de 100 países,

ocupando 7º lugar como exportador líquido de aço no mundo. O setor siderúrgico representa 4% do PIB brasileiro e só no primeiro semestre do ano de 2017 foram exportadas cerca de 8,4 milhões de toneladas de produtos siderúrgicos (ARCELOR MITTAL BRASIL, 2017).

2.3.2 Processo Siderúrgico

Os processos produtivos nas usinas são classificados da seguinte forma: integradas, semi-integradas e não integradas. As usinas integradas operam em três fases: redução, refino e laminação. Semi-integradas, operam em duas fases refino e laminação. Não integradas operam fazendo apenas a redução ou laminação do aço (MOTHÉ, 2008).

Minério de ferro, carvão mineral ou vegetal e os fundentes (calcário e dolomita), são as principais matérias-primas utilizadas em uma indústria siderúrgica integrada (RIBEIRO, 2010).

A primeira etapa para se produzir o aço em uma usina siderúrgica é a seleção, compra e transporte de toda matéria prima e materiais que serão usados no processo de fabricação. Em seguida, dispor os minérios de ferro e os carvões minerais em pilhas no pátio de matérias-primas, onde são estocados esperando sua utilização, sendo transportados para o local de processamento (MOTHÉ, 2008).

Os finos de minério de ferro com granulometria imprópria para utilização direta no alto forno são submetidos a processos de aglomeração (sinterização ou pelletização) para a formação do sinter e das pelotas que, juntamente com o minério granulado, são carregados no alto forno (ARAÚJO, 2005).

O carvão mineral acomoda um conjunto de elementos indesejáveis à produção do aço, é aquecido em fornos especiais (coqueiras) a mais de 1400°C onde os compostos voláteis são removidos, o resíduo da queima o coque é utilizado como combustível e redutor no alto forno (RIBEIRO, 2010).

Os oxigênios contidos nos óxidos de ferro são removidos através do processo de redução, por ação dos redutores coque e carvão vegetal, este procedimento é realizado no alto forno. Nesta etapa o produto obtido é uma liga de ferro carbono, com teores variando entre 1,7 a 6,67% de carbono, o ferro-gusa, que ainda contém impurezas como fósforo, enxofre e sílica, vão para o refino (ARAÚJO, 2005).

O refino consiste na purificação da maior parte de impurezas como silício, carbono e manganês, os elementos menos nobres que o ferro, que permanecem no metal líquido, são

2.3.3 Controle ambiental na indústria siderúrgica

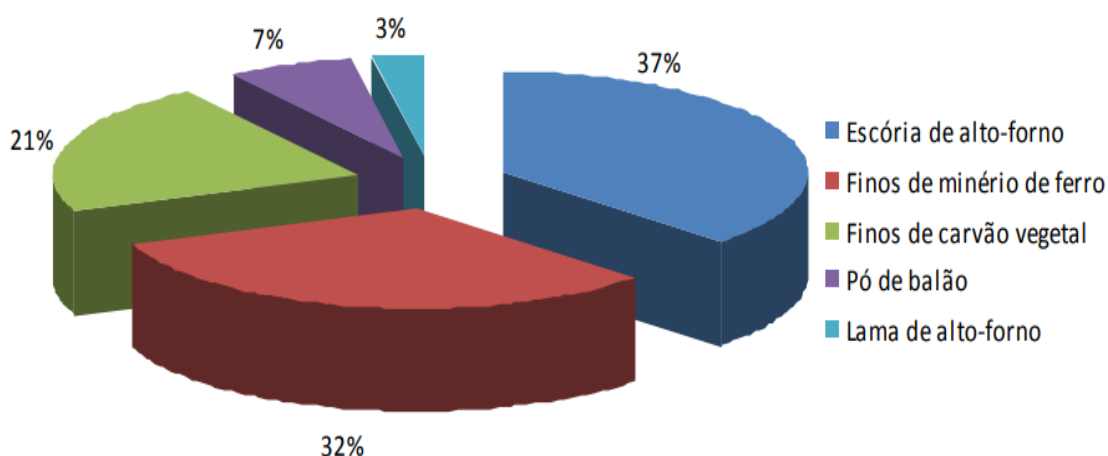
O Desenvolvimento da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), vigente em 2010, pela Lei nº 12.305, em conjunto com uma série de normas ISO – International Organization for Standardization 14.000, estabelece princípios, objetivos, instrumentos, diretrizes, metas e ações para um gerenciamento ambientalmente adequado dos resíduos sólidos (OLIVEIRA *et al.*, 2017).

O investimento em meio ambiente pelas indústrias siderúrgicas brasileiras consumiu, de 2000 a 2016, cerca de R\$1,2 bilhões (IBS, 2016). As principais prioridades têm sido a redução das emissões atmosféricas, tratamento dos efluentes e reuso da água e, por último, a reciclagem e disposição de resíduos sólidos, com destaque para as escórias e pó (CARVALHO *at al.*, 2015).

As emissões atmosféricas mais comuns provenientes do setor siderúrgico são: material particulado (MP), óxidos de nitrogênio (NO,NO₂), óxidos de enxofre (SO,SO₂), óxidos de carbono (CO,CO₂), metais pesados, compostos orgânicos voláteis, compostos acíclicos aromáticos, dioxinas e furanos, entre outros (JACOMINO *at al.*, 2002).

Uma siderurgia gera 400 a 700 kg de resíduo por tonelada de aço produzido. Existe um elevado custo para as indústrias realizarem a disposição ou eliminação do resíduo, gerando gastos com transportes para leva-los aos aterros de descartes ou consumindo espaço de parte da planta industrial (MALARD, 2009). A Figura 2.2 apresenta o gráfico da geração de resíduos durante o processo de fabricação do ferro gusa em uma siderúrgica integrada.

Figura 2.2 – Representatividade dos resíduos sólidos gerados no processo de fabricação do ferro gusa em uma siderúrgica integrada.



Fonte: (MALARD, 2009).

Com a evolução do conceito de produção mais limpa (P+L). Diversas empresas produtoras de aço aderindo a iniciativas para colaborar com a redução de resíduos como: reuso de água de processos, instalação de sistemas de tratamento de efluentes líquidos, controle de emissões atmosféricas, melhoria da eficiência energética dos processos e redução ou reutilização de resíduos sólidos (OLIVEIRA *et al.*, 2017).

Segundo o Relatório de Sustentabilidade do Instituto do Aço de 2017, no ano de 2016, a indústria siderúrgica gerou 19,2 milhões de toneladas de resíduos e co-produtos, visto que cerca de 80% foram reutilizados, seja internamente ou por terceiros. Uma produção mais limpa não é financeiramente desvantajosa para a empresa, pois gera menos desperdício, colaborando com a rentabilidade devido à utilização efetiva dos resíduos, contribuindo na economia das matérias-primas (RELATÓRIO DE SUSTENTABILIDADE AÇO BRASIL, 2017).

2.3.4 Geração do resíduo pó de balão

O resíduo siderúrgico pó de balão é gerado do sistema de limpeza de gases que é de vital importância para as operações que acontecem no alto forno garantindo a vida útil dos sistemas de vento quente de alta temperatura e instalações geradoras de vapor, permitindo que

as siderúrgicas atendam os padrões de poluição exigidos por lei. O pó de balão consiste no material particulado captado no alto-forno pelo sistema de despoeiramento denominado balão gravitacional (MALARD, 2009).

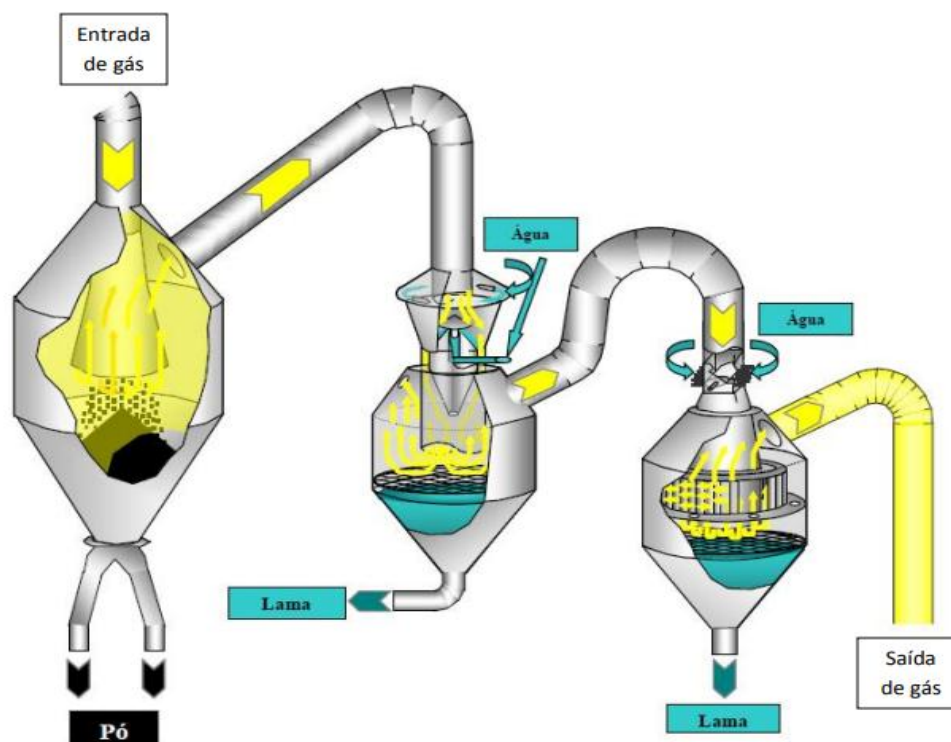
As matérias-primas minério de ferro, carvão vegetal ou coque e os fundentes (calcário e sílica, dentre outros) são carregadas no alto-forno apresentam finos agregados, que durante o processo de redução do aço se desprendem no interior do alto forno sendo arrastados pelo gás ascendente. O gás que é produzido e empregado como combustível em diversos processos da usina siderúrgica podendo ser reaproveitado, no aquecimento de fornos, painéis, regeneradores, além de outros equipamentos (SILVA, 2016).

O gás só pode ser utilizado se passar por conjunto de equipamentos denominado Sistema de Limpeza de Gás, não passando pode causar diversos problemas aos equipamentos como: entupimento de bicos, desgaste de equipamentos por abrasão, etc. O sistema de limpeza de gás tem a seguinte importância, remover as particuladas contidas nos gases de saída do alto forno (SILVA, 2016).

O sistema de limpeza de gás de alto-forno é composto por três equipamentos instalados em série: Coletor de Pó ou Balão de Pó, Primeiro Venturi e Segundo Venturi. A primeira fase começa com a limpeza que é feita através do Coletor de Pó, do tipo gravimétrico, que tem como objetivo reter as partículas mais pesadas. Nesse estágio a limpeza é a seco. O pó perde velocidade, decanta no fundo do equipamento, de onde é retirado posteriormente. Na segunda fase da limpeza é úmida, acontecendo em dois estágios, sendo utilizados para esse fim dois venturis colocados em série. O primeiro venturi é empregado para esfriar e limpar parcialmente o gás através da pulverização de água no gás, fazendo com que as partículas de pó, molhadas, decantem no fundo do venturi (SILVA, 2016).

O segundo venturi é utilizado para fazer a limpeza final do gás. O gás passa através de uma garganta móvel, que aumentar ou diminuir a velocidade, aumentando a eficiência de limpeza. Na garganta o gás também é pulverizado com água para eliminar o restante das partículas de pó, ainda existentes. Estas partículas quando molhadas decantam no fundo do equipamento e o gás segue para a distribuição. As partículas de pó decantadas nos venturis são retiradas sob a forma de lama (MACHADO, 2011).

Figura 2.3 – Demonstração do sistema de limpeza de gás de alto-forno.



Fonte: (RIBEIRO, 2011)

As indústrias siderúrgica integrada e não-integrada a carvão vegetal pode gerar cerca de 28kg/t a 75kg/t de pó de balão, que confere cerca 13 % dos resíduos gerados no setor (JACOMINO *et al.*, 2002).

O pó de balão é classificado como resíduo classe IIA, não-inerte, segundo a NBR 10.004/2004, considerando que no ensaio de solubilização alguns parâmetros como fenol, apresentaram resultados acima do limite estabelecido (MALARD, 2009).

O pó de balão tem uma composição química variada de acordo com a matéria-prima utilizada no alto forno dependendo do teor de finos e a composição química dos fundentes, uma vez que os elementos constituintes têm origem das matérias-primas que são utilizadas na fabricação do ferro gusa como coque ou carvão vegetal, minério de ferro e fundentes (MALARD, 2009). A Tabela 2.1 detalha a composição do pó de balão de uma indústria não-integrada a carvão vegetal.

Tabela 2.1 – Composição do pó de balão de uma siderúrgica não-integrada a carvão vegetal

Por composto		Por elemento químico	
Composto	Peso %	Elemento	Peso %
Fe ₂ O ₃	62,25	Fe	43,50
C	31,36	C	31,36
SiO ₂	2,95	O	21,60
Al ₂ O ₃	1,15	Si	1,35
Cão	0,83	Al	0,60
P ₂ O ₃	0,47	Ca	0,59
MnO	0,35	Mn	0,27
K ₂ O	0,33	K	0,27
TiO ₂	0,06	P	0,20
SO ₃	0,03	Ti	0,03

Fonte: (SILVA, 2016)

2.4 A indústria cerâmica

O setor industrial cerâmico é à base da construção civil se divide nos seguintes segmentos: cerâmica vermelha, materiais de revestimento, materiais refratários, louça sanitária, isoladores elétricos de porcelana, louça de mesa, cerâmica decorativa e utilitária, cerâmica técnica e isolante térmica e cerâmica avançada (AMORIM, 2007).

O Brasil ao lado de países, como a China e Espanha, está entre os maiores produtores de produtos cerâmicos no cenário mundial. De acordo com os dados da Associação Brasileira de Cerâmica – ABC (2016). A indústria cerâmica exerce um papel importante dentro da economia do Brasil com participação no Produto Interno Bruto - PIB estimado em 1%, que representa cerca de 8 bilhões de dólares por ano gerado pelo setor. O setor também apresenta diversidade no cenário da economia, com a participação de micro, pequenas, médias e grandes empresas, estando presente em praticamente todos os estados, tanto no interior como nas regiões metropolitanas é em grande parte dos municípios brasileiros (ETENE/BNB, 2010).

A indústria de cerâmica no Brasil é formada por aproximadamente 6.903 estabelecimentos fabris. A produção em 2017 permaneceu no mesmo nível de 2016, 76

bilhões de peças fabricadas, correspondendo a 75% de blocos/tijolos e 25% de telhas. O setor cerâmico tem participação bem significativa na vida profissional de muitos brasileiros são 293 mil empregos diretos e de forma indireta cerca 900 mil. (ANICER, 2018).

O estado do Pará tem apresentado um crescente desenvolvimento na produção de cerâmica estrutural, impulsionado por outros setores como indústria e construção civil. 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 indiretos, a fabricação mensal e aproximada de 30 milhões de tijolos e 9 milhões de telhas. Tem participação em 92% na oferta da produção estadual. O volume de produção é absorvido dentro do estado do Pará, uma pequena parte é distribuída ao estado vizinho Maranhão (MA) (NAHUM, 2011).

2.5 Argilas

Para o termo “argila” existe uma grande variedade conceitos na literatura científica, sendo difícil sua definição devido à diversidade de argilas ou mesmos pelas várias áreas de atuação que a utilizam como química, mineralógica, geológica e etc... (MEIRA, 2001).

Segundo FIGUEIREDO 2016, o termo argila é empregado para designar um material inorgânico natural, de aspecto terroso, de comportamento plástico quando adicionada uma determinada quantidade de água.

A ABNT (NBR 6502/95), diz que as argilas são compostas por partículas de diâmetro inferior a 0,002mm, que apresentam certa plasticidade quando úmidas e, quando secas, formam torrões dificilmente desagregáveis pela pressão dos dedos.

As argilas são formadas basicamente por argilominerais de composição variável; sílica livre, que na maioria das vezes é o quartzo cristalino, com tamanho de partícula superior a 10µm; carbonatos, com tamanho de partícula bem fina; feldspato, representado pelos alcalinos e alcalinos-terrosos; micas não hidratadas, como a muscovita e biotita; compostos de ferro e titânio; sais solúveis; matéria orgânica e resíduos carbonáticos (ABREU, 2013).

Pela complexidade e quantidade de diferentes argilominerais presentes nas argilas se torna muito difícil classificá-las, desta forma pode se inferir que não existem duas argilas iguais, pois cada uma destas apresenta pelo menos uma propriedade distinta (MEIRA, 2001).

Esta variabilidade das argilas se deve as variadas condições geológicas de formação. Entretanto, existem duas classificações para as argilas frequentemente usadas. A primeira diz respeito ao processo de formação ou modo de ocorrência, definida como argilas primárias originadas pela decomposição físico-química através dos anos da rocha matriz ao qual foi formada. Enquanto que as argilas secundárias são formadas por decorrentes sedimentações de partículas transportadas pela chuva e pelo vento, cujos depósitos se formaram distantes do local da rocha matriz (MEIRA, 2001).

Já para uma classificação no meio industrial e tecnológica são levadas em consideração as propriedades físico-químicas, tais como capacidade de troca de cátions, distribuição granulométrica, área superficial, plasticidade dentre outras (SANTOS, 1989).

2.6 O Processo produtivo da cerâmica vermelha

Os procedimentos realizados na produção dos inúmeros seguimentos cerâmicos apresentam semelhanças entre si parcialmente ou totalmente, sendo capazes de se diversificar conforme o modelo da peça ou material que se deseja produzir (SEBRAE, 2009).

O método de fabricação em indústrias cerâmicas pode ser organizado nas subseqüentes fases destaca: recolhimento da argila, transporte e estocagem, elaboração da mistura, método de elaboração das peças, secagem e queima (BACCELLI, 2010).

1) Coleta da Argila, transporte e estocagem.

A matéria prima indispensável para a elaboração da cerâmica estrutural é a argila, que são achadas em depósitos minerais, conhecidas como jazidas. O processo de extração é executado a céu aberto, e posteriormente é realizado o procedimento de beneficiamento (desagregação ou moagem), seguidamente por via rodoviária ou ferroviária são transportadas até a área de processamento na qual é estocada (MOREIRA, 2013).

2) Preparação e Mistura

A massa cerâmica comumente é alcançada a partir da combinação entre duas ou mais matérias primas, aditivos, água ou outros meios, para obter as cerâmicas estruturadas se faz necessário à introdução de dois ou mais tipos de argila que tem a finalidade de ajustar a plasticidade. Dificilmente é utilizada apenas uma única matéria-prima. Conseqüentemente, a dosagem das matérias primas e dos aditivos é uma das etapas essenciais do procedimento de fabricação de produtos cerâmicos, devendo ser adotada com exatidão as formulações de massas, previamente estabelecidas (ABREU, 2013).

Para obtenção de uma massa com uniformidade química e física, é fundamental que as matérias primas estejam bem homogeneizadas sendo inseridas em quantidades controladas. Nessa etapa são formados pequenos montes de argilas que são misturados e homogeneizados por equipamentos mecânicos, como retroescavadeiras, para serem transportadas para a caixa alimentadora. Em seguida, a mistura é umedecida com água para simplificar a homogeneização, seguindo para o laminador. A mistura, em forma de pasta consistente, é transportada por meio de correia para a etapa de extrusão (MAIA, 2009).

3) Processo de formação das peças

Existem diferentes procedimentos para se confeccionar as peças cerâmicas, a seleção do método ideal deve ser baseada nas dimensões da peça, sua geometria, condições econômicas, nas características encontradas nas matérias primas, entre outros. Colagem/fundição em molde, extrusão, prensagem e torneamento são as quatro técnicas fundamentais (DUTRA, 2006).

4) Secagem

Esta etapa vem logo após a conformação da peça cerâmica crua. É adotado este procedimento para evitar a formação de trincas na superfície da peça. O principal objetivo da secagem é a eliminação da água adicionada à massa cerâmica, que teve a seguinte finalidade proporcionar a plasticidade necessária para o processo de conformação (AMORIM, 2008).

A secagem é um processo térmico, onde parte da água contida na peça conformada vai evaporando, enquanto sua resistência mecânica vai aumentando. As diferentes contrações que ocorrem na peça, durante a etapa de secagem, que está facilmente submetida a fraturas e deformações, para que seja evitado é necessário que a peça crua possua uma retração de secagem de no máximo 0,3% e um módulo de tensão a ruptura superior a 2,9 MPa (DUTRA, 2006).

5) Queima

A queima confere ao produto as propriedades desejadas, como dureza, resistência mecânica, baixa absorção de água, resistência a intempéries e agentes químicos. Durante esta etapa, a peça conformada se contrai acontecendo a redução da porosidade e melhoria da resistência mecânica. O resultado da queima é a redução ou eliminação quase total dos poros, acompanhada pelo aumento da densidade do produto e uma junção dos grãos cristalinos em

seus constituintes mineralógicos individuais, formando uma massa rígida e resistente (MAIA, 2012).

Durante a queima é transmitida uma energia térmica à peça, criando condições favoráveis para que ocorram transformações físicas e químicas que permitam a obtenção das propriedades finais. Na queima ocorrem os seguintes processos em numa sequência de temperatura crescente: saída da umidade residual; decomposição das argilas: passagem de cru a queimado inicial, variação na brusca de tamanho na temperatura de choque térmico, decomposição dos carbonatos, sinterização das partículas cristalinas soltas, reorganização das estruturas cristalinas, sinterização avançada (ANDRADE, 2009).

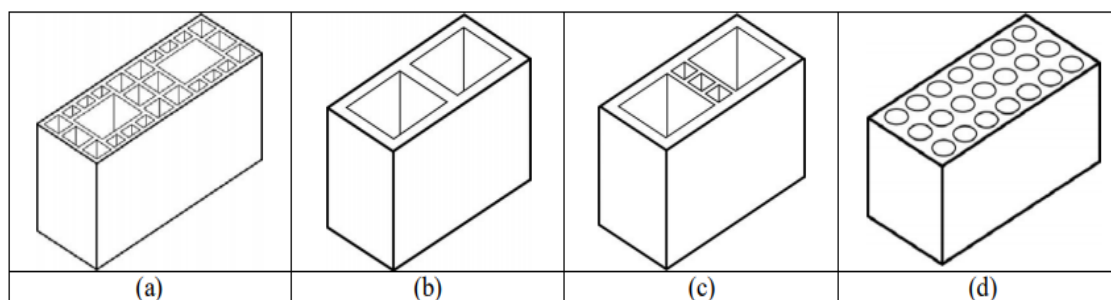
Fatores como temperatura, velocidade de aquecimento, velocidade de resfriamento e tipo de forno influenciam no processo de queima. O controle da temperatura durante todo o ciclo de queima é importante para evitar defeitos nas peças. No intervalo de temperatura entre 560 e 580°C ocorre transformações alotrópicas do quartzo que é acompanhada de forte dilatação, podendo gerar trincas de queima. Estes fatores devem ser controlados para evitar defeitos no produto final como deformações, fissuras, rupturas e outros (BACCELLI, 2010).

2.7 Bloco estrutural cerâmico

A alvenaria estrutural desempenha uma importante posição no mercado brasileiro de construção civil. Apresenta características como: precisão dimensional, boa resistência à compressão, isolamento térmico e acústico, resistência ao fogo e à penetração da chuva, flexibilidade para a estética. Se bem utilizada ajuda a minimiza índices de desperdício e, por esse motivo, vem crescendo o interesse em sua aplicação (SANTOS *et al.*, 2007).

Segundo a norma ABNT NBR 15270-2/2005 bloco estrutural cerâmico tem como objetivo estruturar (sustentar cargas). Os blocos cerâmicos classificam-se em: bloco cerâmico estrutural de paredes vazadas (a); bloco cerâmico estrutural com paredes maciças (b); bloco cerâmico estrutural com paredes maciças (paredes internas vazadas) (c) e bloco cerâmico estrutural perfurado (d), como mostra a Figura 2.4.

Figura 2.4: Blocos cerâmicos – definições ABNT NBR 15270-2.



Fonte: ABNT NBR 15270-2/2005.

Resistência à compressão, precisão dimensional e o índice de absorção de água são as características principais para os parâmetros de controle dos blocos (COUVIGNOU, 2007).

Resistencia à compressão: Conforme a norma ABNT NBR 15270-2 a resistência à compressão é um parâmetro para qualidade do bloco, depende das materiais primas utilizados durante o processo de fabricação do bloco, assim como do processo de queima. O valor de resistência mínima para bloco estrutural é 3 MPa, sendo a resistência de 6 MPa o valor mais comum encontrado no mercado.

Precisão dimensional: De acordo com ABNT NBR15270-2/2005 a geometria do bloco cerâmico estrutural é caracterizada pelos seguintes fatores: medidas das faces, espessura dos septos, espessuras das paredes externas dos blocos, desvio em relação ao esquadro, planeza das faces, área bruta e área líquida.

De acordo com RIZZATTI (2003) o estudo de uma geometria adequada para o bloco é importante para que se consiga um melhor desempenho mecânico do bloco quando submetidos à compressão.

Índice de absorção: ABNT NBR15270-2/2005 defini que a quantidade de água que um bloco é capaz de absorver e serve como um indicador de qualidade, para que o lote seja aceito deve apresentar limites de 8% e 22% de absorção de água.

A Figura 2.5 apresenta o bloco estrutural cerâmico pronto para ser utilizado em alvenaria.

Figura 2.5 – Bloco estrutural cerâmico.



Fonte: Cerâmica Selena (2019).

2.8 Reciclagens de resíduos em cerâmica vermelha

As pesquisas direcionadas a reciclagem de resíduos industriais vem adquirindo cada vez mais força no mercado econômico mundial. A incorporação de resíduos em cerâmica vermelha é uma solução correta do ponto de vista ambiental para destinação final de resíduos sólidos (AMORIM, 2013).

VIEIRA *et al.*, (2007) diz que utilização de resíduos sólidos industriais na produção de cerâmica vermelha envolve varias vantagens ambientais como: reciclagem, possibilidade de inertização dos resíduos bem como a economia de matéria-prima argilosa, melhora da qualidade cerâmica e novas tecnologias a indústria.

MAIA (2012) em suas pesquisas chegou às seguintes conclusões, que os resíduos contribuem na facilitação do processamento cerâmico, através da melhoria da trabalhabilidade da massa argilosa, melhorando a qualidade do produto final. Indústria cerâmica tradicional utiliza massas argilosas de natureza heterogênea, geralmente constituída de materiais plásticos e não plásticos, com isso se ganha uma vasta gama de opções e composições que permitem a combinação de diferentes resíduos, com porcentagens grandes e pequenas em materiais cerâmicos.

No processamento cerâmico durante a queima e necessária a consolidação final das partículas de forma que se obtenha um nível de porosidade compatível com o desempenho técnica exigida para cada tipo de produto. Os resíduos que contenham em sua constituição

elementos tóxicos e perigosos podem ajudar na estabilização ou fixação da fase vítrea formada através da reação dos alumino silicatos com os óxidos fundentes, basicamente K_2O e Na_2O (AQUINO *et al.*, 2015).

Há uma grande variedade de resíduos que podem ser reutilizados na indústria cerâmica que são provenientes de outros setores como a indústria de vidros, curtumes, siderúrgicas, indústrias de beneficiamento de pedras ornamentais, derivados do petróleo, entre outras (ABREU, 2013).

Na literatura a uma classificação específica para os resíduos incorporados em cerâmica vermelha que engloba três categorias principais: resíduos combustíveis, resíduos fundentes e resíduos que afetam as propriedades das cerâmicas (MAIA, 2012).

- 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.

Segundo SANTOS JUNIOR *et al.*, (2005) verificou em seus estudos com escória de aciaria demonstram que a reciclagem em cerâmica vermelha é bastante viável, sua adição de até 10% em peso e em temperaturas inferiores à $900^{\circ}C$ para não ocorrer o incremento da porosidade e redução da resistência mecânica.

OLIVEIRA e HOLANDA (2008) utilizaram em sua pesquisa 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.

VIEIRA *et al.*, (2006) chegou nas seguintes conclusões em seus resultados referentes à incorporação de lama fina de aciaria em até 10% possibilita um incremento na resistência

mecânica à flexão da argila, não alterando significativamente a retração linear de queima da mesma. Os resultados mostraram que o procedimento é uma alternativa ambientalmente correta, confirmado também na investigação sobre a influência da adição de lama fina de aciaria na microestrutura de uma argila queimada a 900°C.

REIS *et al.*, (2007) em seu trabalho avaliou a adição de escória de alto-forno em combinação com argilas predominantemente cauliníticas-ilíticas. Pode-se verificar que em temperaturas de sinterização elevadas e com maiores teores de escória incorporada houve um aumento da absorção de água e redução no valor da retração final de sinterização. A resistência à flexão, determinada por meio de ensaio de flexão em três pontos mostrou que o aumento da temperatura não resultou em variação significativa desta propriedade. Sendo assim, a incorporação de escórias de alto-forno em misturas com argilas é viável.

2.9 Utilização de pó de balão em cerâmica vermelha

Conforme dados realizados pela Acelor Mittal (2012), a indústria cerâmica é a tradicional consumidora de rejeitos siderúrgicos. Na literatura existem poucos trabalhos técnico-científicos que abordem a incorporação de pó de balão em massas cerâmicas.

Pesquisas já realizada na literatura apontam que a adição do pó de balão de forma homogênea à massa cerâmica numa concentração de 10% em peso pode trazer uma economia de combustível em torno de 40% e o tempo de cozimento cai de cerca de 80 horas para aproximadamente 48 horas. Devido ao alto teor de carbono presente neste resíduo. A presença do carbono contribui também para a uniformidade da temperatura nos fornos, evitando o cozimento mais rápido de parte do lote ou a perda de parte da produção devido às diferenças de temperatura (RIBEIRO, *et al.*, 2011).

JACOMINO *et al.*, (2002) comprovou em seu trabalho que o pó de balão pode ser incorporado em cerâmicas vermelhas, à massa de argila. Utilizando-se no máximo 10% do resíduo na fabricação de tijolos, traz uma economia de até 50% no consumo energético.

Segundo ALMEIDA (2001), os tijolos que tiveram adição de 10% do resíduo pó de balão foram os que apresentaram melhor qualidade técnica, sendo que a resistência a compressão encontrada nesses tijolos foi de 2,5MPa, considerada satisfatória, pois a Norma ABNT NBR 6461 especifica um valor mínimo de 1,0MPa. Quanto à absorção de água, os

tijolos apresentaram valores adequados a Norma ABNT NBR 8947. Em relação aos riscos ambientais concluiu-se que as maiores quantidades de fenóis são destruídas no processo de queima, os tijolos tiveram emissões de gases de fenóis inferiores aos permitidos na legislação.

Foi observado nesta revisão bibliográfica que os resíduos siderúrgicos são gerados em grande quantidade muitas vezes são pouco utilizados, mas graças às leis ambientais em vigor este cenário está mudando. A cerâmica vermelha encontra-se atualmente como uma alternativa ambientalmente correta para disposição final de resíduos. Em alguns casos, os resíduos siderúrgicos contribuem até para facilitar o processamento e melhorar a qualidade do produto cerâmico.

Com relação ao pó de balão, este resíduo vem sendo estudado em diversas pesquisas como agricultura e silvicultura, sinterização, fabricação de briquetes, indústria cimenteira. Sua incorporação em cerâmica vermelha se faz necessária uma avaliação da microestrutura da cerâmica, bem como uma melhor compreensão do comportamento térmico do resíduo. Estes aspectos é que motivaram a realização deste trabalho.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais utilizados

Este trabalho tem como base as seguintes matérias-primas: argila forte e fraca e o resíduo siderúrgico pó de balão.

Dois tipos de argilas foram utilizadas, denominadas argila forte e fraca, provenientes da Cerâmica Menegalli, empresa que tem sua produção voltada para a fabricação de telhas e tijolos, localizada no município de São Miguel do Guamá-PA que fica aproximadamente a 147km da grande Belém.

O resíduo siderúrgico Pó de Balão foi fornecido por uma indústria siderúrgica integrada localizada no sudeste do estado do Pará. A Figura 3.1 mostra o resíduo siderúrgico Pó de Balão.

Figura 3.1 – Pó de balão.



Fonte: Autor 2018.

As nomenclaturas adotadas para identificar os materiais são: Argila Forte (AFO), Argila Fraca (AFR) e Pó de Balão (PB).

3.2 Metodologia

Apresentação das etapas do procedimento experimental de todo trabalho:

- a) Beneficiamento das matérias-primas secagem, desagregação e peneiramento das matérias-primas;
- b) Caracterização das matérias-primas in natura encaminhada para análise química, física e mineralógica;
- c) Formulação das massas argilosas, preparação das matérias-primas para mistura, incorporação de 5, 10 e 15 % de resíduo.

- d) Conformação dos corpos de prova, material prensado a seco, logo após estufa a 110°C por 24h;
- e) Queima dos corpos de prova nas seguintes temperaturas de 850, 950 e 1050°C;
- f) Determinação das propriedades físicas e mecânicas das cerâmicas: ensaios realizados com as peças queimadas, massa específica aparente, absorção de água, retração linear de queima, determinação da resistência à flexão.
- g) Análise microestrutural da fratura, observação da morfologia da região da fratura das peças após o teste de flexão através da microscopia eletrônica de varredura (MEV).

3.2.1 Beneficiamento dos materiais

A argila forte, argila fraca e o pó de balão foram colocados em estufa a aproximadamente 110°C por 24 horas, em sequência, foram desagregados em um moinho de bolas.

Feito isto, os materiais foram passados em peneira de malha de nº 80 mesh (abertura 0,180 mm) para tonar por igual o tamanho dos grãos facilitando assim a compactação dos materiais.

3.2.2 Caracterização dos materiais

As características da composição mineralógica e químicas das argilas e do resíduo foram determinadas com auxílio de técnicas de fluorescência de raios X por energia dispersiva (EDX) para a verificação dos teores de óxidos constituintes nas amostras. DRX, para determinação do grau de cristalinidade, identificação e quantificação das fases cristalinas e MEV, para identificação da microestrutura.

3.2.2.1 Análise química

As identificações das argilas forte e fraca foram realizadas em espectrofotômetro 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.

O reconhecimento dos componentes químicos presentes no resíduo pó de balão foi realizado em espectrofotômetro de fluorescência de raios-x, utilizando o equipamento Axios Minerals da PANalytical do laboratório de Geociências da UFPA.

3.2.2.2 Difração de raios-x (DRX)

A difração de raios-x (DRX) das argilas foi realizada no Laboratório de Eco compósitos da Engenharia Mecânica da UFPA, onde o ensaio se deu em amostras na forma de pó 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 $8^\circ/\text{min}$.

O resíduo pó de balão foi ensaiado 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 Planáltica, 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 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A microscopia eletrônica de varredura das argilas e do pó de balão 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 dos corpos de prova

Primeiramente houve a seleção e o preparo das matérias primas, tanto a argila como o pó de balão que passaram por processos de secagem em estufa à aproximadamente 110°C por 24 horas. Posteriormente tanto argila quanto o pó de balão foram desagregados no moinho de bolas da marca WORK INDEX, série 005, por 30 min, com o objetivo de deixar o material com partículas homogêneas. Logo após foram levados à peneira de malha de nº 80 mesh (abertura 0,180 mm), a fim de se obter uma granulometria uniforme.

A partir de dados de análise química e mineralógica, tornou-se possível dispor as formulações dos corpos cerâmicos a serem produzidos. Definindo assim, os teores em massa de argila e de resíduo para cada composição foi combinada para totalizar 2 Kg e foram levadas ao moinho durante 20 minutos para a homogeneização completa.

A Tabela 3.1 apresenta a composição das formulações da massa cerâmica com a incorporação de Pó de balão.

Tabela 3.1 - Composição em peso dos materiais utilizados. Argila Forte (AFO), Argila Fraca (AFR) e Pó de Balão (PB).

Materiais em %				
Composições	AFO	AFR	PB	Quantidade de corpos de prova
AFO e AFR	50	50	-	20
AFO, AFR e 5 PB	47,5	47,5	5	20
AFO, AFR e 10 PB	45	45	10	20
AFO, AFR e 15 PB	42,5	42,5	15	20

Deste modo, após a definição das formulações, as massas cerâmicas foram umedecidas de maneira homogênea utilizando para cada amostra 8% em peso de água, distribuída com o auxílio de um borrifador, para que ao se produzir os corpos de prova à massa cerâmica não tivesse um aspecto de esfrelamento.

As massas devidamente preparadas e umedecidas, os corpos de prova puderam ser conformados utilizando a técnica de conformação por prensagem uniaxial a frio. Foram produzidos 20 corpos de prova para cada formulação em molde de aço sob dimensões exigidas pela NBR 5738/2015, de aproximadamente 10 cm X 5 cm X 1 cm. Com o auxílio de uma prensa hidráulica manual Karl Kolb scientific technical Suplies D-6072 de fabricação alemã aplicou-se a carga de 20 Mpa, que compactou cada corpo de prova no formato do molde.

A figura 3.3 apresenta o corpo de prova após compactação no molde com o auxílio de uma prensa hidráulica.

Figura 3.2 – Corpos de prova após compactação no molde.



Fonte: Autor 2019.

As amostras devidamente conformadas foram levadas a estufa para uma secagem gradativa durante 24 horas, a uma temperatura de aproximadamente 110°C.

Figura 3.3 – Corpos de prova após secagem em estufa.



Fonte: Autor 2019.

Após secagem, os corpos de prova seguiram para o processo de sinterização em forno tipo mufla, Elebttro Lim Elektro Therm, estabelecendo-se um patamar de queima de 2 horas, em três temperaturas distintas, 850, 950 e 1050°C com uma taxa de aquecimento de 2°C/min.

As temperaturas estabelecidas para este trabalho são embasadas em outros artigos publicados que se referem a testes mecânicos realizados em cerâmica vermelha para

fabricação de bloco cerâmico estrutural. A Figura 3.4 mostra os corpos de prova sendo sintetizados a 950°C.

Figura 3.4 – Sinterização dos corpos de prova em um forno do tipo mufla.



Fonte: Autor 2018.

O resfriamento das peças se deu por convecção natural. A figura 3.5 apresenta os corpos de prova (cps) confeccionados e prontos para a realização de testes físicos e mecânicos.

Figura 3.5 – Cps após o processo de queima.



Fonte: Autor 2018.

3.2.4 Determinação das propriedades dos materiais cerâmicos

As metodologias usadas neste trabalho para obtenção das propriedades foram baseadas nas seguintes normas ASTM C373-72 (1997) e ASTM C674 – 13 e na ABNT 15310/2005. Após a sinterização de todos os corpos de prova, foram realizados os seguintes ensaios:

- Massa específica aparente (g/cm^3);
- Absorção de água (%);
- Retração linear de queima (%);
- Determinação da resistência à flexão (MPa).

3.2.4.1 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 pelo 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 $\pm 0,01\text{mm}$). 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 equação 3.1:

(3.1)

$$\rho_{\text{ap}} = \frac{M}{V}$$

Onde:

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

M = massa (em g);

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

3.2.4.2 Absorção de água (AA)

O ensaio de absorção de água está relacionado 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 seguinte equação 3.2:

(3.2)

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

Onde:

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

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

3.2.4.3 Retração linear de queima (RLQ)

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 equação 3.3:

(3.3)

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

Onde:

RLq = Retração Linear de queima;

L_s = Comprimento do corpo de prova seco;

L_q = Comprimento do corpo de prova após queima;

3.2.4.4 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 equação 3.4:

(3.4)

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

Onde:

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

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

L = Distância entre os apoios (em mm);

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

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

3.2.5 Avaliação microestrutural

A avaliação microestrutural das cerâmicas queimadas foram realizadas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), com objetivo de se analisar a região da fratura após o ensaio de resistência à flexão.

As análises por MEV foram realizadas no laboratório de metalografia do IFPA (Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará, Campus Belém). Para tal procedimento foi utilizado um microscópio TESCAN VEGA3. Antes das análises houve uma preparação das amostras onde as peças sofreram metalização com uma camada de ouro de aproximadamente 5 nm.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Caracterização química

4.1.1. Caracterizações das matérias-primas por fluorescência de raios-x.

A tabela 4.1 apresenta os resultados da fluorescência de raios-x da Argila Forte e Argila Fraca e do resíduo siderúrgico Pó de balão.

Tabela 4.1- Composição química da Argila Forte, Argila Fraca e do Pó de balão.

Componentes	% em peso		
	AFO	AFR	PB
SiO ₂	59,03	66,39	3,56
Al ₂ O ₃	26,75	18,74	1,85
Fe ₂ O ₃	9,09	7,75	37,2
TiO ₂	1,80	1,63	0,18
MnO	-	0,65	0,41
MgO	-	-	0,39
CaO	-	0,97	6,90
K ₂ O	3,31	4,36	0,42
SO ₃	-	-	0,60
ZnO	-	-	0,18
Cl	-	-	0,22
PF	12,19	5,38	48,01

A composição química das amostras estudadas foram realizadas através da técnica de fluorescência de raio-x (FRX), com o objetivo de avaliar os teores de cada elemento presente nas amostras.

A determinação dos principais óxidos que compõem uma argila é um dos critérios essenciais para o conhecimento das suas propriedades, cada composto tem uma relação com a mineralogia que influencia na formulação da massa cerâmica (ALMEIDA, 2001).

Observa-se que tanto a argila forte quanto argila fraca apresentam bastante similaridade em sua composição química, sílica (SiO₂) e alumina (Al₂O₃) como óxidos predominantes, estando relacionados aos aluminossilicatos como o mineral argiloso e a mica muscovita.

As argilas forte e fraca apresentam um bom teor óxidos de ferro (Fe₂O₃) que proporciona o tom avermelhado após a queima, possibilitando a aplicação em cerâmica vermelha. As argilas forte e fraca mostram em sua composição um baixo teor de óxidos fundentes (K₂O, Na₂O), os fundentes têm como objetivo principal a formação de fase líquida, necessária para uma densificação acentuada das cerâmicas após o processo de queima, ajudando na consolidação das partículas. Esses baixos teores apresentados pelas argilas forte

e fraca podem afetar diretamente o processamento cerâmico, aumentando a temperatura de queima e a porosidade do produto que se deseja fabricar (VIEIRA *et al.*, 2005).

Nas duas amostras de argila estudadas se observa uma elevada perda ao fogo (PF), com maior variação para a argila forte por conter maior quantidade de argilominerais, isto ocorre devido à perda de água de constituição dos argilominerais, desidratação de hidróxidos, oxidação de matéria orgânica e decomposição de carbonatos (RACANELLI, 2017).

Ao analisar a composição química do resíduo siderúrgico Pó de balão (PB) nota-se elevados teores de óxidos de ferro (Fe_2O_3), que está intimamente ligado à presença da hematita, que é oriunda do pó de minério, presente na carga ferrosa que foi carregada no topo do alto forno, sendo arrastada pelos gases ascendentes durante sua descida. A presença de óxidos de ferro contribui para conferir à cerâmica queimada uma coloração avermelhada (SILVA, 2016).

Observa-se que o pó de balão apresenta um elevado percentual de PF (48,01%), que estar associado à presença de finos de carvão vegetal em sua composição. Este elevado percentual de PF promove calor adicional na etapa de queima da cerâmica, podendo acarretar uma economia de gasto energético.

4.1.2 Caracterização mineralógica

4.1.2.1 Difratometria de raios-x das argilas e do resíduo

As Figuras 4.1, 4.2 e 4.3 apresentam os difratogramas de raios-x das argilas forte (AFO) e fraca (AFR) e do resíduo siderúrgico pó de balão (PB) respectivamente.

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

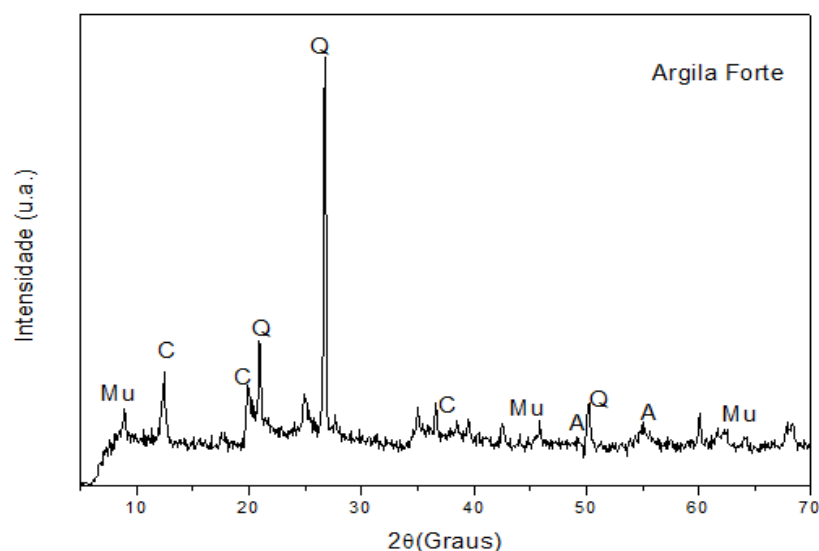
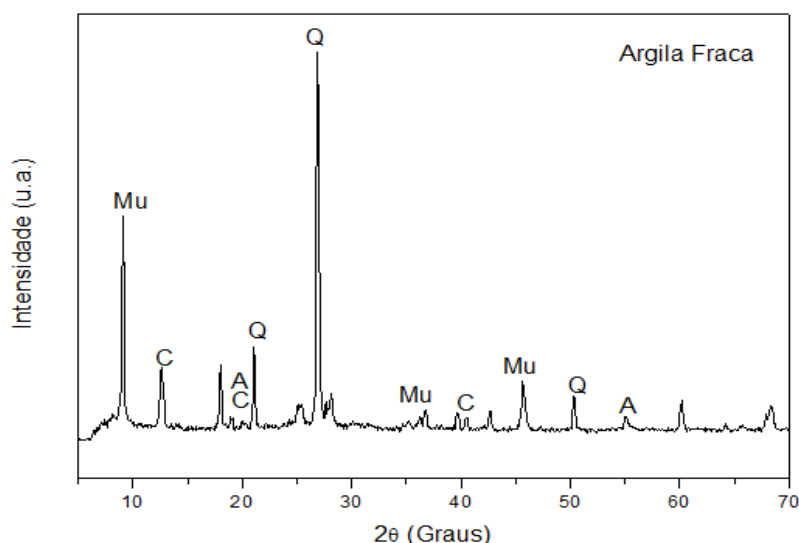


Figura 4.2 - Difratoograma de raios-x da AFR. C = caulinita; Q = quartzo; Mu = mica muscovita; A = anatásio.



Verificam-se diferentes fases cristalinas presentes nas argilas forte e fraca como: caulinita, quartzo, mica muscovita e anatásio.

Constata-se que os picos mais intensos na argila forte são os de quartzo e a caulinita, indicando que estes são os principais argilomineral que compõe a argila, enquanto que na argila fraca observam-se picos maiores de quartzo e mica muscovita.

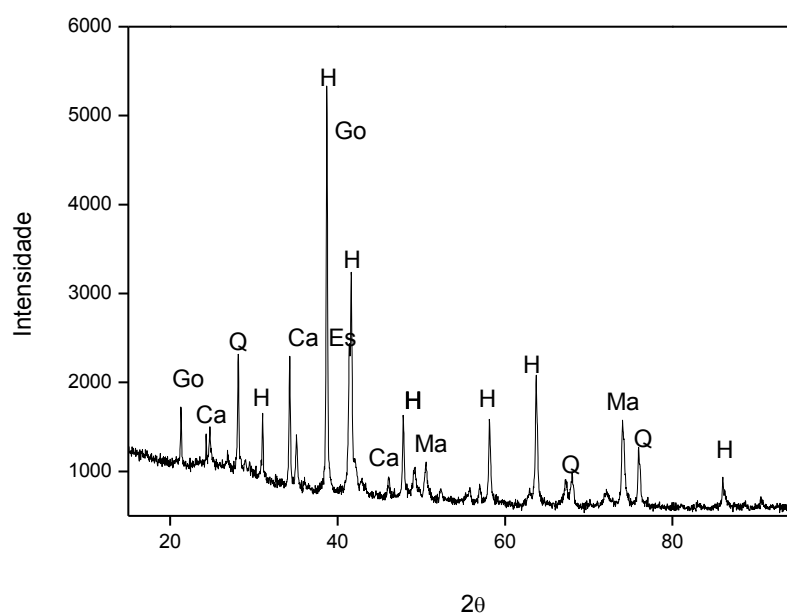
A caulinita é um dos minerais responsáveis pelo desenvolvimento da plasticidade da argila em mistura com água, podendo também indicar um comportamento de queima refratário (MACEDO *et al.*, 2008).

O quartzo presente é um mineral encontrado naturalmente nas argilas e solos, atua como matéria-prima não-plástica e inerte durante a sinterização, diminuindo a plasticidade do material e gerando alguns efeitos nocivos devido às suas mudanças de fase cristalina com a elevação da temperatura (VIEIRA *et al.*, 2007).

A mica muscovita quando possui um tamanho de partícula reduzido atua como fundente devido à sua composição rica em óxidos alcalinos. Caso contrário, pode ocasionar o aparecimento de defeitos nas peças cerâmicas. Os grãos de anatásio possuem pequena translucidez e cores variando do amarelado ao cinza dando as argilas cor e brilho variáveis (MENEZES, 2007).

RACANELLI em seus estudos utilizando argilas de São Miguel do Guamá que são tipicamente cauliníticas observou que estas apresentam como umas das suas características uma elevada refratariedade o que permite temperaturas mais elevadas em torno de 1200 a 1350°C podendo ser utilizadas em matérias de comportamento refratário.

Figura 4.3 - Difratoograma de raios-x do pó de balão. Ca: calcita; Es = espinélios; Go = goetita; H =hematita; M = magnetita; Q = quartzo.



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

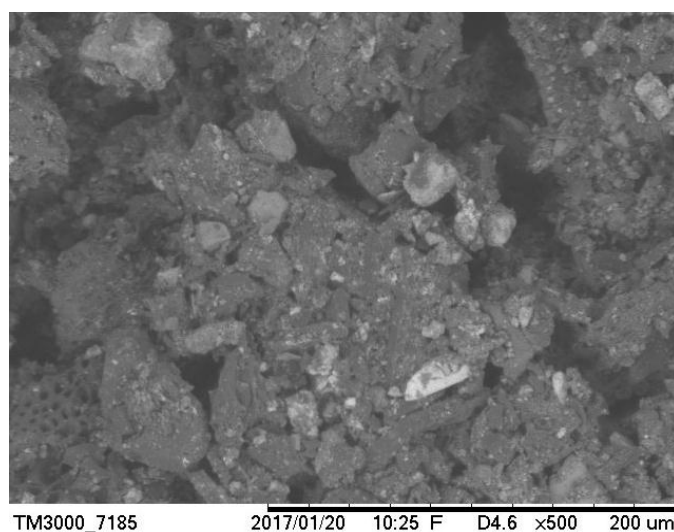
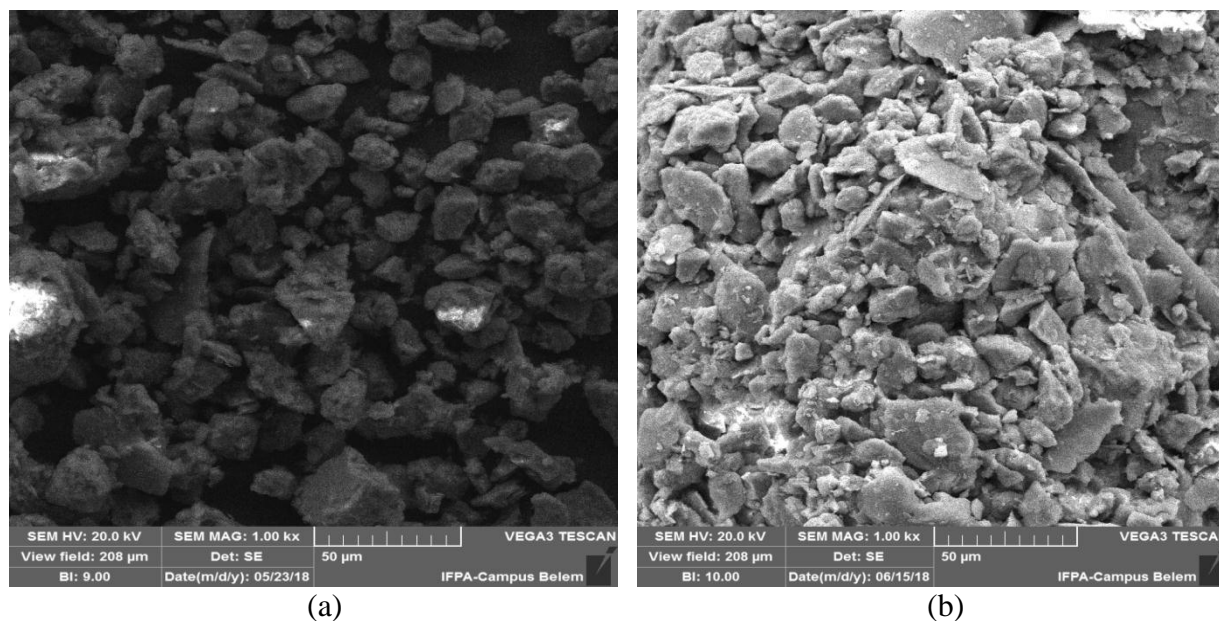
Devido à composição química complexa, vale ressaltar que podem existir outras fases cristalinas minoritárias. Outro aspecto importante que vale a pena citar é a presença de finos de coque nesse tipo de resíduo que não puderam ser identificados devido ao seu caráter amorfo.

Ao correlacionar a fluorescência de raios-x com a difração de raios-x do pó de balão pode-se afirmar que a elevada perda ao fogo das amostras analisadas está relacionada à descarbonetação da calcita além da desidroxilação e/ou desidratação da goethita.

4.1.3 Caracterização morfológica

Na Figura 4.7 são apresentadas as micrografias obtidas por MEV das matérias-primas. Argila forte (a) fraca (b) e do resíduo pó de balão (c) respectivamente.

Figura 4.7 - Micrografias obtidas por MEV das argilas. (a) forte, fraca (b) e pó de balão (c) respectivamente.



Observa-se que as argilas forte e fraca apresentam pequenas partículas em formas hexagonais associadas, provavelmente, a caulinita, argilomineral presente nas argilas (VIEIRA *et. al.*, 2005).

Nota-se que o pó de balão é composto por partículas mais claras que podem estar associadas ao quartzo e partículas de coloração mais escuras que podem estar associadas ao ferro. Observa-se também que as partículas não apresentam um padrão morfológico sendo possível observar partículas com diferentes formatos.

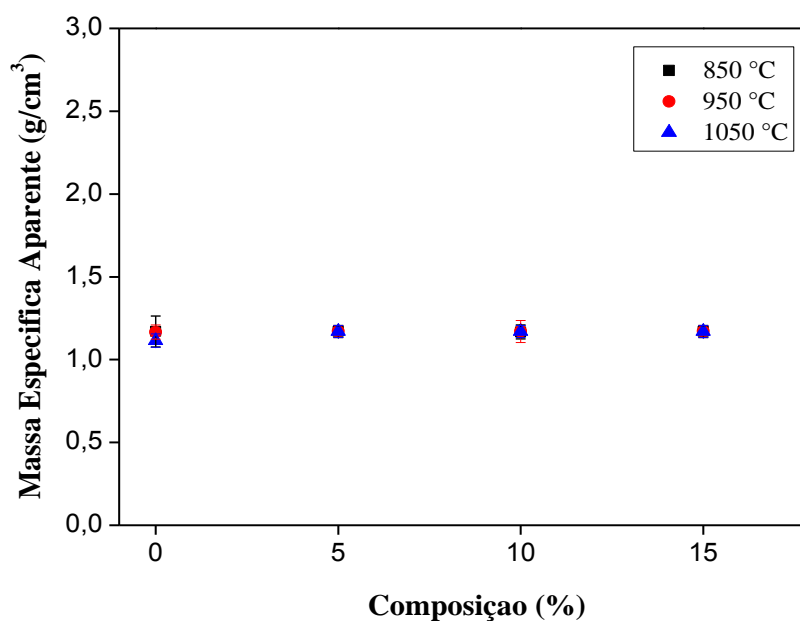
Dessa forma, a caracterização do pó de balão revelou que esse resíduo pode ser um material que pode contribuir para intensificar a cor das cerâmicas queimadas e, pode contribuir para melhorar o desempenho tecnológico das peças.

4.2 Propriedades físicas e mecânicas

4.2.1 Massa Específica Aparente (MEA)

A Figura 4.8 apresenta a massa específica aparente dos corpos de prova sinterizados em diferentes temperaturas 850, 950 e 1050°C.

Figura 4.8 – Gráfico de massa específica aparente.



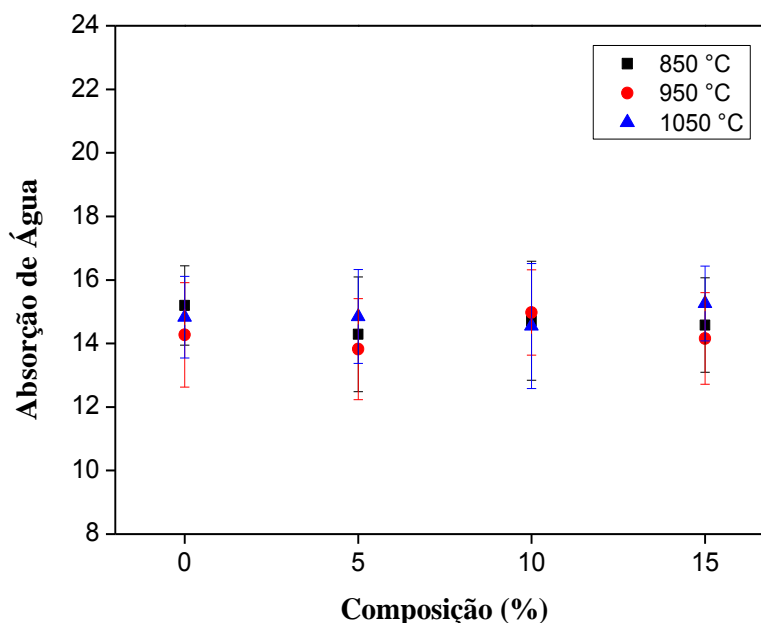
Fonte: Autor 2019.

Segundo a NBR 15270-2/2005 a densidade máxima permitida para cerâmica vermelha fica abaixo de 2,7%. Diante dos resultados obtidos pode-se observar que todas as amostras estiveram dentro dos valores citados pela norma, no entanto, nota-se que não houve diferença significativa entre as composições sinterizadas em diferentes temperaturas.

4.2.2 Absorção de Água (AA)

A Figura 4.9 apresenta o comportamento da absorção de água das peças cerâmicas sinterizadas.

Figura 4.9 – Gráfico de absorção de água.



Fonte: Autor 2019.

Segundo a norma NBR 15270-3/2005 os valores de absorção de água não devem ser inferior a 8% nem superior a 22%.

Observa-se que para as diferentes temperaturas de 850, 950 e 1050 °C os valores de absorção de água não ultrapassaram os valores estabelecidos pela norma NBR 15270-3/2005. Na temperatura de 850 °C observa-se que ao adicionar 5% de resíduo houve uma queda na absorção em relação à massa argilosa. Quando se adicionou 10% de resíduo houve um leve aumento dessa propriedade, sem, entretanto, ultrapassar o valor correspondente à massa cerâmica sem adição de resíduo. No entanto, ao adicionar 15% de resíduo não foi observado variação significativa em relação a diferentes temperaturas.

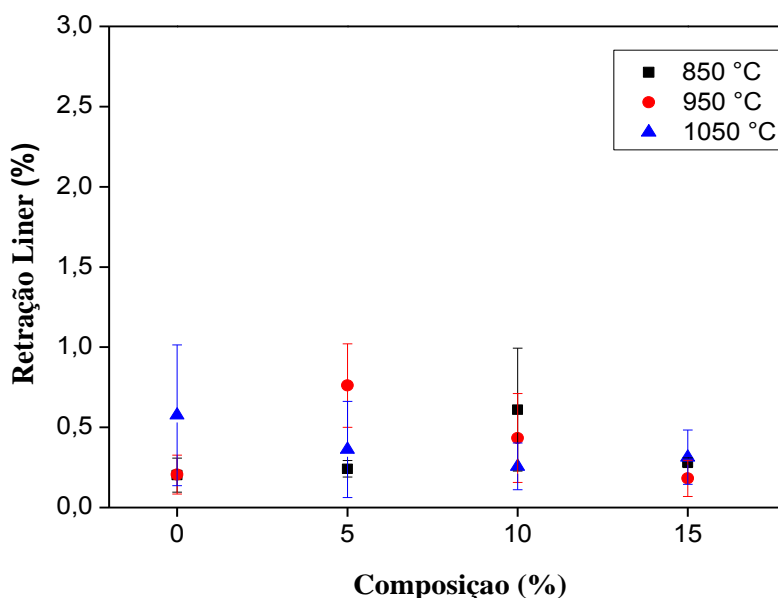
Nas temperaturas de 950 e 1050°C observa-se que não houve uma diferença significativa para as diferentes composições, os valores mantiveram-se bastante próximos.

Os melhores resultados de absorção de água foram observados nas cerâmicas com adição de 10% de resíduos a 950°C e 15% resíduo a 1050°C.

4.2.3 Retração linear de queima (RLQ)

A Figura 4.10 apresenta a retração linear de queima dos corpos de prova cerâmicos nas diferentes temperaturas de sinterização.

Figura 4.10 – Gráfico de retração linear.



Fonte: Autor 2019.

Na temperatura de 850°C observa-se que ao adicionar 10% de resíduo houve um leve aumento desse parâmetro em relação à massa cerâmica sem adição de resíduo, isso pode estar associado à formação de fase líquida. Observa-se também que para as demais composições não houve diferença significativa nessa propriedade.

A 950°C houve um ligeiro aumento dessa propriedade, ao adicionar 5% e 10% de resíduo, entretanto, ao adicionar 15% de resíduo houve uma leve retração em relação à massa cerâmica sem adição de resíduo.

Na temperatura de 1050°C observa-se que houve uma leve retração para as diferentes composições em relação à massa cerâmica, no entanto, não houve diferença significativa em relação às demais temperaturas.

Diante dos resultados observados conclui-se que todas as composições estão dentro dos padrões sugeridos pela Associação Brasileira de Cerâmica, onde, o limite máximo de retração linear de peças sinterizadas deve ser inferior a 12%.

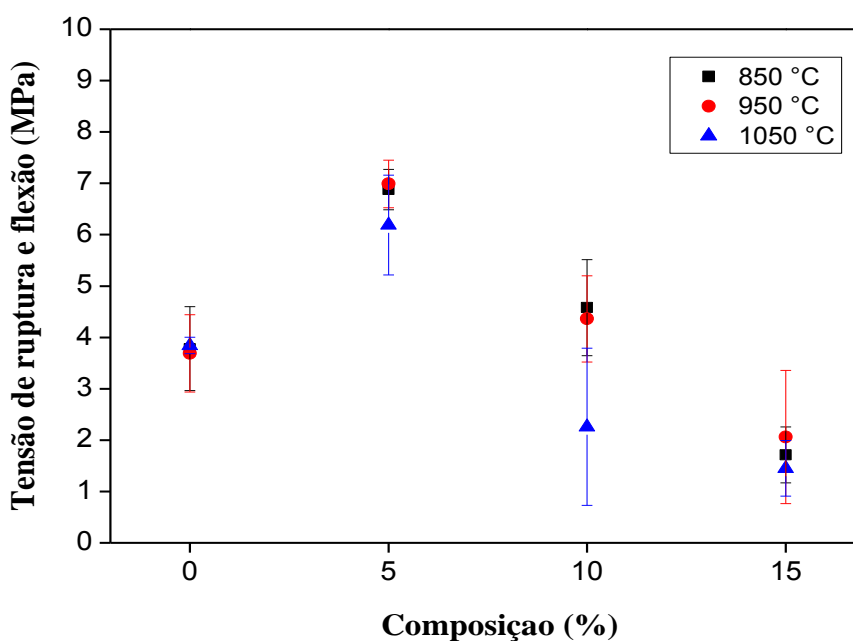
4.2.4 Determinação de Resistência à flexão (RF)

O conhecimento da resistência mecânica de um material é importante para verificar se o produto final atenderá as especificações exigidas pelas normas e não sendo diferente para comercialização dos materiais cerâmicos, a tensão de ruptura à flexão é um parâmetro indicativo da resistência mecânica desses produtos acabados. A mesma é capaz de indicar a capacidade que a peça tem de suportar esforços exercidos por cargas que possam levar a sua ruptura, esmagamento ou quebra.

Segundo a ABNT NBR 15270-2 o valor de resistência mínima para bloco estrutural é 3 MPa, sendo a resistência de 6 MPa o valor mais comum encontrado no mercado.

A Figura 4.11 apresenta resistência à flexão dos corpos cerâmicos nas diferentes temperaturas de sinterização.

Figura 4.11 – Gráfico de resistência à flexão.



Fonte: Autor 2019.

A 850°C observa-se que somente a composição contendo 5% de resíduo ultrapassa os valores citados pela literatura, alcançando uma resistência de aproximadamente 7 Mpa. Entretanto, observa-se que a composição com 15% de resíduo apresentou uma menor resistência mecânica. Já a composição com 10% de resíduo apresentou-se dentro do que conceitua a literatura.

Na temperatura de 950 °C também foi observado uma relevância nessa propriedade quando se adicionou 5% de resíduo, alcançando uma resistência de aproximadamente 7 Mpa. As demais composições apresentaram-se dentro dos padrões quando comparadas na norma ABNT NBR15270-2/2005.

Já na temperatura de 1050°C todas as composições enquadraram-se nos padrões citados na norma, exceto a composição com 15% de resíduo que alcançou uma resistência de aproximadamente 1,5 MPa, valor inferior quando comparado com a norma.

4.3 Microscopia dos corpos de prova sinterizados

Neste tópico será apresentado somente os resultados de queima a 950°C.

As Figuras 4.12, 4.13, e 4.14 mostram as micrografias obtidas por MEV da região da fratura dos corpos de provas queimados na temperatura de 950°C com adição de 5, 10 e 15% de resíduo com aumento de 500, 1.000 e 5.000 vezes, respectivamente.

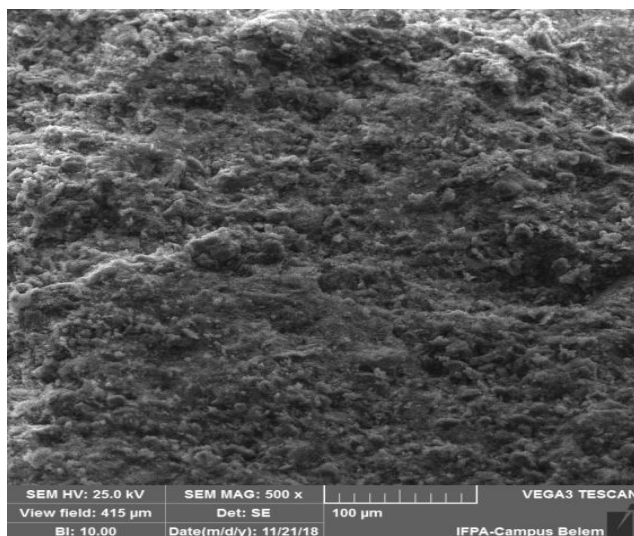
A análise por MEV permite avaliar as superfícies de fratura das peças cerâmicas. O ensaio foi feito comparando a morfologia das amostras em função do aumento da porcentagem de resíduo na massa argilosa.

Pode observar que de maneira geral as regiões de fratura de todas as cerâmicas apresentam uma textura rugosa e microestrutura com elevada quantidade de defeitos, sobretudo, poros de elevado tamanho e interconectados.

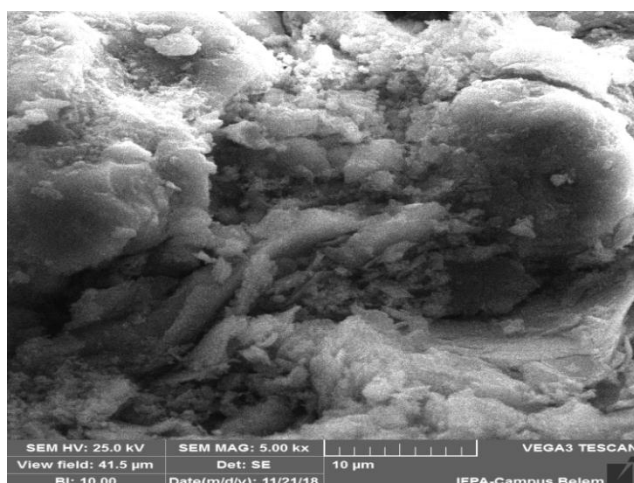
As cerâmicas com 5 e 10% de resíduo apresentaram maior consolidação da fase líquida, principal mecanismo para a consolidação microestrutural da cerâmica, ainda não foi suficiente para eliminar a porosidade aberta em algumas regiões.

Nas amostras com 15 % pode-se observar uma superfície mais densa que as anteriores, devido à presença de maior quantidade de resíduo, já que o pó de balão apresenta óxidos fundente em sua constituição.

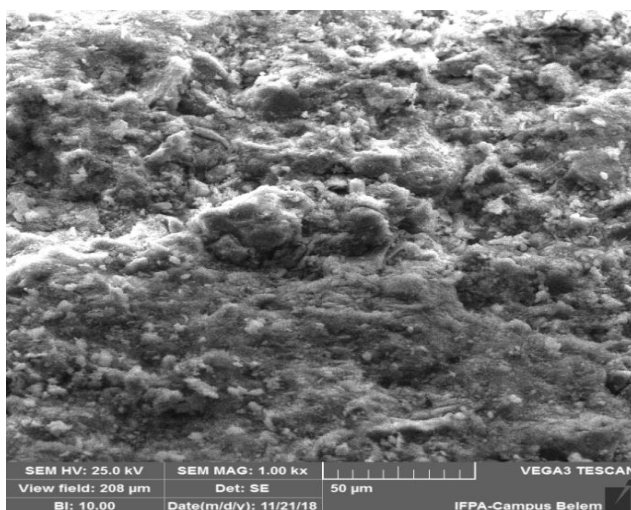
Figura 4.12 - Micrografia obtida por MEV com 5 % de resíduo com aumento de (a) 500, (b) 1.000 e (c) 5.000 vezes respectivamente.



(a)

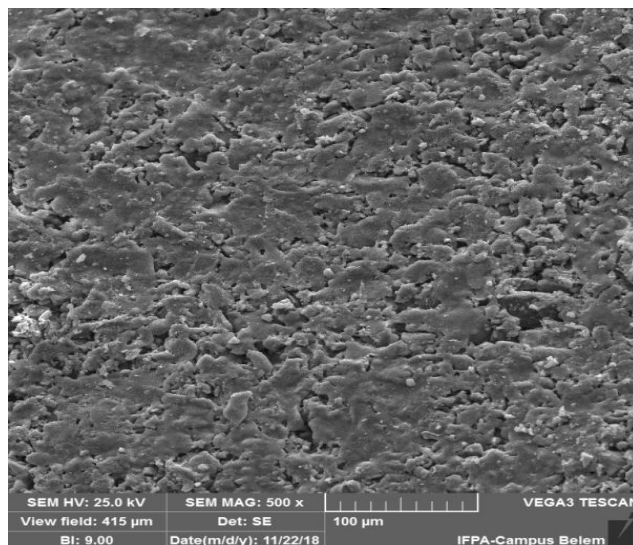


(b)

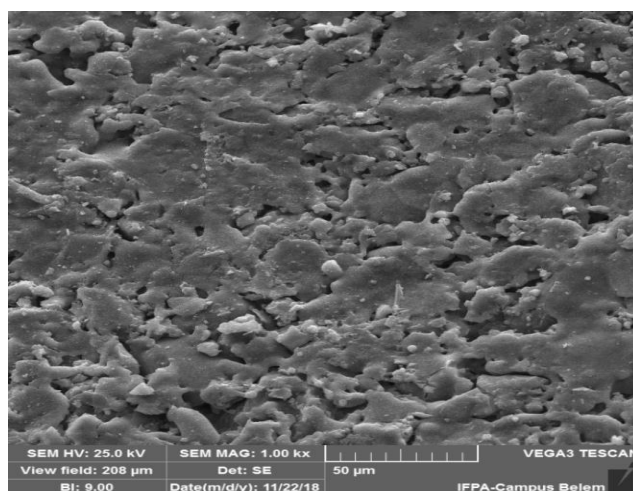


(c)

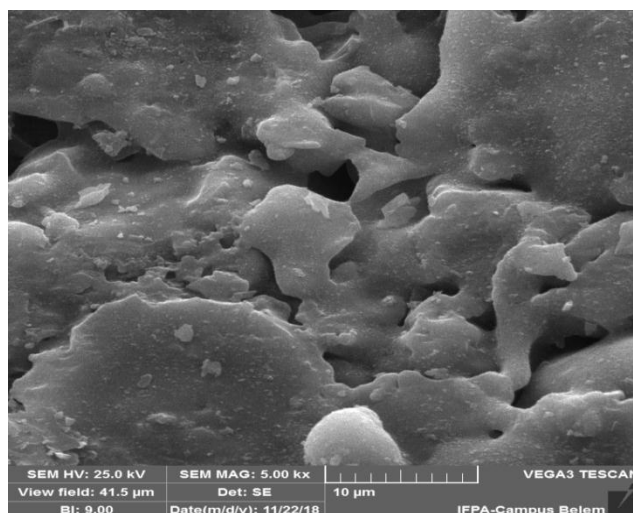
Figura 4.13 - Micrografia obtida por MEV com 10% de resíduo com aumento de (a) 500, (b) 1.000 e (c) 5.000 vezes respectivamente.



(a)

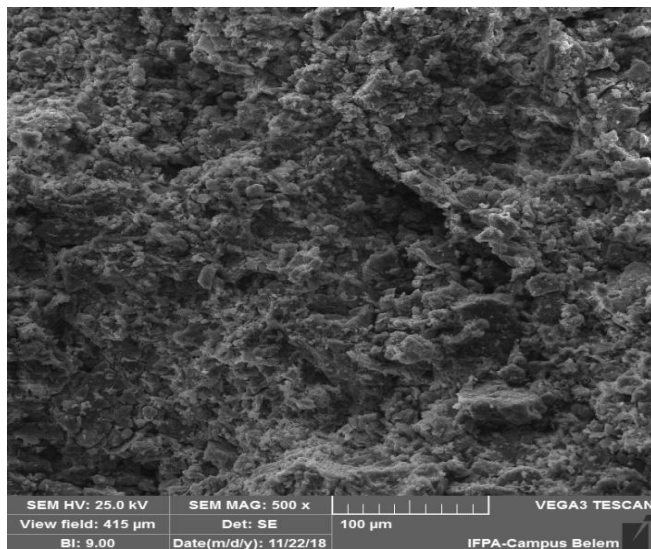


(b)

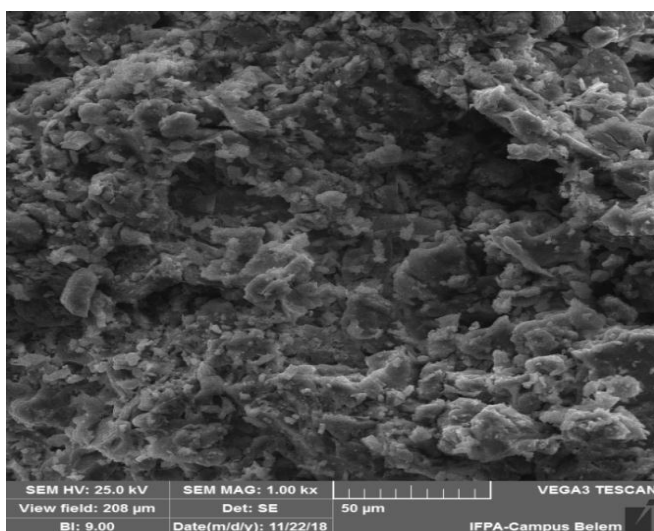


(c)

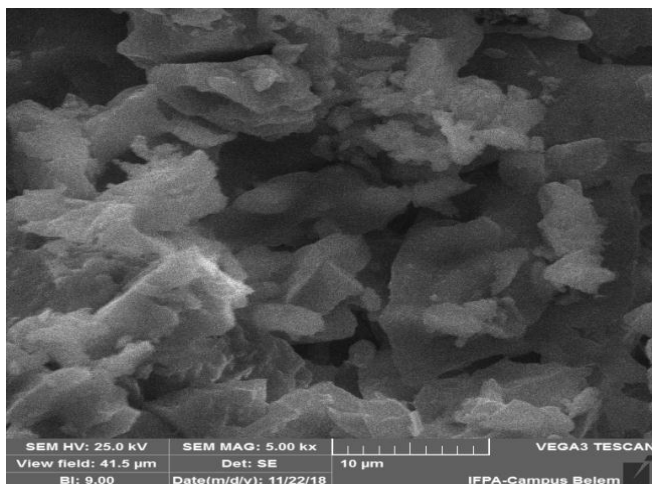
Figura 4.13 - Micrografia obtida por MEV com 15 % de resíduo com aumento de (a) 500, (b) 1.000 e (c) 5.000 vezes respectivamente.



(a)



(b)



(c)

5 CONCLUSÃO

Com base nos estudos realizados neste trabalho se pode chegar às seguintes conclusões, a caracterização do pó de balão revelou que o resíduo é rico em óxidos de ferro. As fases cristalinas presentes são hematita associada ao óxido de ferro III, a magnetita e goetita, todas essas associadas ao ferro, calcita associada ao óxido de cálcio e quartzo relacionado à Sílica. A análise por MEV mostrou a presença de partículas que podem estar associadas ao quartzo e aos óxidos de ferro. Assim, pode-se inferir que o pó de balão 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 a fabricação de bloco estrutural cerâmico.

Pode-se afirmar também que a incorporação do resíduo siderúrgico, pó de balão, em massa cerâmica argilosa, nas condições descritas nesse trabalho, é favorável para a produção de bloco estrutural cerâmico, sendo a composição com 10% de resíduo sinterizado a 950°C é a mais indicada.

Os demais resultados obtidos por este estudo se permitiu chegar as seguintes conclusões:

- Os ensaios de caracterização das argilas forte e fraca demonstram que elas são constituídas por caulinita, quartzo, mica muscovita e anatásio. As argilas estudadas podem ser classificadas como caulínicas, ajudando a desenvolver uma boa plasticidade nas massas cerâmicas, já que os argilominerais são responsáveis pelo desenvolvimento da plasticidade em mistura com a água.
- Os testes de massa específica aparente demonstram que as amostras estudadas estiveram dentro dos valores citados pela norma NBR 15270-2/2005, no entanto, nota-se que não houve diferença significativa entre as composições sinterizadas em diferentes temperaturas.
- A absorção de água em todos os testes não ultrapassou o limite estabelecido pela NBR 15270-2/2005.
- A retração linear de queima das composições estudadas se encontram dentro dos padrões sugeridos pela Associação Brasileira de Cerâmica, onde, o limite máximo de retração linear de peças sinterizadas deve ser inferior a 12%.
- Os ensaios de resistência à flexão demonstraram que 850 e 950°C as composições apresentaram-se dentro dos padrões quando comparadas na norma ABNT NBR15270-2/2005. Na temperatura de 1050°C todas as composições enquadraram-se nos padrões citados na

norma, exceto a composição com 15% de resíduo que alcançou uma resistência de aproximadamente 1,5 MPa, valor inferior quando comparado com a norma.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Determinar a granulometria dos resíduos;
- Realizar ensaios de lixiviação e de solubilização nas cerâmicas queimadas;
- Realizar estudo da influência do pó de balão na economia energética durante a etapa de queima da cerâmica vermelha;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas técnicas. NBR 10.004 – Classificação de Resíduos Sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

ABNT – Associação Brasileira de Normas técnicas. NBR 15270-2 – Componente Cerâmica Parte 2: Blocos Cerâmicos para alvenaria estrutural – Terminologia e requisitos. Rio de Janeiro, RJ. 2005.

ABREU, M. M. **Reciclagem de lama de alto forno em cerâmica vermelha**. 2013. 98 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – Uenf, Campos dos Goytacazes – Rj, 2013. Cap. 5.

ALBERO, J. L. **A operação de Prensagem: Considerações Técnicas e sua Aplicação Industrial Parte I: O Preenchimento das Cavidades do Molde**. Cerâmica Industrial, São Paulo, v. 5, n. 5, p.5-40, 2010.

ALMEIDA, M. L. B. **Alternativas de Uso e Aplicações dos Resíduos Sólidos das Indústrias Independentes de Produção de Ferro-Gusa do Estado de Minas Gerais**. 2001. 118 p. Dissertação (Mestrado) Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2001.

AMORIM, F.R. **Co-processamento de Dregs em Argila para produção de Cerâmica Vermelha**. Belo Horizonte: UFMG, 2007.

ANDRADE, F. L. F. **Estudo da formulação de massas cerâmicas provenientes da região do Seridó-RN para fabricação de telhas**. 2009. 104 f. Dissertação (Mestrado)- Apresentado ao Programa de Pós-graduação da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2009.

ANDRÉS, A.; DÍAS, M. C.; COZ, A.; VIGURI, J.R.; IRABIEN, A. (2014). **Utilization of Waste Materials in Clay Building Bricks**. In: Proceedings 2014 Global Symposium on Recycling, Waste Treatment and Clean Technology, Madrid, Spain, 171-181.

AQUINO R. C.; MEDEIROS, F. K. ; Campos L. F. A.; MACEDO, D. A.; FERREIRA, H. S; DUTRA, R. P. S. **Adição de resíduo de lodo da indústria têxtil na produção de blocos cerâmicos de vedação.** Revista Eletrônica de Materiais e Processos, v. 10, n. 1, p. 29 – 35.2015.

ARAÚJO, L. A. (2005). **Manual de Siderurgia.** Editora Arte e Ciência, volume 1. São Paulo.

ARCELOR MITTAL BRASIL (2017). Disponível em <http://www.arcelormittal.com/br>. Acessado em 03 de outubro de 2017.

ASSIS, C. F. C. **Caracterização de carvão vegetal para a sua injeção em alto-fornos a carvão vegetal de pequeno porte.** 2008. 115 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais). Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP, Ouro Preto/MG, 2008. Cap 6.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA – ABC. Matérias primas naturais. Disponível: <http://www.associação.brasileira.ceramica.com.br>. Acessado em 14 de Dezembro de 2018.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE INDÚSTRIA CERÂMICA – ANICER. Disponível: <http://www.anicir.com.br>. Acesso em 14 de Dezembro de 2018.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE CERÂMICA PARA REVESTIMENTO, LOUÇAS SANITÁRIAS E CONGÊNERES (ANFACER). A cerâmica na atualidade, 2012. Disponível: <http://www.ANFACER.com.br>. Acesso em 15 de outubro de 2018.

BACCELLI JR., G. **Avaliação do Processo Industrial da Cerâmica Vermelha na Região do Seridó – RN.** 2010. 200f. Tese (Doutorado) Engenharia Mecânica – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 2010.

BALIZA, C. D. F. **Incorporação do resíduo lama de alto forno em cerâmica vermelha.** 2010. 105 f. Monografia apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro - Uenf, Campos dos Goytacazes – RJ, 2010. Cap. 3.

BARBIERI, J. C. **Gestão ambiental empresarial**. 3. ed. São Paulo: Saraiva, 2011.

CAIRES, T. C. L. **Sustentabilidade como transformação da cadeia de valor**. 2011. 65 f. Monografia (Especialização) - Curso de MBA em Gestão Ambiental e Práticas de Sustentabilidade, Centro Universitário do Instituto Mauá, São Caetano do Sul, 2011. Cap. 5.

CARVALHO, P. S. L.; MESQUITA, P. P. D.; ARAÚJO, E. D. G. **Sustentabilidade da siderurgia brasileira: eficiência energética, emissões e competitividade**. BNDES Setorial, v. 41, p. 181-236, 2015.

CENTAL ASIA METAL (2017). Disponível: <https://www.centralasiametals.com>. Acesso em 13 de junho de 2018.

CIPOLAT, C.; LUDKE, Q. P.; KRAEMER, E. I.; BRAUN, A. B. (2010). **Ações e Estratégias para o Desenvolvimento Sustentável na América Latina Logística** – ALL; VII SEGET – Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia.

COMPANHIA SIDERÚRGICA NACIONAL (2012). Disponível: <http://www.companhiasiderurgicanacional.com.br>. Acesso em 13 de novembro de 2018.

COUVIGNOU, E. M. **Análise da conformidade e caracterização da matéria prima empregada na fabricação de blocos cerâmicos na região metropolitana de Salvador**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Salvador, Bahia, 2007.

DIAS, C. A. **Reciclagem de lama de alto forno em cerâmica vermelha**. 2011. 158 f. Tese (Doutorado) Departamento de engenharia e ciências dos materiais – Universidade do Norte Fluminense, Rio de Janeiro, 2011. Cap. 3.

DIAS, R. **Gestão ambiental responsabilidade social e sustentabilidade**. 2. ed. São Paulo: Atlas S.A., 2011

Dutra, R. P. S.; Varela, M. L. V.; Nascimento, R. M.; Gomes, U. U.; Paskocimas, C. A.; Melo, P. T. Avaliação da Potencialidade de Argilas do Rio Grande do Norte – Brasil. *Cerâmica Industrial*, v. 11, p. 42-46, 2006.

ETENE/BNB. Informe Setorial Cerâmica Vermelha. Outubro, 2010.

INSTITUTO AÇO BRASIL - Preliminar Estatístico, Disponível: <http://www.intitutoacoabrasil.com.br>. Acesso em 10 de Dezembro 2018.

FIGUEIREDO, J. D. C. **Aplicação de uma fração de resíduo do shredder 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.

JACOMINO, V. M. F.; RIBEIRO, E. D. L.; CASTRO, L. F. A. **Seleção de padrões de emissão atmosférica**. Um estudo de caso para as pequenas e médias empresas produtoras de ferro gusa do estado de Minas Gerais. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 2002, v.7, N.3, p.112-116.

MAIA, F. S. **Avaliação De Massas Cerâmicas, Processamento E Propriedades Dos Produtos De Cerâmica Vermelha**. 2012. 105 f. Dissertação (Mestrado), 2012 - Curso de Engenharia e Ciência dos Materiais. Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – Uenf, Campos dos Goytacazes – RJ, 2019. Cap. 3.

MALARD, Antônio Augusto Melo. **Avaliação ambiental do setor de siderurgia não integrada a carvão vegetal do estado de minas gerais**. 109. 216 f. Disertação (Mestrado) - Mestrado em Sustentabilidade Sócio-econômica e Ambiental. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 2009. Cap. 7.

MACEDO, R. S.; MENEZES, R. R.; NEVES, G. A.; FERREIRA, H. C. **Influência de aditivos na produção de blocos cerâmicos**. *Cerâmica*, v. 54, p. 371-381, 2008.

MEIRA, J.M.L. **Argilas: o que são, suas propriedades e classificações**. VISA Consultores: comunicações técnicas, 2001.

MENEZES, R. R. **Utilização do Resíduo do Beneficiamento do Caulim na Produção de Blocos e Telhas Cerâmicos.** Universidade Federal de Campina Grande Revista Matéria, v. 12, n. 1, pp. 225-235, 2007.

MILANEZ, B.; PORTO, M.F. **O ferro e fogo: impactos da siderurgia para o ambiente e a sociedade após a reestruturação dos anos 1990.** In: ENCONTRO NACIONAL DA ANPPAS, 4, Brasília, 2008. p.11

MOTHÉ, A. V. **Utilização da lama de alto-forno em cerâmica vermelha.** 2008. 109 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia e Ciência dos Materiais. Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – Uenf, Campos dos Goytacazes – Rj, 2008. Cap. 3.

MOTTA, J. F. M.; ZANARDO, A.; JUNIOR, M. C. (2009). As matérias primas Cerâmicas. Parte I: **O perfil das principais indústrias cerâmicas e seus produtos.** Cerâmica Industrial, v. 6, n. 2, p 28-38.

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

OLIVEIRA, L.C.P. (2017). **Panorama da Gestão de resíduos: evolução e tendências.** Disponível: http://www.abmbrasil.com.br/Panorama_da_Gestao_de_Residuos. Acesso em 26 de novembro de 2018.

OLIVEIRA, M. R. C; MARTINS, J. (2003) **Caracterização e classificação do resíduo sólido “pó de balão” gerado na indústria siderúrgica não integrada a carvão vegetal: estudo de um caso na região de Sete Lagoas/ MG.** Química Nova, 26 (1): 5-9.

QUADROS, R.; TAVARES, A. N. **À conquista do futuro: sustentabilidade como base da inovação de pequenas empresas.** Ideia Sustentável, São Paulo, ano 9, n. 36, p. 30, jul. 2014
REIS, J.P. dos; WEHLE, M.; F, M.V.; CORREIA, S.L. (2007). **Incorporação de escória de alto-forno e vidro reciclado em cerâmica vermelha.** 51º Congresso Brasileiro de Cerâmica.

RIBEIRO, E. D. L., **Estudo comparativo entre sistemas de limpeza de gases de alto-forno em siderúrgicas não-integradas a carvão vegetal e alternativa de reaproveitamento do pó do balão**. 2011. 104 f. Tese (Doutorado) Engenharia Metalúrgica e de Minas – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011. p. 66-69.

RIBEIRO, M. M. **Material particulado da planta de sinterização de usina siderúrgica integrada em composição de massa de cerâmica vermelha**. 2010. 104 f. Dissertação (Mestrado) Curso de Engenharia e Ciência dos Materiais. Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – Uenf, Campos dos Goytacazes – Rj, 2010. Cap. 2.

SANTOS, M. P. **Desempenho de Prismas e Paredes Construídas com Diferentes Geometrias de Blocos Cerâmicos**. 51º Congresso Brasileiro de Cerâmica. Salvador, BA. 2007.

SEBRAE (2009). Disponível: http://www.sc.sebrae.com.br/novos_destaquos/opportunidade. Acesso em 03 de Setembro de 2018.

SILVA, H. P. S. **Efeito da adição de pó de balão na combustibilidade do carvão pulverizado injetado no alto-forno**. 2016. 90 f. Dissertação (Mestrado) - Ciências de Materiais, Programa de Pós-graduação em Ciências – FIMAT, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto – MG, 2016. Cap. 2.

RACANELLI, L. A. **Caracterização e determinação das propriedades tecnológicas de massas argilosas para fabricação de blocos de vedação**. 2017. 110 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Pará – UFPA. Belém – PA, 2017. Cap. 4.

RIZZATTI, E. **Influência da Geometria do Bloco Cerâmico no Desempenho Mecânico da Alvenaria Estrutural sob Compressão**. 203. 120 f. Tese (Doutorado) – Doutorado em Ciência e engenharia de Materiais - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC. 2003. Cap 2.

SANTOS, P. S. **Ciência e tecnologia das argilas**. 2. São Paulo: Editora Edgard Bücher Ltda, 1989. 408p.

SOUZA, J. V. **Estudo tecnológico de algumas argilas e caulins do recôncavo do Estado da Bahia**. 2007. 160 f. Tese (Doutorado em Engenharia e ciências dos materiais) - Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007.

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

VIEIRA, C. M. F. MONTEIRO, S. N. **Incorporation of solid wastes in red ceramics – an updated review**. *Revista Matéria*. 2009; 14(3): 881 – 905.

VIEIRA, C. M. F.; MONTEIRO, S. N. DUAÍLIBI F. J. (2005). **Considerações sobre o uso da granulometria como parâmetro de controle de uma argila sedimentar**. *Cerâmica Industrial*, São Paulo, v. 10, n.1, p. 23-26.

VIEIRA, C. M. F.; DIAS, C. A. C. M.; VASCONCELOS, A. M.; SÁNCHEZ, R. J.; MONTEIRO, S. N. **Incorporação de lama de alto-forno em cerâmica vermelha**. In: **Congresso Brasileiro de Cerâmica**, 2007, Salvador. Anais do 51º Congresso Brasileiro de Cerâmica. São Paulo: Tecart, v. 1. p. 1-12, 2007.