



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**ALESSANDRA FARIAS FORMIGA QUEIROGA**

**A INFLUÊNCIA DO USO DE UM RESÍDUO SIDERÚRGICO NO SETOR DE  
CERÂMICA VERMELHA**

**FORTALEZA**

**2020**

ALESSANDRA FARIAS FORMIGA QUEIROGA

A INFLUÊNCIA DO USO DE UM RESÍDUO SIDERURGICO NO SETOR DE  
CERÂMICA VERMELHA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica. Área de concentração: Biomassa e Biocombustíveis.

Orientadora: Prof. Dra. Maria Alexandra de Sousa Rios

Coorientador: Prof. Dr. Ricardo Emílio F. Q. Nogueira

FORTALEZA

2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- Q41i Queiroga, Alessandra Farias Formiga.  
A influência do uso de um resíduo siderúrgico no setor de cerâmica vermelha / Alessandra Farias Formiga Queiroga. – 2020.  
57 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Fortaleza, 2020.  
Orientação: Profa. Dra. Maria Alexandra de Sousa Rios.  
Coorientação: Prof. Dr. Ricardo Emilio F. Q. Nogueira.
1. Cerâmica vermelha. 2. Biomassa. 3. Resíduos siderúrgicos. I. Título.

CDD 620.1

---

ALESSANDRA FARIAS FORMIGA QUEIROGA

A INFLUÊNCIA DO USO DE UM RESÍDUO SIDERURGICO NO SETOR DE  
CERÂMICA VERME LHA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica. Área de Concentração: Processos, Equipamentos e Sistemas para Energias Renováveis.

Aprovada em 02/04/2020

BANCA EXAMINADORA

---

Prof.<sup>a</sup> Dra. Maria Aleksandra de Sousa Rios (Orientadora)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof.<sup>a</sup> Dra. Ana Fabíola Leite Almeida  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Ricardo Emilio Ferreira Quevedo Nogueira  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Dr. José Silvio Veras Albuquerque  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

À Deus.

Ao meu esposo, Allan

Aos meus pais, Corina e Antonio.

## AGRADECIMENTOS

Á Deus primeiramente por me conceder saúde e sabedoria para vencer mais esta etapa de minha vida.

Ao meu esposo Allan por todo o incentivo e acreditar em mim muitas vezes mais que eu mesma.

Aos meus pais Corina e Antonio pelos preciosos ensinamentos de educação, carinho, respeito e incentivo para o meu crescimento.

Às minhas irmãs Callyandra e Jovelynna por sempre me apoiarem e me incentivarem em minhas escolhas.

Aos meus amigos, em especial as amigas Alline e Liane por me incentivar na vida acadêmica.

A Prof. Dra. Maria Alexandra por me aceitar como orientanda e por sempre estar me incentivando e orientando em todos os momentos.

A todos os amigos e alunos do mestrado, em especial a Vanessa, Welbson, Felipe, Juliana, Lino e Juarez, pela amizade, convivência e aprendizagem adquirida.

Aos alunos da Graduação Laís, Aldo e Vinícius, que participaram contribuindo para esta pesquisa.

Aos professores Dr. Ricardo Emilio, por me coorientar, ao Prof. Dr. Silvio Albuquerque por me ajudar em vários momentos, e a Prof. Dra. Fabíola pelas correções e sugestões.

A todos os professores do curso de Pós-Graduação em Energias Renováveis, pelos conhecimentos repassados através das disciplinas.

A todas eventuais pessoas que contribuíram diretamente ou indiretamente, em especial Valdi Matos, para que este trabalho fosse realizado.

À CAPES, pela concessão da bolsa de estudo e apoio financeiro.

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de financiamento 001.

“A persistência é o menor caminho do êxito”.

(Charles Chaplin)

## RESUMO

Há uma preocupação constante nas organizações pela otimização dos processos de fabricação de produtos cerâmicos, principalmente no insumo energético que representa um dos principais custos da empresa, com isso tem crescido o interesse no uso de materiais que possam influenciar neste sentido. Os principais estudos desenvolvidos envolvem o uso de resíduos de diversos setores como forma desses insumos. Neste âmbito, a pesquisa visou utilizar o resíduo do sistema de limpeza do alto-forno, onde é produzido ferro-gusa, na massa cerâmica, afim de que suas características influenciem no consumo de biomassa. Assim, será possível minimizar os gastos na destinação dos resíduos e no uso de recursos naturais, como a argila e biomassa, no processo de sinterização. O resíduo e a massa cerâmica foram caracterizadas através dos ensaios de Fluorescência de Raios X, Difração de Raios X e análise termogravimétrica (ATG) e Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC), com isso, o resíduo foi incorporado à massa cerâmica nos percentuais de 5, 10, 15 e 20% sendo sinterizados nas temperaturas de 800, 850 e 900 °C, a fim de identificar a temperatura e concentração adequada para fabricação dos blocos quando comparados ao material sem resíduo sinterizado a 850 °C. Para avaliação das formulações foram realizados ensaios de absorção de água, porosidade aparente, densidade aparente, retração linear, perda de massa e resistência à flexão. De acordo com os ensaios realizados, a temperatura que apresentou melhores resultados para o uso do resíduo foi à 800 °C, apesar que o uso do mesmo elevou a porosidade aparente e a perda de massa, entretanto não alterou a retração linear e a absorção de água permaneceu dentro da faixa permitida pela ABNT – NBR 15270 para blocos de vedação. A resistência a flexão foi maior que 4Mpa, valor aceito para blocos, exceto nas amostras com 10% que apresentou este valor para temperaturas mais elevadas, isto pode ter sido resultado de falha na homogeneização da mistura. Estima-se por essa redução de temperatura economia de biomassa em torno de 6 %.

**Palavras-chave:** Cerâmica vermelha. Biomassa. Resíduos siderúrgicos.

## ABSTRACT

There is a constant concern in organizations about the optimization of the manufacturing processes of ceramic products, mainly in the energy input that represents one of the main costs in the enterprise. As a result, the interest in materials that can influence in this sense has grown. The main studies carried out involve the use of residues from different industrial sectors as a part of these inputs. In this context, the research aimed to use the residue from the blast furnace cleaning system, where is produced the pig iron, in the ceramic mass, in order to reduce the consumption of biomass. That way, it will be possible to minimize expenses in the destination of residues and in the use of natural resources, such as clay and biomass in the sintering process. The residue and the ceramic mass were characterized by the X-Ray Fluorescence, X-Ray Diffraction, thermogravimetric analysis (TGA) and Differential Scanning Calorimetry (DSC) tests. The residue was incorporated into the ceramic mass in the percentages of 5, 10, 15 and 20% being sintered in the temperatures of 800, 850 and 900 °C, in order to identify the adequate temperature and concentration for manufacturing the blocks when compared to the material without residue sintered in 850 °C. To evaluate the formulations, tests of water absorption, apparent porosity, apparent density, linear shrinkage, mass loss and flexural strength were performed. According to these tests results, the temperature that showed the best results for the use of residue was at 800 °C. Excepting for the increment in the apparent porosity and in the mass loss, its use did not change the linear shrinkage and the water absorption remained inside the allowed range by ABNT – NBR 15270 for sealing blocks. The flexural strength was higher than 4Mpa, a value accepted for blocks, except for the samples with 10% that showed this value for higher temperatures and this result may have been from a failure in the homogenization of the mixture. This reduction of temperature is estimated to contribute with an economy of 6% of biomass.

**Keywords:** Red ceramic. Biomass. Steel waste

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Cadeia produtiva da cerâmica vermelha .....	18
Figura 2	Macro etapas do processo de produção de cerâmica vermelha.....	19
Figura 3	Curva de queima teórica.....	21
Figura 4	Processo de produção do ferro-gusa .....	23
Figura 5	Processo de preparação e queima dos corpos de prova com 0 %, 5 %, 10 %, 15 % e 20 % de resíduos.....	28
Figura 6	Corpos de Prova nas temperaturas com maiores resistências a flexão. ....	49

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 Consumo energético por fonte do setor industrial - Cerâmica .....	16
Gráfico 2 Retração linear de queima (a) e Perda de massa ao fogo (b) das amostras de traços 1:1 e 3:2 .....	32
Gráfico 3 Absorção de água (a) e Porosidade aparente (b) das amostras de traços 1:1 e 3:2	33
Gráfico 4 Massa específica aparente (a) e Resistência a flexão (d) das amostras de traços 1:1 e 3:2 .....	33
Gráfico 5 Difratoograma das argilas 1:1 sem queima .....	35
Gráfico 6 Difratoograma das argilas 1:1 com queima à 850 °C.....	35
Gráfico 7 Difratoograma do resíduo.....	36
Gráfico 8 Difratoograma das argilas 1:1 com 5% de resíduo com queima à 800 °C.....	36
Gráfico 9 Difratoograma das argilas 1:1 com 10% de resíduo com queima à 800 °C.....	36
Gráfico 10 Difratoograma das argilas 1:1 com 15% de resíduo com queima à 800 °C.....	37
Gráfico 11 Difratoograma das argilas 1:1 com 20% de resíduo com queima à 800 °C.....	37
Gráfico 12 Análise Termogravimétrica (TG) das amostras com 0, 5, 10, 15 e 20 % de resíduo. ....	38
Gráfico 13 Análise DSC das amostras com 0, 5, 10, 15 e 20 % de resíduo. ....	39
Gráfico 14 Retração Linear das amostras em 3 temperaturas, com 0, 5, 10, 15 e 20% de resíduo .....	40
Gráfico 15 Absorção de água para as temperaturas de 800, 850 e 900°C com adição de 0, 10, 15 e 20% de resíduos. ....	42
Gráfico 16 Perda de Massa dos corpos de prova em 3 temperaturas variando o percentual de resíduos em 0, 5, 10, 15 e 20%.....	44
Gráfico 17 Porosidade Aparente dos corpos de prova com adição de resíduos variando de 0% a 20%, nas temperaturas de 800, 850 e 900°C. ....	45
Gráfico 18 Densidade aparente dos corpos de prova com adição de resíduos variando de 0% a 20%, nas temperaturas de 800, 850 e 900°C.....	47
Gráfico 19 Resistência à flexão dos corpos de prova com adição de resíduos variando de 0% a 20%, nas temperaturas de 800, 850 e 900°C. ....	48

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Geração específica de resíduos sólidos industriais .....	24
Tabela 2	Resultados do resíduo para varias possíveis misturas.....	32
Tabela 3	Resultados da Análise de Fluorescência de Raio X (FRX).....	34
Tabela 4	Resultados médios da retração linear e da análise de variância e.....	41
Tabela 5	Resultados médios da Absorção de água e teste de Tukey.....	43
Tabela 6	Resultados médios da Perda de massa e teste de Tukey. ....	44
Tabela 7	Resultados médios da Porosidade Aparente e teste de Tukey. ....	46
Tabela 8	Resultados médios da Densidade Aparente e teste de Tukey.....	47
Tabela 9	Resultados médios da Resistência à flexão e teste de Tukey. ....	49
Tabela 10	Energia consumida e reduzida para o uso de biomassa. ....	50
Tabela 11	Consumo e economia de lenha por forno.....	51

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AA	Absorção de água
ABDI	Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ATG	Análise Termogravimétrica
BEN	Balanço Energético Nacional
CNAE	Classificação de atividades econômicas
CNI	Confederação Nacional da Indústria
CSP	Companhia Siderúrgica do Pecém
DRX	Difração de Raios X
DSC	Calorimetria Exploratória Diferencial
FEAM	Fundação Estadual de Meio Ambiente
FIEMG	Federação das Indústrias do estado de Minas Gerais
FRX	Fluorescência de Raios X
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICP-OES	Espectrofotometria de Emissão por Plasma
INT	Instituto Nacional de Tecnologia
MCTI	Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações
MEA	Massa específica aparente
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MME	Ministério de Minas e Energia
MRF	Módulo de Ruptura a Flexão
NBR	Norma Brasileira Regulamentar
PA	Porosidade Aparente
PCI	Poder Calorífico Inferior
PF	Perda de massa ao fogo
RL	Retração linear

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
<b>1.1</b>	<b>Justificativa.....</b>	<b>15</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos .....</b>	<b>15</b>
<b>2.</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>16</b>
<b>2.1</b>	<b>Eficiência energética no uso da Biomassa.....</b>	<b>16</b>
<b>2.2</b>	<b>Cerâmica vermelha.....</b>	<b>17</b>
<i>2.1.1</i>	<i>Processo de fabricação.....</i>	<i>19</i>
<b>2.3</b>	<b>Siderurgia e seus resíduos .....</b>	<b>22</b>
<b>3.</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>25</b>
<b>3.1</b>	<b>Caracterização dos materiais (argila e resíduo).....</b>	<b>25</b>
<i>3.1.1</i>	<i>Análise por Fluorescência de Raios X.....</i>	<i>25</i>
<i>3.1.2</i>	<i>Difração de Raios X .....</i>	<i>25</i>
<i>3.1.3</i>	<i>Análise Térmica (TG e DSC).....</i>	<i>26</i>
<b>3.2</b>	<b>Preparação e Sinterização dos corpos de prova.....</b>	<b>26</b>
<i>3.2.1</i>	<i>Escolha do traço.....</i>	<i>26</i>
<i>3.2.2</i>	<i>Preparação das amostras .....</i>	<i>27</i>
<b>3.3</b>	<b>Ensaio Tecnológicos.....</b>	<b>28</b>
<i>3.3.1</i>	<i>Retração linear de queima .....</i>	<i>29</i>
<i>3.3.2</i>	<i>Perda de massa ao fogo (PF) .....</i>	<i>29</i>
<i>3.3.3</i>	<i>Índice de Absorção de Água (AA) .....</i>	<i>29</i>
<i>3.3.4</i>	<i>Porosidade Aparente .....</i>	<i>30</i>
<i>3.3.5</i>	<i>Massa específica Aparente (MEA) .....</i>	<i>30</i>

3.3.6	<i>Resistência à Flexão</i> .....	30
<b>3.4</b>	<b>Economia de Biomassa</b> .....	<b>31</b>
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>32</b>
<b>4.1</b>	<b>Escolha do traço</b> .....	<b>32</b>
<b>4.2</b>	<b>Caracterização dos materiais</b> .....	<b>34</b>
4.2.1	<i>Análise de Fluorescência de Raio X (FRX)</i> .....	34
4.2.2	<i>Análise da Difração de Raios X</i> .....	35
4.2.3	<i>Análise Térmica (TG e DSC)</i> .....	37
<b>4.3</b>	<b>Qualidade dos corpos de prova</b> .....	<b>39</b>
4.3.1	<i>Retração linear de queima</i> .....	40
4.3.2	<i>Teste de absorção de água</i> .....	41
4.3.3	<i>Perda de Massa ao fogo</i> .....	43
4.3.4	<i>Porosidade Aparente</i> .....	45
4.3.5	<i>Densidade Aparente</i> .....	46
4.3.6	<i>Resistência à Flexão</i> .....	48
<b>4.4</b>	<b>Economia de Biomassa</b> .....	<b>50</b>
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>52</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>53</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A Biomassa está entre as principais fontes energéticas do Brasil. Apesar de sua redução ao longo dos anos, o consumo de lenha pelas cerâmicas representou, em 2018, aproximadamente 27% do consumo energético de lenha e 12 % do consumo final energético da lenha (BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL - BEN, 2019). Este elevado consumo provoca grandes impactos ambientais através de desmatamento e desertificação de áreas florestais.

Como, em alguns setores, a mudança da matriz energética não é simples de ser realizada, a otimização no consumo dessa fonte traz benefícios tanto para o setor industrial através da redução dos custos, bem como ambiental na redução de seus impactos.

Um dos setores que se destaca no consumo de lenha como fonte energética é a Cerâmica Vermelha que utiliza biomassa no processo de queima das peças cerâmicas, e possui um processo de fabricação antigo com dificuldades para alteração da fonte energética, devido ao elevado investimento necessário para instalar melhorias no processo (DA SILVA, 2017).

Há uma tendência de uso de resíduos incorporados a massa cerâmica que pode trazer ganhos ambientais e econômicos para as empresas (CABRAL JUNIOR, 2008) e junto a isto tem aumentado a busca de soluções que sejam tecnologicamente viáveis e capazes de minimizar os impactos devidos à disposição de resíduos no meio ambiente, por parte das empresas geradoras (MORETE, 2006).

Além disso, estão sendo incorporados às massas cerâmicas diversos tipos de resíduo, tais como: lodo resultado do tratamento de água, lama do tratamento da bauxita, escoria de soldagem, resíduos de vidro, bem como o uso de resíduos da cerâmica para fabricação de produtos da construção civil, como avaliados por: Maschio. *et al* (2009); Cremades (2018); Gayarre (2017); Mymrin (2017); Khan (2016), Morete (2006) entre outros.

Em Minas Gerais já são utilizadas, na massa cerâmica, resíduos de Pó de balão e Lama de Alto-forno da siderurgia em proporções que variam de 5 a 10%, conforme critérios utilizados pelos ceramistas (FIEMG/FEAM, 2013). De acordo com FEAM (2012), essa adição a massa cerâmica pode reduzir o consumo da Biomassa na ordem de 30% e o tempo de queima.

Diante do exposto, esta pesquisa teve o intuito de avaliar a possibilidade de diminuir o uso de Biomassa na etapa da queima no processo de fabricação de blocos de vedação, adicionando ao material cerâmico resíduos do Alto-Forno gerados no processo de redução do ferro-gusa na indústria Siderúrgica.

### **1.1 Justificativa**

Um dos principais custos no setor de cerâmica vermelha é a energia utilizada no processo de sinterização dos produtos cerâmicos, onde as argilas passam por um processo de transformação tornando-se cerâmica. Cerca de 50 % desse setor utiliza a lenha como fonte geradora de energia, devido seu baixo custo e facilidade de aquisição (BEN, 2019)

Entretanto, esses processos produtivos são pouco eficientes com elevado índice de perda de energia nos fornos (INT/MCTI, 2013) com isso a busca na redução deste insumo é constante, desta forma, analisar uso de resíduos incorporando-os a massa cerâmica de forma a otimizar o processo de queima pode trazer benefícios ao setor.

### **1.2 Objetivos**

Este trabalho tem por objetivo verificar a viabilidade do uso de Pó de Ciclone incorporado à massa cerâmica, em 4 dosagens percentuais, e sua influência no consumo de lenha através da temperatura de sinterização no produto.

Os objetivos específicos são:

- a) Fazer Análises Termogravimétricas, Fluorescência e Difração de Raios X para caracterização das amostras de argila e do resíduo escolhido;
- b) Definir o traço da massa cerâmica e temperatura de referência a ser utilizado como parâmetro comparativo.
- c) Preparar corpos de prova em 4 dosagens de resíduos (5, 10,15 e 20%) para sinterização em 3 temperaturas (800, 850 e 900 °C);
- d) Realizar ensaios mecânicos de Absorção de água, Porosidade aparente, Densidade aparente e Resistência à flexão;
- e) Avaliar se estão de acordo com a norma NBR 15270-2: Componentes cerâmicos - blocos e tijolos para alvenaria;
- f) Analisar os resultados para identificação da temperatura e percentual de resíduo admissível, através da análise da variância, ANOVA, utilizando o teste de Tukey.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

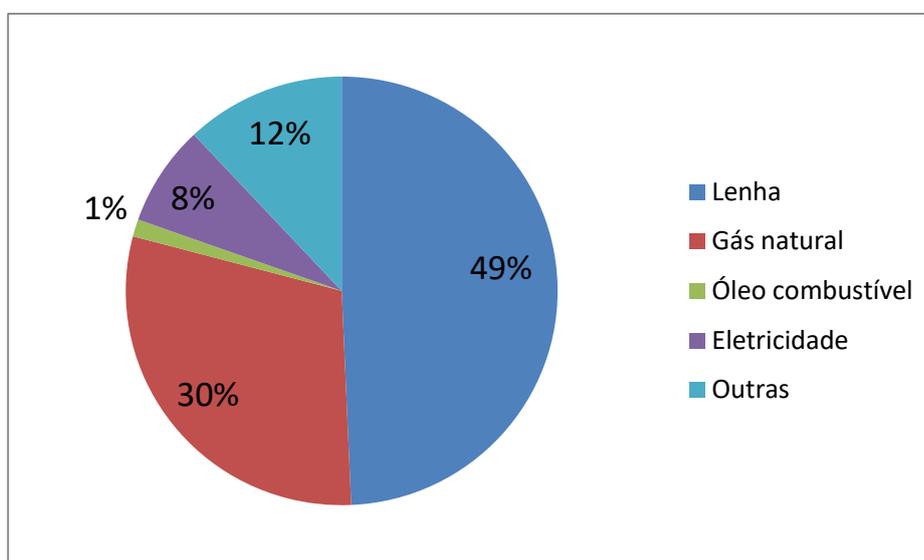
### 2.1 Eficiência energética no uso da Biomassa

A biomassa é a principal fonte de energia no processo de fabricação da indústria cerâmica, ela é utilizada no processo de sinterização da argila, conhecido como processo de queima. É nessa fase que a argila se torna cerâmica e adquire suas principais propriedades, como dureza e coloração.

Segundo Câmara et al (2016), a biomassa pode ser classificada em dois grupos: a (1) biomassa tradicional, composta essencialmente por lenha e resíduos naturais e (2) biomassa moderna, produzida através de processos tecnológicos, tais como biocombustíveis líquidos, briquetes, cogeração de bagaço de cana, entre outros.

Entretanto, a lenha, tanto nativa como de reflorestamento, são as biomassas mais utilizadas devido à facilidade de aquisição e baixo custo (DUTRA, 2007), além disso, grande parte dos modelos de fornos são construídos visando seu uso, tais como os fornos: Hofmann, Paulistinha, Caipira, Abóboda, entre outros (ISHIDA, 2018; FIEMG/FEAM, 2013).

Gráfico 1- Consumo energético por fonte do setor industrial - Cerâmica



Fonte: Adaptado de BEN (2019)

No entanto, tem crescido a adaptação dos modelos para uso do gás natural, como observado pelo aumento do seu consumo de gás natural de 2009 a 2018 (BEN, 2019). No

ano de 2018, o consumo de biomassa no setor ceramista representou 49,3% do consumo total do setor seguido por gás natural com 29,8% (Gráfico 1), valor bastante relevante apesar do seu decréscimo ao longo dos anos, o que confirma uma tendência mundial de mudança de matriz energética para gás natural, como citado em Santos (2001).

Uma das alternativas para redução do consumo energético é melhorar a eficiência dos processos, segundo o INT/MCTI (2013), o conceito de eficiência energética para cerâmica vermelha está relacionada a ideia de uso otimizado dos recursos energéticos sem alterar a produção da indústria.

No estudo apresentado pela Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial - ABDI (2013), identificou algumas ações para minimizar problemas de eficiência energética, dentre as sugestões pode-se destacar:

- Criação de linhas de financiamento que estimulem os ceramistas a substituir seus fornos por modelos energeticamente mais eficientes.
- Criação de mecanismos e incentivos para que a substituição de fornos e a melhoria da eficiência energética possam também incentivar o mercado de créditos de carbono.
- Criação de programas nacionais, conduzidos por entidades como o Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas - SEBRAE e o Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial - SENAI, para o diagnóstico de eficiência energética e criação de planos de ação para a atualização tecnológica do setor na busca da utilização de créditos de carbono.

Além dessas, pode-se destacar: melhoria na combustão, emprego de resíduos na massa cerâmica, uso de lenha picada, recuperação de calor, isolamento térmico e arranjo de peças no forno (INT/MCTI, 2013), equipamentos mais eficientes, umidade do produto e da lenha (ISHIDA, 2018).

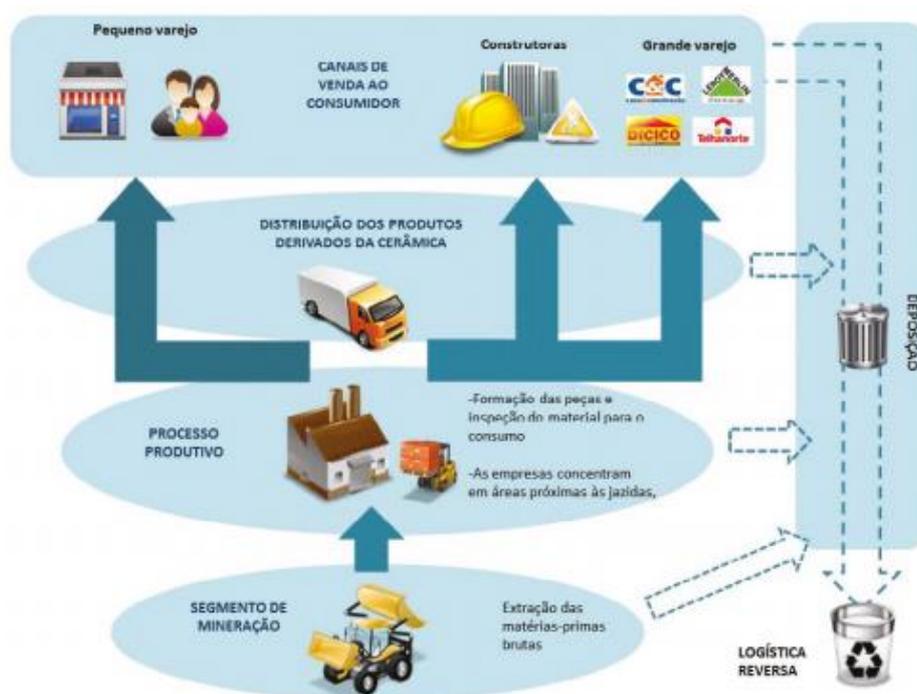
## **2.2 Cerâmica vermelha**

A indústria de cerâmica vermelha é uma atividade de base que possibilita a construção civil, da mais simples à mais sofisticada (PEREZ, 2010), que compreende todos os materiais inorgânicos, não metálicos, obtidos após tratamento térmico em altas temperaturas (ABDI, 2016), sendo considerado um grande consumidor de energia térmica em sua cadeia produtiva (ISHIDA, 2018).

No Brasil, este setor é composto por 7.400 empresas que representa 4,8% da indústria da construção civil e geram mais de 300mil postos de trabalho direto (ANICER, 2018). Os principais produtos são: blocos/tijolos (metade da produção), telhas e tubos (ISHIDA, 2018).

A cadeia produtiva do setor de cerâmica vermelha pode ser dividida em 4 categorias de empresas: relacionadas à mineração, envolvidas no processo de produção, de distribuição de produtos e responsáveis pelas vendas (ABDI, 2016), como pode se observado na Figura 1.

Figura 1 – Cadeia produtiva da cerâmica vermelha



Fonte: ABDI, 2016.

Os combustíveis mais utilizados são a lenha e o resíduo de madeira, tais como: cavaco, serragem, briquetes e outros resíduos (MME, 2018). Segundo o Balanço energético Nacional (BEN, 2018), o consumo de energia do setor em 2017 foi de 4.280.000 tep (tonelada equivalente de petróleo) que representa 1,7% do consumo energético total do País.

### 2.1.1 Processo de fabricação

A argila é a principal matéria-prima utilizada na fabricação de uma série de produtos cerâmicos, devido apresentar plasticidade, resistência mecânica após a sinterização, possibilidade de processamento simples e disponibilidade em grandes quantidades (VIERA, 2000). O seu processo de fabricação, independente do sistema utilizado, parte de uma mistura de argila, conhecida como massa cerâmica que sofre diversas transformações físico-químicas até alcançar as propriedades requeridas pelo produto acabado (TUBINO, 2006).

A primeira etapa para a produção é a extração da argila que ocorre em céu aberto, preferencialmente nos meses de menor precipitação, podendo ser realizada manualmente ou mecanizada (FIEMG/FEAM, 2013).

Depois disto, a argila é estocada nas empresas, onde ficam no processo de sazonalidade até o início da preparação da massa. Esta é constituída a partir da composição de duas ou mais matérias primas, além de aditivos e água, que são dosados seguindo o rigor das formulações pré-estabelecidas (CNI, 2010). Em seguida são misturadas, moídas, homogeneizadas com água e laminadas (TUBINO, 2006; FIEMG/FEAM, 2013).

Figura 2 – Macro etapas do processo de produção de cerâmica vermelha



Fonte: ISHIDA, 2018

Depois, a massa é transportada por esteiras para uma extrusora, onde sai um produto contínuo que será cortado. As peças úmidas passam então pelo secador, diminuindo sua umidade, para após serem gradativamente queimadas no forno (ISHIDA, 2018). A estrutura ampla do processo produtivo pode ser resumida na Figura 2, que sempre segue a mesma ordem, com exceção na fabricação de telhas prensadas, na qual é inserida a etapa de prensagem.

De uma forma geral, os revestimentos cerâmicos são resistentes à água, ou seja, não se degradam facilmente com intempéries naturais e são resistentes a altas temperaturas reduzindo o risco de expansão do fogo em caso de acidentes; não liberam compostos orgânicos voláteis à temperatura ambiente ou substâncias tóxicas quando expostos a altas temperaturas (GABALDÓN-ESTEVAN, 2014). Além disso, estão sendo incorporados às massas cerâmicas diversos tipos de resíduo, bem como o uso de resíduos da cerâmica para fabricação de produtos da construção civil, tais como avaliados pelos autores: Adazabra (2017); Eliche-Quesada (2016); Silva (2017); Cremades (2018); Gayarre (2017); Mymrin (2017); Khan (2016), Morete (2006) entre outros.

### *2.2.1.1 Sinterização*

Segundo o Instituto Nacional de Tecnologia – INT (2013), a sinterização ou queima é a principal etapa do processo produtivo em termos energéticos, pois envolve 95% de toda energia térmica demandada pela empresa e os 5% restantes referem-se ao processo de secagem para as empresas que a utilizam.

O processo de sinterização é responsável por uma série de transformações físico-químicas das peças como: perda de massa, desenvolvimento de novas fases cristalinas, formação de fase vítrea e a soldagem dos grãos (FIEMG, 2013). Essas transformações são provocadas em várias etapas do ciclo de queima, onde acontece várias reações como as descritas a seguir (NAVARRO, 1998):

- Até 150 °C: eliminação da água livre não eliminada totalmente na secagem;
- 150- 250 °C: elimina-se a água coloidal;
- De 350 a 650 °C: eliminação da água estrutural;
- De 400 a 600 °C: decomposição de compostos orgânicos;
- 573 °C: rápida transformação do quartzo  $\alpha$  em quartzo  $\beta$ ;
- 700- 900 °C: início da fusão dos álcalis e óxidos de ferro;
- 1000 °C: Início da fusão dos CaO e FeO, com formação de silicatos;
- Até 1200 °C: Formação da fase vítrea com redução de tamanho de poros.

Além disso, o ciclo de sinterização compreende três fases, dependendo do tipo de produto e da tecnologia empregada, e pode variar de algumas horas até vários dias, conforme pode ser observado na Figura 3. (FIEMG, 2013).

Este processo deve ser conduzido obedecendo-se à chamada curva de queima (Figura 3), que descreve a evolução da temperatura das peças cerâmicas com o tempo. No geral, a temperatura de queima é da ordem de 750 a 900 °C para tijolos, de 900 a 950 °C para telhas e de 950 a 1200 °C para tubos cerâmicos (CNI, 2013). O esquite representa o aquecimento das peças até a temperatura de sinterização e a velocidade de aquecimento nesse período é essencial para a qualidade do produto final e pode variar de acordo com o forno e/ou matéria prima utilizada.

Figura 3 – Curva de queima teórica



Fonte: FIEMG, 2013

Através da taxa de aquecimento em °C/min, pode-se classificar a queima como rápida ou lenta, vai depender do tipo de material e forno utilizado. Segundo Dutra (2007), não há uma definição para queima rápida, pois depende da análise de cada processo. Entretanto, isto deve ser avaliado, pois a velocidade escolhida pode afetar a qualidade do produto (DUTRA, 2007; SALEIRO, 2012; GUIMARÃES, 2017).

Carretero (2012) considerou como ciclo lento a taxa de 2 °C/min e ciclo rápido a taxa de 13 °C/min. Enquanto SALEIRO et al (2012) e Dutra (2007) utilizaram em seu estudo como queima lenta a taxa de 1 °C/min e como rápida, 10 e/ou 20 °C/min. Já Guimarães (2017) adotou 2 °C para queima lenta e na rápida utilizou 15 e 30 °C/min.

Dutra (2007) concluiu que massas cerâmicas com elevados teores de matéria orgânica e óxido ferro demonstraram maior tendência de apresentar defeito como “coração negro”, mas isto não influenciou as propriedades físicas e mecânicas do material. Para Guimarães (2007) a taxa de aquecimento não influenciou testes como absorção de água e a retração linear, entretanto o aumento de temperatura influenciou a resistência mecânica das

amostras. Para Saleiro et al (2012) o uso de ciclos de queima rápida não causa modificações significativas na microestrutura e na porosidade das peças de cerâmica vermelha.

A escolha da velocidade de queima na empresa vai depender do tipo de forno e das características das argilas utilizadas. Em alguns tipos de forno como Abóboda e Hoffman a taxa de aquecimento utilizada é a lenta com 0,8 °C/min, já em fornos artesanais como Caipira e Caeira, a taxa utilizada é a rápida, pois todo o processo dura aproximadamente 12 h, sem utilizar patamar.

### **2.3 Siderurgia e seus resíduos**

O setor metalúrgico apresenta expressiva importância no cenário econômico brasileiro. Com vasta cadeia produtiva dos segmentos ligados à metalurgia, usinagem e produção de manufaturados metálicos, ele é classificado na seção C – Indústria de Transformação Divisão 24, segundo a CNAE (Classificação de atividades econômicas – IBGE).

Somente o setor siderúrgico na fabricação do ferro-gusa no Brasil produziu quase 30.000 Mt em 2016, contando usinas integradas e produtores independentes (MME, 2017). As empresas voltadas à produção de ferro-gusa comportam uma divisão entre siderúrgicas integradas, onde o agente termoreductor é o coque, e siderúrgicas independentes, onde se emprega carvão vegetal como agente termoreductor (SILVA, 2007).

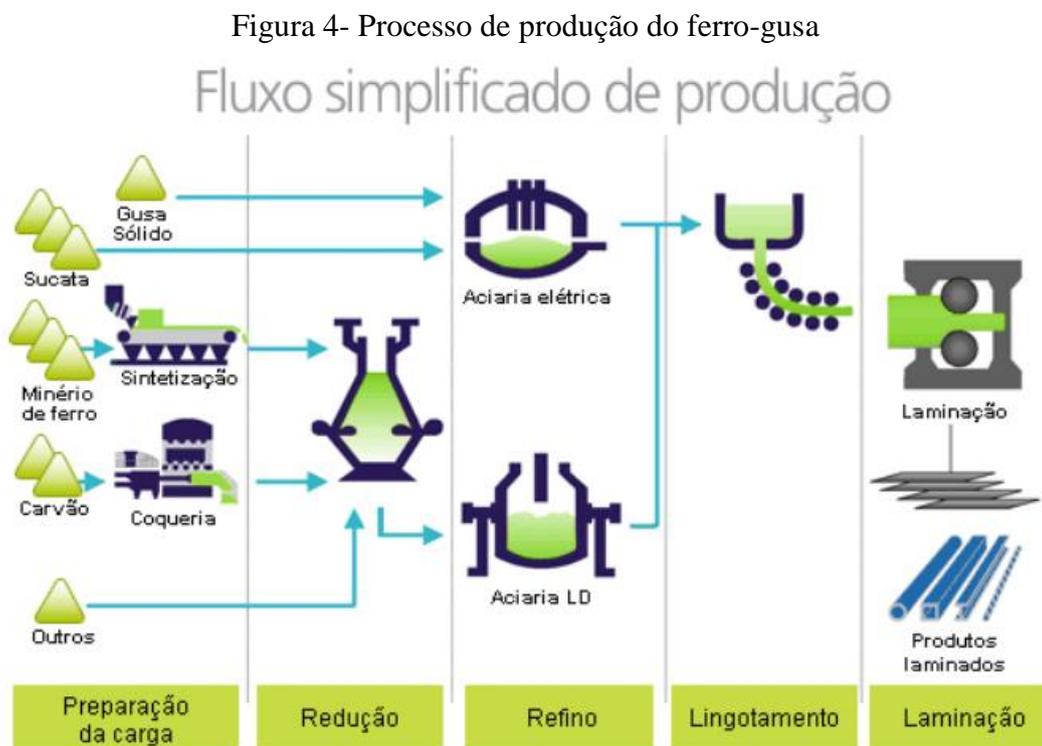
As empresas siderúrgicas apresentam grande potencial poluidor, sendo elas as principais responsáveis pelos problemas de poluição ambiental gerados nas regiões em que atuam. Vários fatores têm contribuído para agravar esta situação, tais como o aumento nos níveis de produção e o esgotamento das áreas de destinação final de rejeitos (ALMEIDA, 2001).

Para a fabricação do ferro-gusa são necessárias matérias primas básicas: o minério de ferro e o carvão, além de fundentes (quartzo, calcário e dolomita) e sucata (MALARD, 2009). O carvão exerce duplo papel na fabricação do aço. Como combustível, permite alcançar altas temperaturas (cerca de 1500 °C) necessária para a fusão do minério, e como redutor, associa-se ao oxigênio que se desprende do minério com a alta temperatura, deixando livre o ferro. (ACOBRAIL, 2019).

A composição do ferro-gusa é de aproximadamente 94% de ferro, 4% de carbono e outros elementos como silício, manganês, fosforo e enxofre (JACOMINO et al,

2002). Sua fabricação (Figura 4) pode ser dividida em quatro etapas (ACOBRASIL, 2019):

- Preparação da carga - Grande parte do minério de ferro (finos) é aglomerada utilizando-se cal e finos de coque. O produto resultante é chamado de sinter;
- Redução – O sinter é carregado no alto-forno, onde é soprado oxigênio a 1000 °C. O carvão entra em contato com o oxigênio e produz o monóxido de carbono (CO), que é o agente redutor do processo de produção do ferro gusa;
- Refino – As aciarias a oxigênio ou elétricas são utilizadas para transformar o ferro-gusa líquido em sólido;
- Laminação - Os produtos semiacabados, lingotes e blocos são processados por equipamentos chamados laminadores e transformados em uma grande variedade de produtos siderúrgicos, cuja nomenclatura depende de sua forma e/ou composição química.



Fonte: ACOBRASIL, 2019

O alto-forno (Redução) é o principal equipamento utilizado e consiste essencialmente, na redução dos óxidos de minérios de ferro mediante o emprego de um termoredutor (Malard, 2009). Os principais resíduos sólidos (Tabela 1) resultantes do processo de produção de ferro-gusa são (ALMEIDA, 2001):

- Escória do alto-forno;
- Finos de minério de ferro;
- Finos de carvão vegetal (moinha);
- Pó do sistema de limpeza a seco dos gases (pó de coletor);
- Lama do sistema de limpeza a úmido dos gases (lama de alto-forno)

Segundo Marland (2009), a escória de alto-forno representa 37% do resíduo gerado na fabricação, enquanto os finos de minério de ferro - 32%, finos de carvão vegetal - 21%, pó de balão - 7% e lama de alto-forno - 3%.

Diversos estudos foram realizados para utilização de resíduos da siderurgia: Mussacato (2005) estudou o uso da escoria de alto forno no concreto e Galán-Arboledas (2017) seu uso em materiais de construção cerâmico; Oliveira (2017) analisou o reaproveitamento da lama de siderurgia em indústria cerâmica, Silva (2007) fez uma avaliação ambiental do pó de coletor no setor agrícola e Mymrin (2017) usou a escoria de aço, dentro outras matérias para compósitos cerâmicos. Todos eles constataram resultados satisfatórios em suas pesquisas.

Tabela 1- Geração específica de resíduos sólidos industriais

<b>Resíduo</b>	<b>Unidade</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Médio</b>	<b>Máximo</b>
Escoria de alto-forno	kg/ton Gusa	40	133	225
Finos de minério de ferro	kg/ton Gusa	33	115	380
Finos de carvão vegetal	kg/ton Gusa	30	76	120
Pó de Balão/Lama	kg/ton Gusa	10	35	80

Fonte: Adaptado de Malard (2009)

Segundo Almeida (2001), os resíduos de pó de coletor e lama de alto-forno podem ser incorporados à massa da cerâmica para auxiliar na coloração dos tijolos, devido à quantidade existente de óxidos de ferro nos resíduos, e contribuir com um ganho energético de até 50 % no processo. Como a temperatura na fabricação dos produtos cerâmicos varia de 750 a 900 °C é provável que a utilização destes resíduos seja viável, podendo ser mais uma alternativa de aplicação.

### **3. METODOLOGIA**

O procedimento experimental foi desenvolvido em três etapas, a saber: caracterização das argilas e resíduo; definição da formulação da massa cerâmica; preparação dos corpos de prova e execução dos ensaios nas temperaturas determinadas (800, 850 e 900 °C).

#### **3.1 Caracterização dos materiais (argila e resíduo)**

Foram selecionadas as argilas extraídas de um estoque com sazonalidade de aproximadamente um ano em uma empresa de cerâmica vermelha da Região Metropolitana de Fortaleza – CE. Dois tipos de argilas foram coletados, uma com aparência de alta plasticidade e outra de baixa plasticidade. Essas argilas são utilizadas na fabricação de blocos cerâmicos em dosagem de 1:1, ou seja, 50% da argila plástica e 50% da argila não plástica.

O resíduo utilizado para o teste foi coletado em uma empresa de Siderurgia, também na região metropolitana de Fortaleza-CE, derivado do processo de redução do ferro no alto forno, coletado pelo Ciclone acoplado ao mesmo.

##### ***3.1.1 Análise por Fluorescência de Raios X***

A fluorescência foi utilizada para verificar a composição química das argilas e do resíduo com o objetivo de identificar os elementos presentes nas amostras e verificar a proporção de cada um desses elementos. Esse ensaio foi realizado no Laboratório da CSP (Companhia Siderúrgica do Pecém), através da Espectrofotometria de Emissão por Plasma (ICP-OES), para determinar o teor dos óxidos de sódio ( $Na_2O$ ) e de potássio ( $K_2O$ ), e da Espectrofotometria de Fluorescência de Raios X (XRF). Foi utilizado também o espectrômetro de marca Rigaku e modelo Simultix 14, para análises das amostras puras.

##### ***3.1.2 Difração de Raios X***

A maneira mais abrangente para determinar a mineralogia dos materiais cerâmicos é a difração de Raios de X (DRX), devido a possibilidade de identificar as

espécies minerais presentes e estudar as características cristalográficas (BARBA, 2002). A identificação desses minerais foi feita em amostras da mistura das argilas 1:1, formulação escolhida para as análises, e dos materiais depois de sinterizados a 850 °C para as amostras sem resíduo e 800 °C para as amostras com resíduos, que foram classificados por peneiramento em malha de 200 mesh. As análises foram realizadas no Laboratório de Raios X, do Departamento de Física da Universidade Federal do Ceará (UFC).

O difratrômetro utilizado foi modelo DMAXB –Rigaku gerador de Raios-X de 2 kW, com radiação de tubo de Cobalto (Co),  $\text{CoK}\alpha_1$  e  $\text{CoK}\alpha_2$ , operando a 40kV e 30mA . O intervalo  $2\theta$  utilizado foi de 5° a 90°, ao passo de 0,013° e os resultados foram analisados e tratados nos softwares X'Pert Highscore Plus e OriginPro 8.

### **3.1.3 Análise Térmica (TG e DSC)**

Segundo Dutra (2007) a análise termogravimétrica (TG) mostra alterações na massa do material durante o aquecimento que pode ter duas causas: a decomposição ou a oxidação. A Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) é um método calorimétrico no qual são medidas diferenças de energia, no qual as variações de entalpia da amostra são monitoradas com relação a um material de referência (DENARI, 2012).

A TG e a DSC foram realizadas no Laboratório de Materiais Avançados da Universidade Federal do Ceará (UFC), com o equipamento NETZSCH STA. A taxa de aquecimento foi de 10 °C/min, e fluxo de ar sintético de 50 ml/min, com faixa de temperatura de 25 – 1100 °C. Os ensaios foram realizados nos materiais nas dosagens de 0, 5, 10, 15 e 20 % de resíduos, com massa cerâmica formulada com traço de 1:1.

## **3.2 Preparação e Sinterização dos corpos de prova**

### **3.2.1 Escolha do traço**

A escolha da formulação base das argilas foi escolhida de forma experimental considerando o percentual de material não argiloso, que foi calculado através dos resíduos retido numa peneira de 325 mesh (44  $\mu\text{m}$ ) numa porção de 100 g de argila seca em estufa por 24 h e lavados com água. O resíduo retido foi seco em estufa a 100 °C durante 24 h e aplicados na equação 1 (MAIA, 2019).

O percentual do resíduo retido foi determinado pela Equação 1.

$$RB(\%) = \frac{Pr}{Pa} * 100 \quad (1)$$

Onde: RB = Percentual de resíduo bruto (%);

Pr = peso do resíduo retido na peneira após secagem (g);

Pa = peso da amostra inicial (g).

Com os resultados do percentual de resíduo para os dois tipos de argilas foram calculados o percentual de resíduo das possíveis misturas de acordo com percentual utilizado de cada argila (Equação 2), semelhante ao cálculo com incremento utilizado por Moreira (2015) para coleta das argilas misturadas.

$$RB_{mist}(\%) = (x * RB1 + y * RB2) \quad (2)$$

Onde: RB<sub>mist</sub> = Percentual de resíduo bruto da mistura (%);

x = percentual de argila plástica (%)

y = percentual de argila não plástica (%)

RB1 = Percentual de resíduo bruto médio (%), argila plástica;

RB2 = Percentual de resíduo bruto médio (%), argila não plástica;

Com esses resultados foram calculados 07 possibilidades de traço ou mistura das argilas e dentre eles foram selecionados dois para análise, nos quais foram moldados 30 corpos de provas e analisados através dos ensaios de Absorção de água (AA), Porosidade Aparente (PA) e Massa específica aparente (MEA), para a definição da massa a ser utilizada.

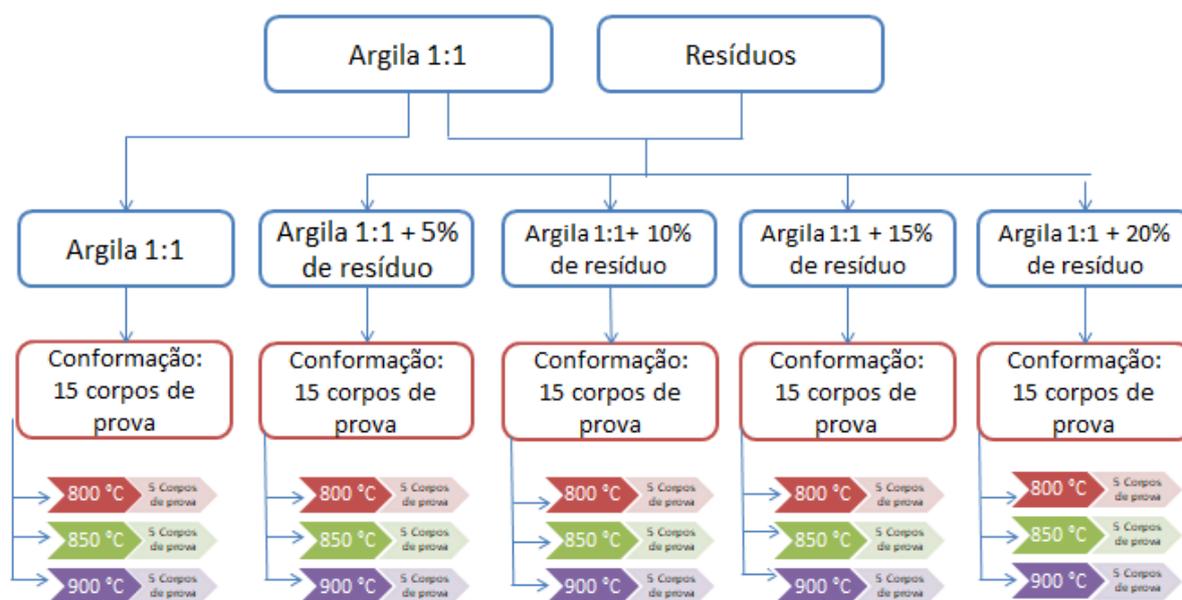
### **3.2.2 Preparação das amostras**

Com a confirmação dos valores base, os materiais foram pesados e classificados em peneiras de 80 mesh (0,18 mm). As peças foram conformadas com adição de 10% de água e um molde metálico, 115 x 25 x 14 mm. As amostras foram prensadas a 2 ton (11,6 kgf/cm<sup>2</sup>), por um período de 20 s. Em seguida, elas foram mensuradas com um paquímetro com precisão de 0,05 mm e pesadas. As peças foram secas em uma estufa de marca Medclave, por 24 h à temperatura de 100 °C. A queima foi realizada em um forno elétrico (Linn Elektro Therm), nas temperaturas de 800, 850 e 900 °C, por um período de 1 hora,

com uma taxa de aquecimento de 10 °C/min e em seguida resfriadas em temperatura ambiente. Foram utilizadas cinco amostras para cada temperatura.

Na primeira fase foram feitos 5 corpos de prova para cada temperatura e com os percentuais de 0, 5, 10, 15 e 20 % de resíduos, respectivamente (Figura 5).

Figura 5- Processo de preparação e queima dos corpos de prova com 0 %, 5 %, 10 %, 15 % e 20 % de resíduos.



Fonte: Autor

Na segunda fase, foram conformados corpos de prova para cada percentual de resíduo e sinterizados com a taxa de aquecimento de 2 °C/min (Dutra, 2007) até 800 °C e patamar de 1 hora, somente para averiguação da colocação interna apresentada nas amostras da primeira fase.

### 3.3 Ensaios Tecnológicos

Através dos ensaios tecnológicos são avaliadas as propriedades físicas e mecânicas dos produtos cerâmicos, com estes resultados são previstos a qualidade do produto acabado. O resultado final de cada ensaio foi obtido com o cálculo da média aritmética para cada percentual de resíduo de cada temperatura.

### 3.3.1 *Retração linear de queima*

A Retração linear (RL) foi calculada através da variação do comprimento (L) dos corpos de prova antes e depois da queima. Foram medidos utilizando um paquímetro com precisão de 0,05 mm e aplicados os resultados na Equação 3.

$$RL = \frac{L_s - L_q}{L_s} * 100 \quad (3)$$

Onde:  $L_s$  = comprimento do corpo de prova após a secagem, em milímetro;

$L_q$  = comprimento do corpo de prova após a queima, em milímetro.

### 3.3.2 *Perda de massa ao fogo (PF)*

Quando o material cerâmico é sinterizado, há uma perda de massa que é calculada com o peso antes e depois da queima (Equação 4). Esse cálculo foi feito para todas as amostras.

$$PF = \frac{M_s - M_q}{M_s} * 100 \quad (4)$$

Onde:  $M_s$  = massa do corpo de prova após a secagem, em gramas;

$M_q$  = massa do corpo de prova após a queima, em gramas.

### 3.3.3 *Índice de Absorção de Água (AA)*

O cálculo do índice de absorção de água (Equação 5) é realizado com a medida do peso dos corpos de prova sinterizados e após as peças ficarem submersas em água durante 24 horas. Esse procedimento é especificado na NBR 15270:2, no qual especifica como faixa de resultado admitida de 9 a 21% de absorção.

$$AA = \frac{M_u - M_q}{M_q} * 100 \quad (5)$$

Onde:  $M_q$  = massa do corpo de prova após a queima, em gramas.

$M_u$  = massa do corpo de prova úmido, após a submersão, em gramas;

### 3.3.4 Porosidade Aparente

Após a sinterização, há formação de muitos poros vazios ocasionados pela perda de massa. Para Menezes e Varela (2016) porosidade aparente é o provável percentual de poros abertos em relação ao volume total da peça que está representada na Equação 6, pelo do método de Arquimedes.

$$PA(\%) = \frac{M_u - M_q}{M_u - M_i} * 100 \quad (6)$$

Onde:  $M_u$  = massa do corpo de prova úmido, em gramas;

$M_q$  = massa do corpo de prova após a queima, em gramas.

$M_i$  = massa do corpo de prova imerso em água, em gramas.

### 3.3.5 Massa específica Aparente (MEA)

A relação entre a massa de uma amostra e a soma dos valores ocupados pelas partículas e pelos poros é conhecida como Massa Específica Aparente (Sousa, 1989; Dutra, 2007). Este cálculo é obtido pela Equação 7.

$$PA(g/cm^3) = \frac{M_q}{M_u - M_i} * 100 \quad (7)$$

Onde:  $M_u$  = massa do corpo de prova úmido, em gramas;

$M_q$  = massa do corpo de prova após a queima, em gramas.

$M_i$  = massa do corpo de prova imerso em água, em gramas.

### 3.3.6 Resistência à Flexão

O ensaio Resistência à Flexão em 3 pontos foi realizado em uma máquina universal de ensaios EMIC com célula de 5 N, usando velocidade de 10 mm/min (GARLAN-ARBOLEDAS, 2017) e a distância entre os suportes de 70 mm. O cálculo do

Módulo de Ruptura a Flexão foi calculado pela Equação 8.

$$MRF(MPa) = \frac{3CA}{20LH^2} \quad (8)$$

Onde: C = Carga atingida no momento da ruptura, em quilogramas-força;

A = Distância entre os apoios do suporte, em centímetros;

L = Largura do corpo de prova, em centímetros;

H = altura do corpo de prova, em centímetros.

### 3.4 Economia de Biomassa

A influência no consumo da biomassa no processo de sinterização foi estimada através da economia de energia ocasionada pela redução de temperatura de sinterização. A sinterização foi realizada no forno elétrico de marca Elektro e modelo Linn Elektro Therm, cuja potência é de 7,5kW. A taxa de aquecimento foi de 10 °C/min e 1h de patamar na temperatura programada.

O consumo de energia foi calculado através da equação (9), de acordo com a termodinâmica básica.

$$Q_t = Pot * T \quad (9)$$

Onde  $Q_t$  representa a quantidade calor consumida (kJ) na temperatura de patamar, Pot a Potência da mufla e  $T$  o tempo gasto para aquecer as peças da temperatura ambiente (28°C) à temperatura desejada.

A redução de energia ( $Q_e$ ) foi calculada pela subtração da energia consumida na temperatura de referência a 800 °C e a temperatura sugerida. Com esse resultado foi calculado o quanto isto resultaria em biomassa, caso este forno usasse lenha como fonte energética, equação (10).

$$E_l = \frac{Q_e}{PCI_{lenha}} \quad (10)$$

$E_l$  é economia estimada em lenha e o poder calorífico inferior (PCI) utilizado foi de 3.274 kcal/kg para lenha de caatinga com umidade em torno de 20% (BRAND, 2016). Como foi utilizada a diferença de energia fornecida entre as duas temperaturas, não houve a necessidade de considerar perdas de energia do forno. Entretanto, sabe-se que as perdas de calor, em fornos de cerâmica a lenha, podem chegar a 60% através dos gases de exaustão dependendo do tipo de forno (INT/MCTI, 2013).

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

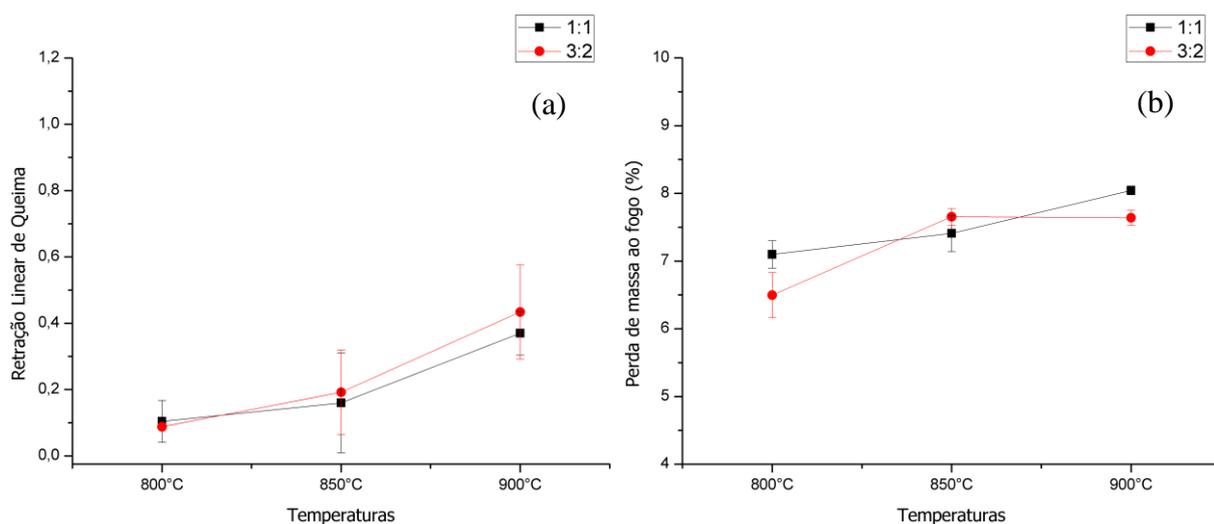
### 4.1 Escolha do traço

Com os resultados obtidos de resíduo bruto dos dois tipos de argila foram calculados o percentual de resíduo bruto de cada um dos traços 1:1, 2:1, 3:1, 3:2, 5:2, 7:2 e 7:3 e com isso foram escolhidos de forma experimental os dois que apresentaram os maiores percentuais de resíduo para ser feito os ensaios tecnológicos. Assim, os demais ensaios foram realizados para os traços de 1:1 e 3:2, que apresentaram valores de 32,45 % e 28,58 % de resíduo bruto, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2- Resultados do resíduo para varias possíveis misturas.

Traço (Fo:Fr)	Rbmist (%)
<b>50 % (1:1)</b>	<b>32,45</b>
<b>60 % (3:2)</b>	<b>28,58</b>
66,7 % (2:1)	25,99
70 % (7:3)	24,71
71,4 % (5:2)	24,17
75 % (3:1)	22,78
77,8 % (7:2)	21,70

Gráfico 2 – Retração linear de queima (a) e Perda de massa ao fogo (b) das amostras de traços 1:1 e 3:2



De acordo com o Gráfico 2 – (a) e (b), pode-se dizer que ao aumentar a temperatura de sinterização, causa um aumento na retração linear de queima para ambos os traços. Desta

forma uma menor temperatura de sinterização é mais desejável, pois haverá uma menor probabilidade de formarem trincas, além de conferir uma melhor estabilidade dimensional e economia de combustível na queima.

No que se refere a absorção de água (Gráfico 3.a), todas as amostras ficaram dentro das tolerâncias (8 % a 25%) estabelecidas pela norma NBR 15270: Tijolos Cerâmicos para Alvenaria Estrutural e de Vedação. Quanto a Porosidade aparente (Gráfico 3.b) e a Massa específica (Gráfico 4.a), não apresentaram, de acordo com o teste de Tukey diferenças significantes nas suas médias. Na resistência a flexão (Gráfico 4.b), os melhores resultados foram apresentados na temperatura de 850 °C.

Gráfico 3 – Absorção de água (a) e Porosidade aparente (b) das amostras de traços 1:1 e 3:2

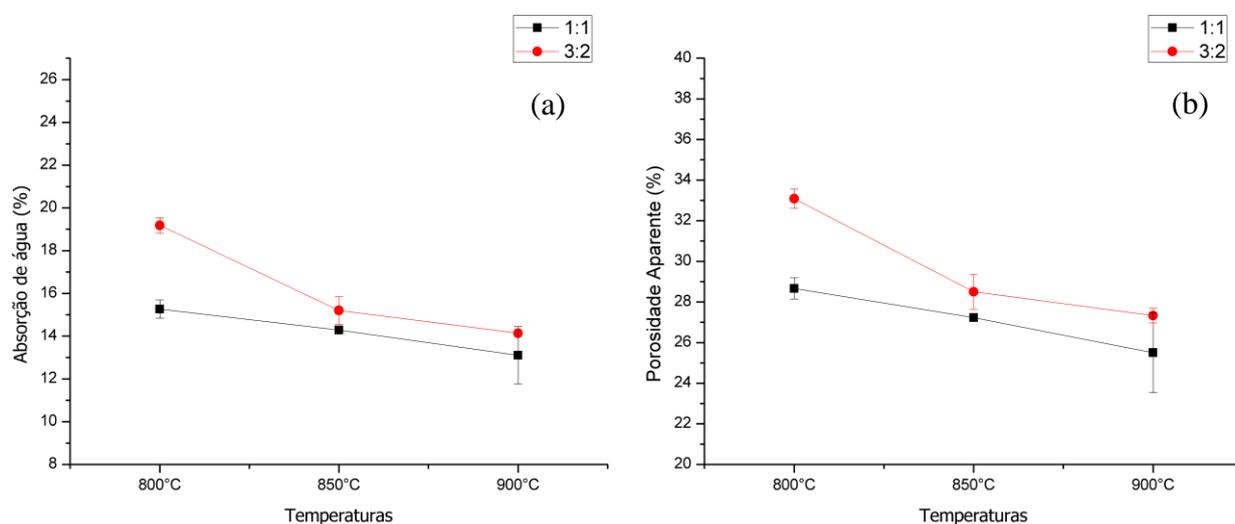
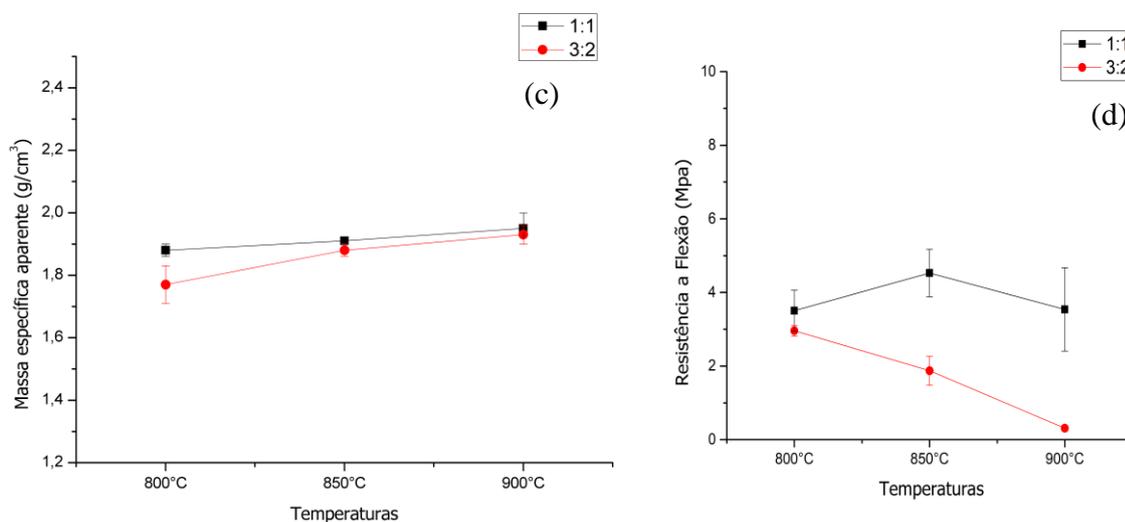


Gráfico 4 – Massa específica aparente (a) e Resistência a flexão (d) das amostras de traços 1:1 e 3:2



Assim, de acordo com o teste ANOVA, o melhor traço foi o de 1:1, sinterizado a 850 °C, pois não apresentou diferenças significantes entre as temperaturas de 850 e 900 °C, e tendo uma menor retração linear de queima, baixa porosidade aparente, baixa absorção de água, maior massa específica aparente e maior resistência à flexão quando comparadas a 800 °C.

## 4.2 Caracterização dos materiais

A caracterização das argilas e do resíduo foi realizada através da Fluorescência de Raios X (FRX), Difração de Raios X (DRX) e Análise Termogravimétrica (ATG), como estão descritas a seguir.

### 4.2.1 Análise de Fluorescência de Raio X (FRX)

Os resultados da FRX mostram os elementos químicos presentes na amostra, bem como sua concentração, assim apresentado na Tabela 3.

Tabela 3- Resultados da Análise de Fluorescência de Raio X (FRX).

Material	ICP (%)				XRF (%)					
	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	T-Fe	MgO	CaO	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO
Resíduo Siderúrgico	0,46	0,53	6,94	22,08	37,79	0,58	4,70	0,13	0,10	0,22
Argila Não Plástica	2,25	1,57	61,92	17,00	3,74	1,29	1,34	1,09	0,10	0,08
Argila Plástica	1,53	0,99	52,73	19,31	5,11	3,28	1,94	1,41	0,08	0,09

Fonte: Dados fornecidos pelo laboratório da Companhia Siderúrgica do Pecém.

De acordo com os resultados, as argilas são caracterizadas com alto teor de óxido de silício (SiO<sub>2</sub>), óxido de alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) e óxidos ferro, identificado como teor de Ferro (T-Fe), conforme encontrado na literatura (VIEIRA *et al.*, 2007; PRADO, 2011). Percebe-se também que o teor de óxido de silício se destaca com relação a argila plástica, diferente do óxido de alumínio e ferro, que apresentam menores valores.

Os óxidos de silício e de alumínio, presentes na argila plástica e não plástica, podem indicar a presença dos argilominerais caulinita, esmectita ou haloisita, mas também

podem ser atribuídos à presença de quartzo e feldspato. Além disso, há as presenças de óxidos de sódio ( $\text{Na}_2\text{O}$ ), potássio ( $\text{K}_2\text{O}$ ), cálcio ( $\text{CaO}$ ) e magnésio ( $\text{MgO}$ ), que são considerados óxidos fundentes (GARLAN-ARBOLEDAS, 2017; ACEVEDO *et al.*, 2017).

Por outro lado, o resíduo se destaca com alto teor Fe (37,79%),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (22,08), devido ao material ser derivado da produção do aço, e quantidades significativas de óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ), com 4,70 %, e silício ( $\text{SiO}_2$ ), com 6,94 %. Assim, com o uso do resíduo, espera-se que haja aumento nos teores de ferro e cálcio.

#### 4.2.2 Análise da Difração de Raios X

Neste ensaio foram identificados somente os minerais presentes, ou seja, com maior número de fases, conforme estão exibidos nos gráficos seguintes. Os materiais analisados foram cru as misturas de argilas 1:1 e o resíduo cru, e queimado os corpos de prova 1:1 puro e com os percentuais de 5, 10, 15 e 20% de resíduo. A amostra crua foi queimada a 850 °C, pois é a sua temperatura de referência, e a 800 °C nas demais amostras.

Gráfico 5 - Difratoograma das argilas 1:1 sem queima

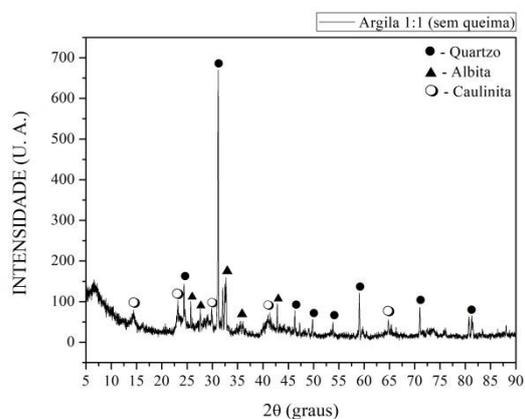


Gráfico 6 - Difratoograma das argilas 1:1 com queima à 850 °C

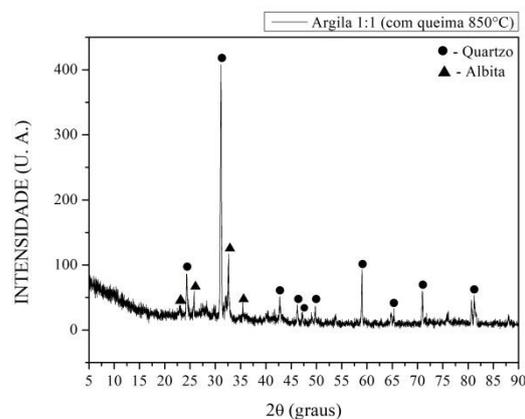
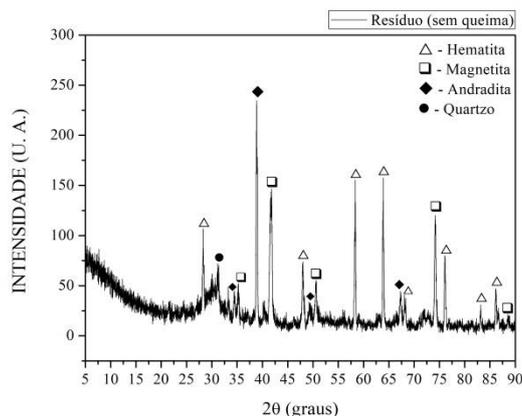


Gráfico 7 - Difratoograma do resíduo



É apresentado no Gráfico 5 e 6 as argilas pura e queimada, e é possível observar que na pura se destacam o quartzo, a albita, mineral do grupo do feldspato, e a caulinita. Da mesma forma é observado no material sinterizado que apresentou também o quartzo e a albita, entretanto não aparece a caulinita, isto porque ocorre inicia reações a 500°C que resultam no desaparecimento desse argilomineral (SANTOS, 1989). No resíduo (Gráfico 7) foi identificada a hematita e a magnetita, que possuem ferro em sua fórmula molecular, coerente com os resultados da fluorescência que mostram altos teores de ferro. Além destes, estão presentes o quartzo e a andradita, um silicato que apresenta cálcio e ferro na composição, elementos que foram também identificados na composição química.

Gráfico 8 - Difratoograma das argilas 1:1 com 5% de resíduo com queima à 800 °C. Gráfico 9 - Difratoograma das argilas 1:1 com 10% de resíduo com queima à 800 °C.

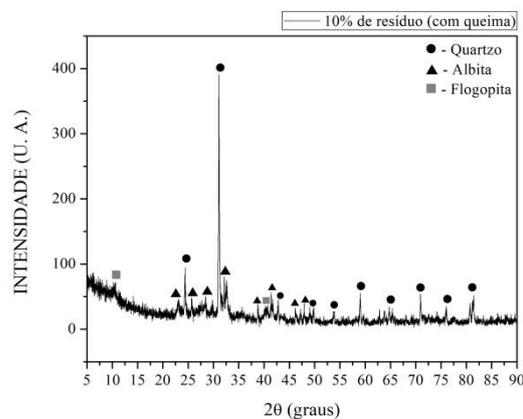
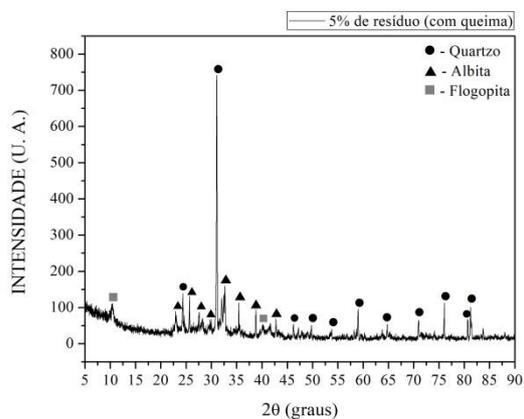
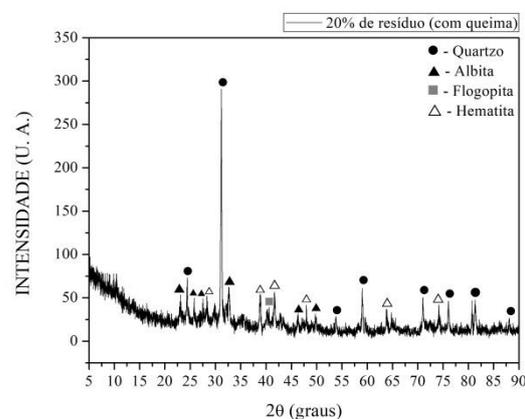
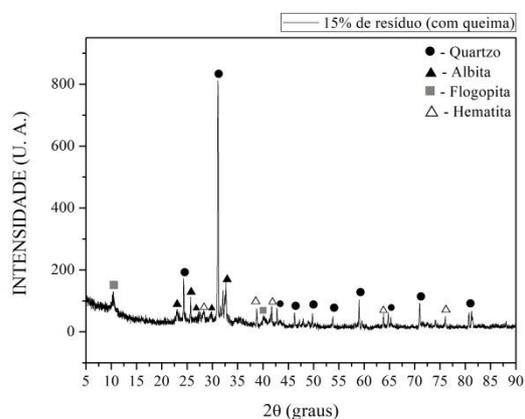


Gráfico 10 - Difratoograma das argilas 1:1 com 15% de resíduo com queima à 800 °C. Gráfico 11 - Difratoograma das argilas 1:1 com 20% de resíduo com queima à 800 °C.

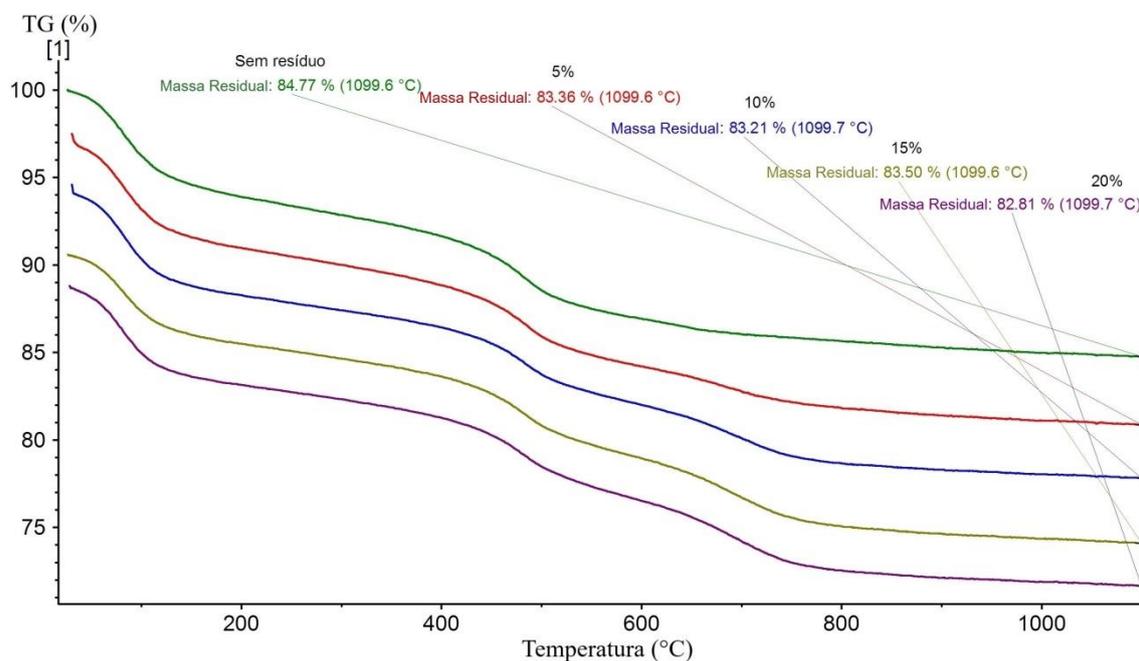


Nos difratogramas das amostras com resíduo (Gráfico 8 e 9), percebeu-se que nos percentuais de 5 e 10%, foram identificados o quartzo e a albita, os mesmos minerais identificados no corpos de prova sem resíduo, e além destes a flogopita, um filosilicato da família da mica que possui na sua composição o Potássio (K) e o magnésio (Mg). Nas composições de 15 e 20 % (Gráficos 10 e 11), além desses três, aparece a hematita, fase mais abundante no resíduo, isto deve ser resultado do aumento desse material na mistura.

#### 4.2.3 Análise Térmica (TG e DSC)

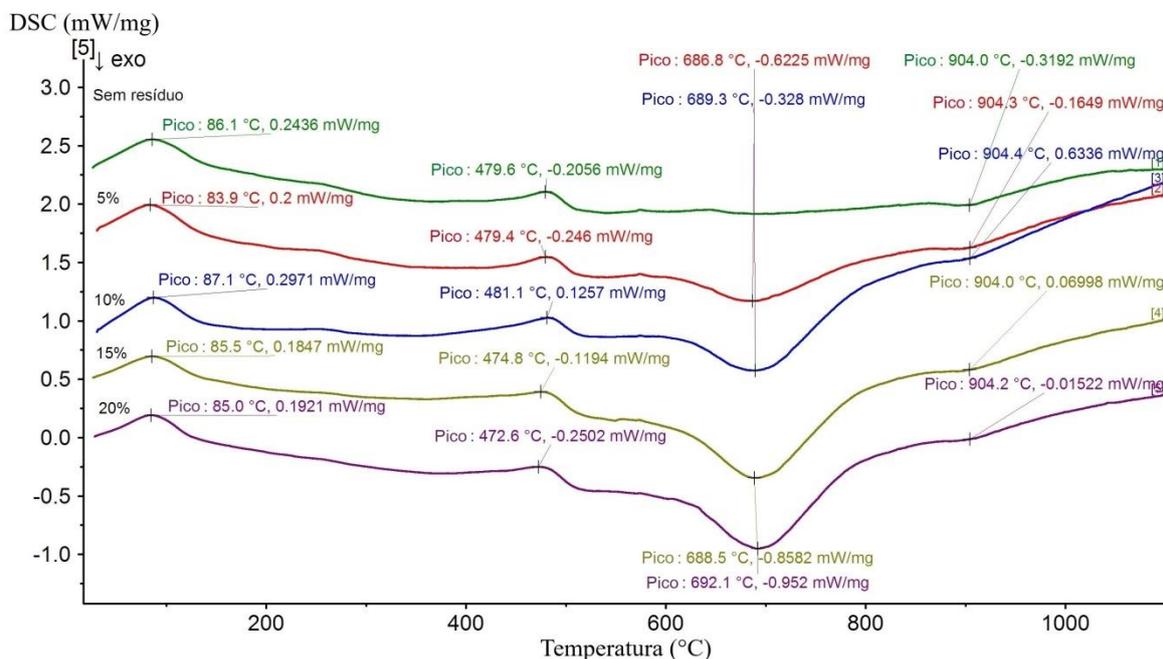
A análise térmica é muito utilizada na complementação dos ensaios de caracterização (DUTRA, 2007) e útil para verificar as perdas de massas dos materiais através dos picos endotérmicos e exotérmicos, na TG, e entalpia, na DSC. Nos Gráficos 12 e 13, são apresentados os resultados dessas duas análises feitas para a mistura de argilas 1:1 com e sem resíduos.

Gráfico 12 – Análise Termogravimétrica (TG) das amostras com 0, 5, 10, 15 e 20 % de resíduo.



No Gráfico 12, pode-se observar a comportamento térmico de amostras com 0, 5, 10, 15 e 20 % de resíduo, variando na faixa de 23 °C à 1.100 °C. Ao final deste, é expresso a perda total de massa do material, no qual apresentou aumento gradativo ao aumentar o percentual de resíduo, exceto em 10 % que apresenta perda menor que a amostra com 5 %. Esse aumento na perda de massa pode estar relacionado com as interações entre o resíduo e argila quando há o aumento de temperatura ou a queima dos finos de coque, semelhante aos resultados do estudo sobre resíduos de alto forno de Viera et al (2007).

Gráfico 13 – Análise DSC das amostras com 0, 5, 10, 15 e 20 % de resíduo.



No Gráfico 13, na faixa de temperatura de 600 a 800 °C percebe-se um pico exotérmico que não ocorre na amostra sem resíduo, isto indica que se trata de uma reação ocasionada pelo uso do resíduo. Segundo Vieira et al (2007), isto pode estar relacionado a reação à combustão finos de coque.

No caso do pico endotérmico que ocorre entre 470 e 480 °C, ele é observado em todos os materiais, então é provável que esteja relacionado à desidroxilação (perda de OH) da caulinita, que costuma ocorrer entre 300 °C e 550 °C (SANTOS, 1989; RAMOS *et al.*, 2019).

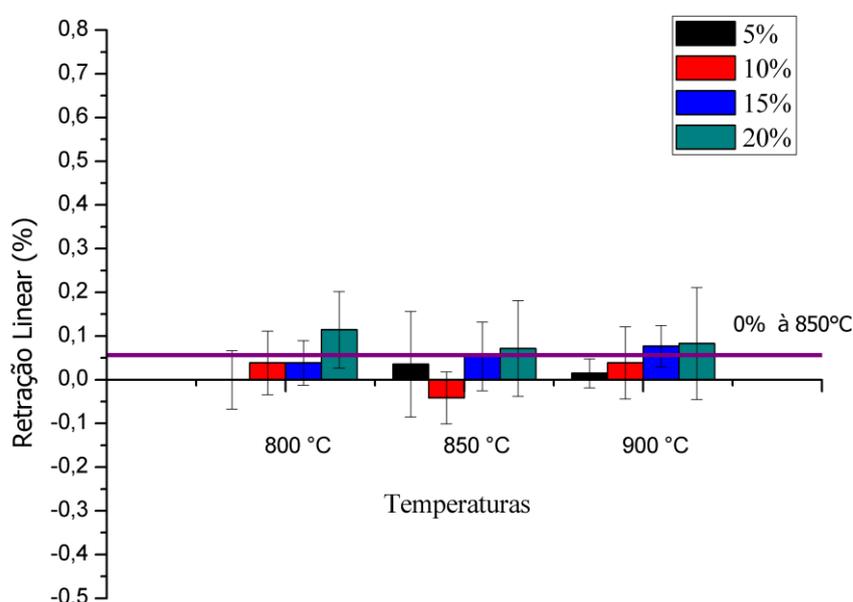
#### 4.3 Qualidade dos corpos de prova

Um dos maiores diferenciais competitivos das organizações é a qualidade do produto, que é usado tanto para fidelizar clientes quanto para dar credibilidade à empresa. No caso de produtos cerâmicos a qualidade é medida através de variáveis como: dimensionamento das peças, que é diretamente ligada à retração do material; resistência à flexão; absorção de água; perdas de massa; porosidade e densidade aparente.

### 4.3.1 Retração linear de queima

No Gráfico 14 são apresentados os resultados da retração linear de queima (RLq) nas 3 temperaturas (800, 850 e 900 °C) utilizadas. As amostras obtiveram aumento na retração com o aumento de temperatura e isto pode ser percebido na faixa de 800 a 900 °C. Entretanto, em valores médios e desvio padrão, nas amostras com percentual de 20% apresentaram maior retração na temperatura de 800 °C.

Gráfico 14 – Retração Linear das amostras em 3 temperaturas, com 0, 5, 10, 15 e 20% de resíduo



De uma forma geral, o comportamento foi similar entre elas, com variação menor que 0,2% entre as amostras. Todas as médias ficaram em torno de 0%, tendo em alguns casos apresentado valores negativos. Isto pode ser causado pelo erro de precisão do paquímetro (0,05 mm) ou pela posição medida na peça. Isto é vantajoso, pois maiores retrações podem desestabilizar podendo causar rupturas ou trincas no interior da peça (ACOSTA, 2002, LORYUENYONG, 2009).

Devido à proximidade dos valores, para as amostras sem resíduo a 850 °C e com resíduo a 800 °C, através da análise estatística feita pelo teste de variância ANOVA (Tabela 3), foram calculadas: as médias, desvio padrão, diferença nas médias e o grau de significância. Com esses resultados percebeu-se que não houve diferenças significativas

entre as médias das amostras dessas duas temperaturas.

Tabela 4- Resultados médios da retração linear e da análise de variância e

Percentual de resíduos	Temperatura	Média	Desvio Padrão	Indexador	Diferença na média	Significância (Sig)*
0	850 °C	0,06	0,158			
5	800 °C	0,00	0,067	5 - 0	-0,056	0
10	800 °C	0,04	0,073	10 - 0	-0,018	0
15	800 °C	0,04	0,051	15 - 0	-0,018	0
20	800 °C	0,11	0,088	20 - 0	0,058	0

\* sig igual a 1 indica que a diferença de médias é significativa no nível 0,5

sig igual a 0 indica que a diferença de médias não é significativa no nível 0,5

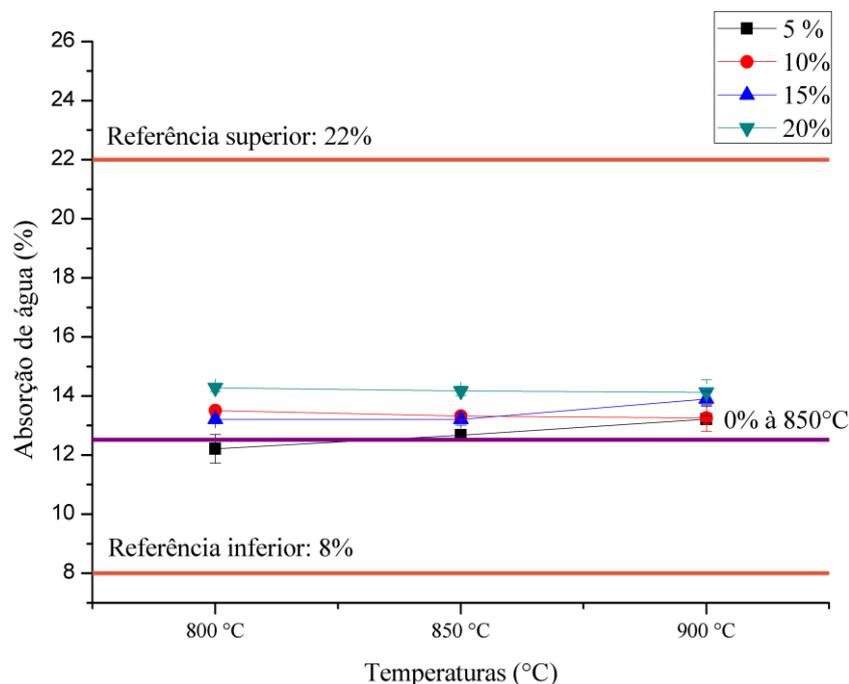
Todavia, também foram analisados os corpos de prova com resíduos todos juntos, independente de temperatura e percentual de adição, que segundo o teste de Tukey, através da significância, não apresentaram diferenças significantes indicando que não houve alteração na retração ao adicionar estes resíduos nestas proporções, semelhante aos resultados obtidos por Vieira (2009), ao adicionar chamote na massa cerâmica.

#### 4.3.2 Teste de absorção de água

De acordo com Guimarães (2017), a capacidade que um determinado material possui de aumentar sua massa absorvendo a água que o envolve é chamada de absorção de água. Além disso, uma menor absorção indica durabilidade e resistência dos blocos com relação aos desgastes ambientais (AHMADI, 2018). Além disso representa um fator chave na indicação de porosidade do tijolo, onde um leve aumento na porosidade pode proporcionar características de isolante térmico (BARBIERE, 2013).

A faixa permitida pela ABNT – NBR 15270 para blocos de vedação varia de 8 a 22% de absorção de água, em vista disso pode-se perceber no Gráfico 15 que todos os resultados podem ser considerados como aceitos pela norma. Entretanto, o comportamento variou nas diferentes temperaturas. Os corpos de prova com 10% apresentaram redução na absorção de água com o aumento da temperatura, enquanto que os demais apresentaram um aumento menor que 0,6%.

Gráfico 15 – Absorção de água para as temperaturas de 800, 850 e 900°C com adição de 0, 10, 15 e 20% de resíduos.



Quando foi realizado o teste de Tukey pela ANOVA para avaliar a significância das diferenças entre os resultados nas 3 temperaturas para cada percentual de resíduo, percebeu-se que os resultados de 5 e 15% apresentaram menores resultados em 800 °C e os de 10 e 20% não tiveram diferenças significantes entre suas médias nas 3 temperaturas, ou seja, não houve aumento ou redução na absorção de água com relação à temperatura nestes.

Devido a isto, foi comparado os resultados desses corpos de prova à 800 °C com os corpos de prova de referência à 850 °C, também através do teste de Tukey, conforme mostrado na tabela 4. De acordo com esta tabela, percebeu-se que apesar das médias serem diferentes, não houve diferenças das amostras de 5, 10 e 15 % quando comparadas as amostras sem resíduo, provavelmente isto aconteceu devido ao desvio padrão dos corpos de prova de referência estar acima dos demais. Os corpos de prova com 20% de resíduo apresentaram diferenças significantes quando comparados as de referência.

Tabela 5 – Resultados médios da Absorção de água e teste de Tukey.

Percentual	Temperatura	Média	Desvio Padrão	Indexador	Diferença na média	Significância (Sig)*
0	850 °C	12,52	1,812			
5	800 °C	12,21	0,487	5 - 0	-0,308	0
10	800 °C	13,51	0,083	10 - 0	0,991	0
15	800 °C	13,21	0,100	15 - 0	0,689	0
20	800 °C	14,28	0,130	20 - 0	1,759	1

\* sig igual a 1 indica que a diferença de médias é significativa no nível 0,5

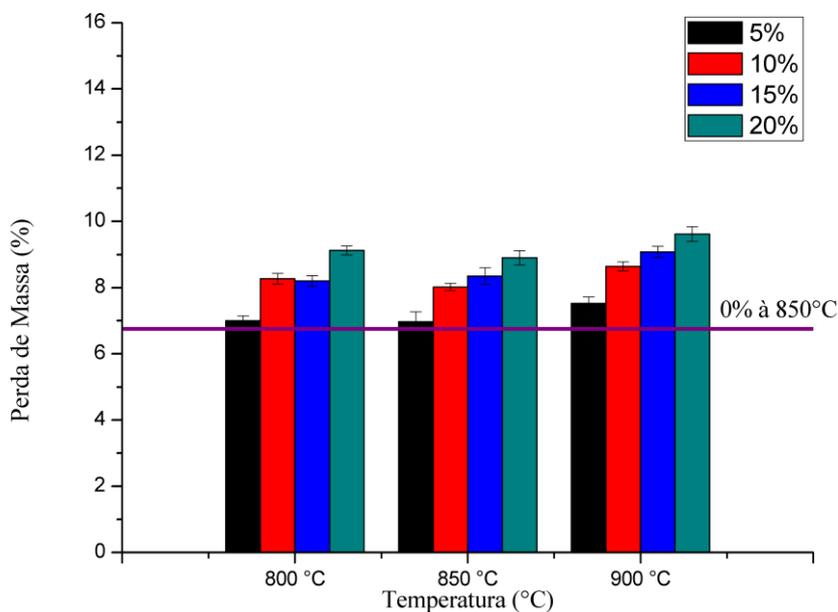
sig igual a 0 indica que a diferença de médias não é significativa no nível 0,5

### 4.3.3 Perda de Massa ao fogo

Os resultados obtidos com os cálculos para perda de massa ao fogo (PF) estão apresentados no Gráfico 16, no qual pode-se observar que ao aumentar o percentual de resíduos incorporados e a temperatura aumentaram as perdas, no qual confirma os resultados obtidos na TG, descrito anteriormente, que mostra aumento na perda de massa ao aumentar os resíduos. Entretanto no gráfico da TG houve variação na amostra de 10 % que apresentou perda um pouco menor que a de 5 %, o que não aconteceu nas amostras do corpo de prova, que no caso, era de se esperar perda maior de massa.

Além disso, vale salientar que, ao aumentar as perdas de massa com a adição dos resíduos, espera-se aumento na porosidade, que por sua vez pode afetar a absorção de água. Entretanto, essas alterações não foram significativas, tanto que os resultados da absorção de água permaneceram dentro da faixa estabelecida pela ABNT NBR 15270-3 (2017).

Gráfico 16 - Perda de Massa dos corpos de prova em 3 temperaturas variando o percentual de resíduos em 0, 5, 10, 15 e 20%.



Apesar dos resultados serem maiores que a referência nas três temperaturas, foi analisado o comparativo das médias, teste de Tukey, nas amostras com resíduo à 800 °C e sem resíduo a 850 °C, conforme feito nos demais ensaios. E, como pode-se observar na Tabela 5, apenas o percentual de 5% de adição de resíduo não apresentou diferenças significantes entre as médias.

Tabela 6 – Resultados médios da Perda de massa e teste de Tukey.

Percentual	Temperatura	Média	Desvio Padrão	Indexador	Diferença na média	Significância (Sig)*
0	850 °C	6,76	0,617			
5	800 °C	7,01	0,143	5 - 0	0,248	0
10	800 °C	8,28	0,162	10 - 0	1,517	1
15	800 °C	8,20	0,161	15 - 0	1,444	1
20	800 °C	9,12	0,133	20 - 0	2,365	1

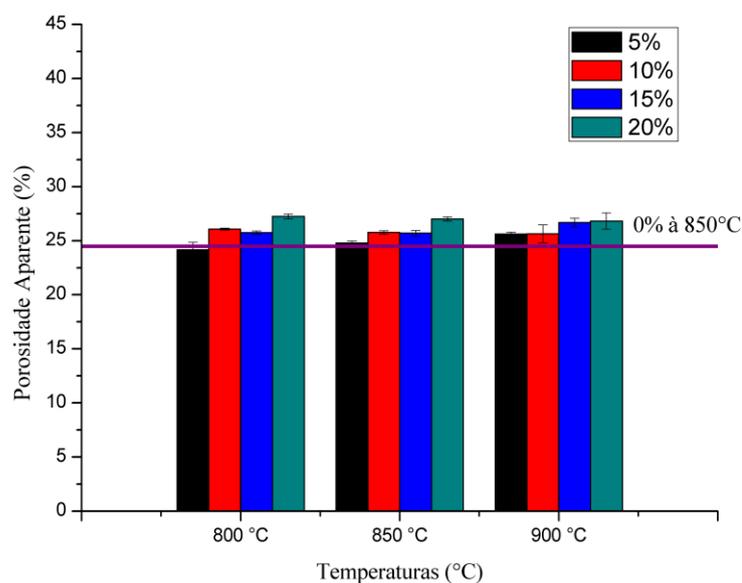
\* sig igual a 1 indica que a diferença de médias é significativa no nível 0,5  
sig igual a 0 indica que a diferença de médias não é significativa no nível 0,5

#### 4.3.4 Porosidade Aparente

Considerando o percentual de resíduo na massa cerâmica (Gráfico 17), quanto maior foi a sua inserção maior foram os resultados da porosidade, de forma similar ao que aconteceu com as perdas de massa, sinalizando uma ligação direta entre as duas.

Além disso, os resultados obtidos da porosidade foram avaliados nas 3 temperaturas de queima, para os 4 percentuais utilizados de resíduo (5, 10, 15 e 20 %), utilizando o teste de Tukey para comparação de diferenças significantes das médias.

Gráfico 17 - Porosidade Aparente dos corpos de prova com adição de resíduos variando de 0% a 20%, nas temperaturas de 800, 850 e 900°C.



De acordo com o Gráfico 4 e o teste de Tukey, não houve aumento significativo nas médias na porosidade ao aumentar a temperaturas nas amostras de 10 e 20%, já nas amostras de 5 e 15%, apresentaram aumento na temperatura de 900 °C e sem diferenças significantes nas temperaturas de 800 e 850 °C. Dessa forma, pode-se considerar que a temperatura de 800 °C, apresentou menores resultados de porosidade para os 4 percentuais usados.

Tabela 7 – Resultados médios da Porosidade Aparente e teste de Tukey.

Percentual	Temperatura	Média	Desvio Padrão	Indexador	Diferença na média	Significância (Sig)*
0	850 °C	24,49	2,923			
5	800 °C	24,17	0,705	5 - 0	-0,324	0
10	800 °C	26,07	0,084	10 - 0	1,585	0
15	800 °C	25,76	0,152	15 - 0	1,268	0
20	800 °C	27,24	0,224	20 - 0	2,748	1

\* sig igual a 1 indica que a diferença de médias é significativa no nível 0,5

sig igual a 0 indica que a diferença de médias não é significativa no nível 0,5

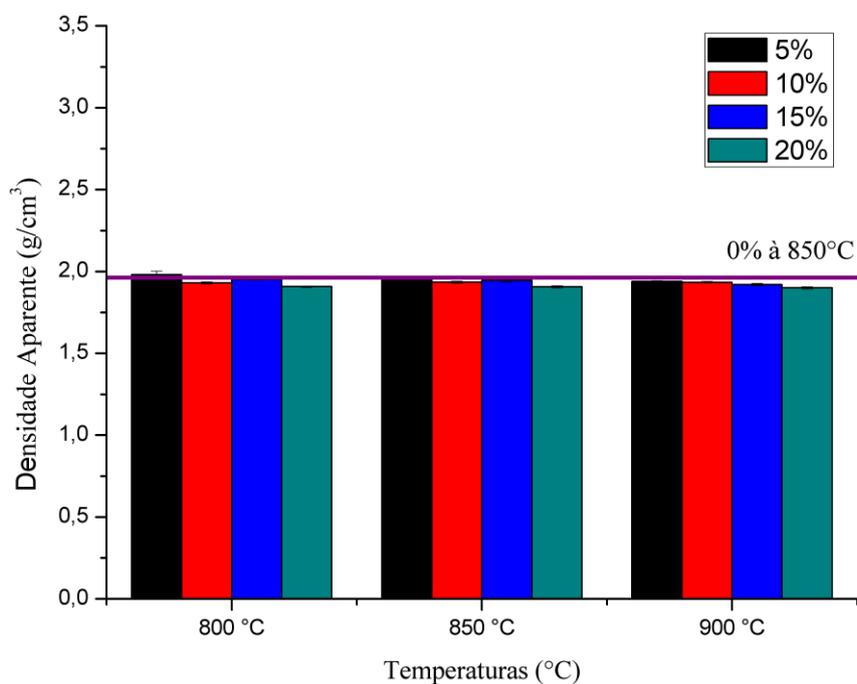
Analisando, com o teste de Tukey, as médias obtidas na temperatura de 800 °C com resíduos e as de referência à 850 °C, sem resíduo (Tabela 5), pode-se observar que na coluna do cálculo da significância entre as médias, apenas apresentaram diferenças nas amostras de 20 %, tendo as demais os seus valores similares aos de referência

#### 4.3.5 Densidade Aparente

A porosidade e densidade aparente estão diretamente ligadas e são inversamente proporcionais, quanto maior a porosidade aparente, menor será sua densidade. Assim, quanto menor a porosidade, maior a resistência (CREMADES, 2018).

De acordo com análise dos resultados da densidade aparente (Gráfico 18), percebeu-se que os dados seguiram o mesmo perfil identificado na porosidade aparente que apresentaram maior densidade média em 800°C com, 1,98, 1,93, 1,95 e 1,91 g/cm<sup>3</sup> para 5, 10, 15 e 20 %, respectivamente, no entanto em 10%, não houve diferença significativa, segundo o teste de Tukey, entre suas médias nas 3 temperaturas. Esses valores refletem o comportamento semelhantes aos das amostras realizada por Cremades (2018) em sua pesquisa.

Gráfico 18 – Densidade aparente dos corpos de prova com adição de resíduos variando de 0% a 20%, nas temperaturas de 800, 850 e 900°C.



Vale ressaltar que houve um decréscimo da densidade com o aumento do resíduo fundente, exceto com o valor médio de 10 % que apresentou média um pouco abaixo quando comparado ao percentual de 15 % de resíduo. Nas amostras sem resíduo, a densidade média de referência a 850 °C foi 1,96 g/cm<sup>3</sup>, sendo inferior a amostra de 5 % e bastante próxima das demais. De acordo com teste Tukey, não houve diferenças significantes entre as amostra sem resíduo de referência e com resíduos variando de 5 a 15 %, entretanto houve diferenças com as amostras de 20%.

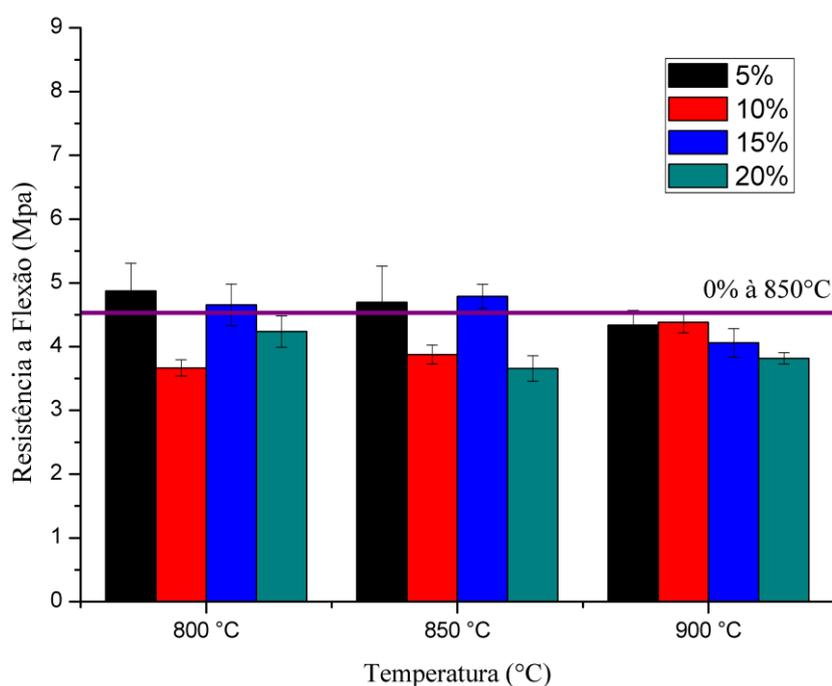
Tabela 8 – Resultados médios da Densidade Aparente e teste de Tukey.

Percentual	Temperatura	Média	Desvio Padrão	Indexador	Diferença na média	Significância (Sig)*
0	850 °C	1,96	0,049			
5	800 °C	1,98	0,023	5 - 0	0,018	0
10	800 °C	1,93	0,006	10 - 0	-0,032	0
15	800 °C	1,95	0,003	15 - 0	-0,012	0
20	800 °C	1,91	0,003	20 - 0	-0,054	1

### 4.3.6 Resistência à Flexão

De acordo com os dados do Gráfico 19, é possível perceber que os maiores resultados foram obtidos a 800 °C nas amostras de 5, 15 e 20 %, nas amostras de 10% o maior valor a 900 °C, o que era de se esperar, uma vez que também a esta temperatura, no ensaio de absorção de água, essas amostras apresentaram menor absorção e, no de porosidade, apresentou menor porosidade quando comparada nas 3 temperaturas.

Gráfico 19 – Resistência à flexão dos corpos de prova com adição de resíduos variando de 0% a 20%, nas temperaturas de 800, 850 e 900°C.

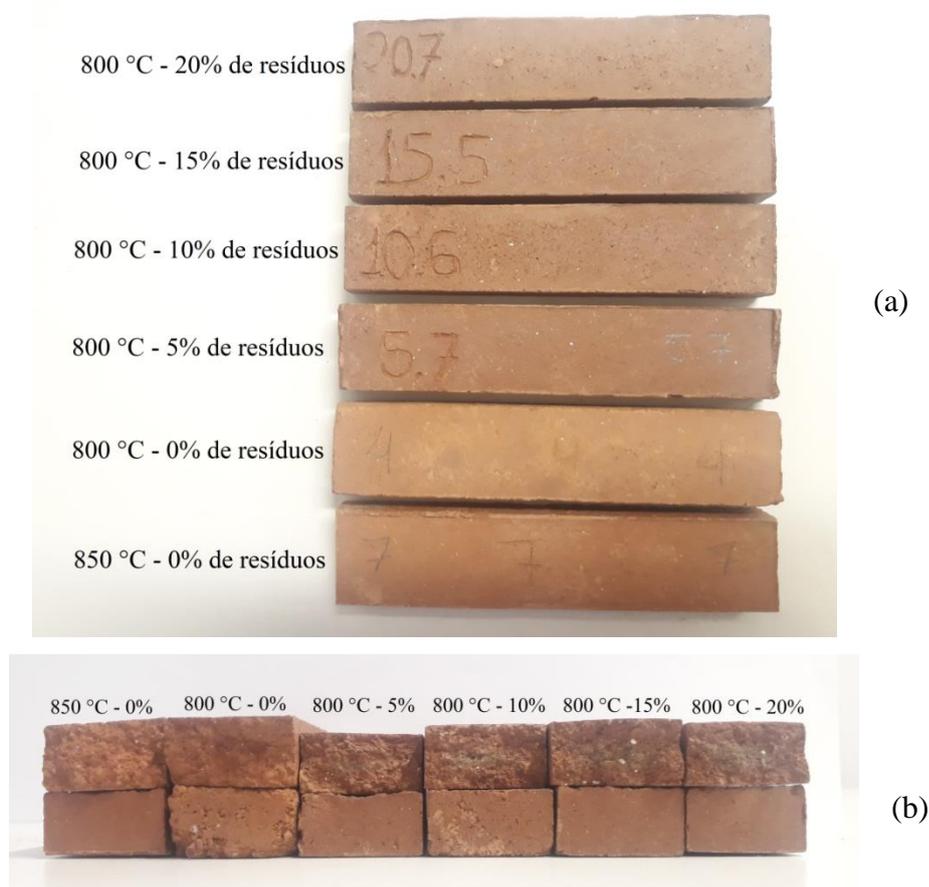


Apesar da variação dos resultados, as amostras de 5 e 15 % apresentaram valores maiores que a argila de referência sinterizada a 850 °C. Além disso, as amostras de 5, 15 e 20 % apresentaram seus maiores valores em 800 °C que estão acima de 4 Mpa (Tabela 8), valor considerado aceito por Dondi (2003) em seu estudo de interpretação da caracterização tecnológica de matérias cerâmicos. Para as amostras de 10 %, seu resultado mais alto foi a temperatura de 900 °C, no qual apresentou valor de 4,38 Mpa.

Tabela 9 – Resultados médios da Resistência à flexão e teste de Tukey.

Percentual	Temperatura	Média	Desvio Padrão	Indexador	Diferença na média	Significância (Sig)*
0	850 °C	4,53	0,644			
5	800 °C	4,87	0,431	5 - 0	0,342	0
10	800 °C	3,67	0,129	10 - 0	-0,865	1
15	800 °C	4,65	0,328	15 - 0	0,125	0
20	800 °C	4,24	0,247	20 - 0	-0,295	0

Figura 6 – Corpos de Prova nas temperaturas com maiores resistências a flexão.



Em vista dos resultados obtidos à 800 °C, foi calculado, através do Teste de Tukey, se houve diferenças significantes entre as médias das amostras em relação a média de referência (Tabela 7). Com isto, não houve diferenças significantes entre os resultados obtidos de 5, 15 e 20% e a amostra sem resíduo, exceto com média de 10 %.

Entretanto, após o rompimento das peças, percebeu-se que na parte central dos corpos de prova com resíduo foi observada uma coloração escura (Figura 6. b). Isto pode ter

vido ocasionado pela possível prisão do gás carbônico (CO<sub>2</sub>) gerado pela redução do ferro devido ao óxido de cálcio. Como foi utilizado queima rápida na sinterização (10 °C/min) foram feitos outros corpos de prova que foram sinterizados com taxa de sinterização menor, de 2 °C/min. Nestes, houve redução na coloração escura e não houve alteração significativa na resistência à flexão.

#### 4.4 Economia de Biomassa

De acordo com os ensaios tecnológicos, como: porosidade aparente, densidade aparente, absorção de água e retração linear, os corpos de prova com resíduos apresentou melhores resultados na temperatura de 800 °C, ou seja, 50 °C menor que a temperatura de queima ideal para esta mistura somente com argila.

Dessa forma foi calculado o quanto de energia foi reduzida ao diminuir a temperatura de queima de 850 °C para 800 °C. O forno utilizado como referência, foi uma mufla à energia elétrica com potência 12 kW. O consumo de energia estimado está apresentado na Tabela 10.

Tabela 10- Energia consumida e reduzida para o uso de biomassa.

	Unidade	Temperaturas		Economia
		850 °C	800 °C	
Tempo usado	min	82,2	77,2	5,0
Energia Consumida (Q)	MJ	59,18	55,58	3,6
Biomassa (lenha)	kg	4,32	4,05	0,26

Conforme é observado na Tabela 10, houve uma redução de 5 min no tempo de queima, isto porque a taxa de aquecimento do forno foi de 10 °C/min, assim diminuindo a temperatura consequentemente houve redução no tempo de aquecimento. Essa redução afetou o consumo de energia, que foi estimado em MJ.

Ao consideramos que essa energia poderia ter sido fornecida através da lenha, estima-se um consumo na ordem de 4,05 a 4,32 kg desta biomassa, e sua redução seria de 0,26 kg de lenha por fornada, no qual este valor representa cerca de 6 % de economia de energia.

Assim, pode-se dizer que da mesma forma que houve economia em um forno elétrico, provavelmente isto acontecerá em fornos de fonte de biomassa, dessa forma foi estimado a economia de lenha que pode ser gerada anualmente nos diferentes tipos de fornos, conforme apresentado na Tabela 11.

Tabela 11- Consumo e economia de lenha por forno.

Fornos	Consumo de lenha* (m <sup>3</sup> /milheiro)	Consumo de lenha (m <sup>3</sup> /fornada**)	Economia de lenha estimada	
			m <sup>3</sup> /Fornada	m <sup>3</sup> /ano
Abóboda	1,3	39	2,34	842,4
Hoffmann	0,8	24	1,44	518,4
Túnel	0,6	18	1,08	388,8
Caipira	0,85	25,5	1,53	550,8

\* Fonte: INT, 2013

\*\* Consumo médio por fornada de 30milheiros

Baseado nos valores estimados de economia por tipo de forno (Tabela 11) percebe-se maiores ganhos nos fornos Abóboda e Hoffmann. No forno Caipira, por mais que tenha economia estimada relevante, é um forno que é não possível acompanhar a temperatura de queima, assim pode ser difícil obter ganhos nele.

## 5. CONCLUSÃO

O uso de Pó de ciclone em produtos cerâmicos, em específico blocos de vedação, apresentou resultados promissores. De acordo com a caracterização dos materiais, percebeu-se que as argilas utilizadas possuem teores de 52 e 61 % para o  $\text{SiO}_2$  e para o  $\text{Al}_2\text{O}_3$  apresentou 17 a 19 %, que são compatíveis com a bibliografia encontrada, indicando a presença de argilominerais. Já o resíduo apresentou teores de Ferro (T-Fe) de 37 % elevando assim esse valor nas amostras cerâmicas.

Com os resultados da análise termogravimétrica foi observado o aumento na perda de massa do material ao aumentar os percentuais de resíduos incorporados, o que afetou no aumento da porosidade aparente e redução na massa específica, entretanto a variação no percentual de absorção de água não passou de 2 % em relação às amostras sem resíduo, além disso, em todas as temperaturas utilizadas, as amostras permaneceram dentro da faixa permitida pela ABNT – NBR 15270 para blocos de vedação.

A temperatura utilizada como referência para o material sem resíduo foi de 850 °C, entretanto, as amostras com resíduo apresentaram resultados semelhantes 800 °C, essa redução representou economia estimada 6,1 % de biomassa, calculado através da redução de energia consumida nesta temperatura. De acordo com a estimativa de consumo de lenha de alguns tipos de fornos, os do tipo Abóboda, Hoffmann, Túnel e Caipira apresentaram resultados relevantes, no entanto o forno Caipira não é viável para uso do resíduo, pois sua estrutura não permite controle de temperatura.

Além disto, não há problemas de qualidade na queima em outras temperaturas, caso haja variação nos termopares do forno, já que os valores de resistência à flexão apresentaram valores superior a 4 Mpa nas amostras de 5, 15 e 20 %. No caso, da amostra 10% pode ter havido falha na homogeneização das amostras, ocasionando valores menores apenas à 800 °C.

Dessa forma, o uso desse resíduo se mostrou viável, tanto pelos aspectos físicos e tecnológicos quanto financeiros, mas é importante destacar que para a implementação dessa opção é necessário que a empresa possua estrutura organizada para armazenamento do resíduo, equipamentos eficientes para uma boa homogeneização e fornos com termopares para controle de temperatura. Teste prévio, nas empresas, também se faz necessário, pois a eficiência do forno pode afetar o consumo de combustível.

## REFERÊNCIAS

ABDI - Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial. Estudos - Estudo Técnico Setorial da Cerâmica Vermelha. Brasília, 2016

ACEVEDO *et al.* Mineralogical characterization of natural clays from Brazilian Southeast region for industrial applications. *Cerâmica*, n. 63. 2017.

ACOSTA, Anselmo et al. Utilisation of IGCC slag and clay steriles in soft mud bricks (by pressing) for use in building bricks manufacturing. *Waste management*, v. 22, n. 8, p. 887-891, 2002.

ADAZABRA, A. N.; VIRUTHAGIRI, G.; SHANMUGAM, N. Management of spent shea waste: An instrumental characterization and valorization in clay bricks construction. *Waste Management*, v. 64, p. 286-304, 2017.

AHMADI, Pedram Farnood, et al. Characteristics of heat insulating clay bricks made from zeolite, waste steel slag and expanded perlite. *Ceramics International*, 2018, 44.7: 7588-7598.

ALMEIDA, Marys Lene Braga, et al. Alternativas de usos e aplicações dos resíduos sólidos das indústrias independentes de produção de ferro-gusa do estado de Minas Gerais. In: *Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 21ª Feira Internacional de Tecnologias de Saneamento Ambiental*, 4. ABES, 2001. p. 1-13.

ANICER - Associação Nacional da Indústria Cerâmica. (s.d.). Dados do Setor. Fonte: Site da ANICER - Associação Nacional da Indústria Cerâmica: <http://anicer.com.br/setor/>

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15270-2: Componentes cerâmicos - blocos e tijolos para alvenaria. Parte 2: Métodos de ensaios. 2017.

BARBA, Antonio. Materias primas para la fabricación de soportes de baldosas cerámicas. *Instituto de Tecnología Cerámica*, 2002.

BARBIERI, Luisa et al. Management of agricultural biomass wastes: Preliminary study on characterization and valorisation in clay matrix bricks. **Waste Management**, v. 33, n. 11, p. 2307-2315, 2013.

BRAND, Martha Andreia et al. *Estocagem de biomassa florestal da caatinga para melhoria da qualidade energética da madeira*. *Ciência Rural*, v. 46, n. 7, p. 1178-1184, 2016.

CABRAL JUNIOR, Marsis, et al. "RMIs: argila para cerâmica vermelha." CETEM/MCTI, 2008.

CAMARA et al. Uso da Biomassa para a Geração de Energia. 10.13140/RG.2.2.29341.51687. 2016

CARRETERO, M. I., et al. The influence of shaping and firing technology on ceramic properties of calcareous and non-calcareous illitic–chloritic clays. *Applied Clay Science*, 2002, 20.6: 301-306.

CNI – Confederação Nacional da Indústria. (2010). Oportunidades de Eficiência Energética para a Indústria: Relatório Setorial: Setor Cerâmico. Brasília.

CREMADES, L. V.; CUSIDÓ, J. A.; ARTEAGA, F. Recycling of sludge from drinking water treatment as ceramic material for the manufacture of tiles. *Journal of cleaner production*, 2018, 201: 1071-1080.

DA SILVA, André Cantareli; MÉXAS, Mirian Picinini; QUELHAS, Osvaldo Luiz Gonçalves. Restrictive factors in implementation of clean technologies in red ceramic industries. *Journal of cleaner production*, 2017, 168: 441-451.

DENARI, Gabriela Bueno; CAVALHEIRO, E. T. G. Princípios e aplicações de análise térmica. São Carlos: IQSC, 2012.

DONDI, Michele. Technological characterisation of clay materials: experimental methods and data interpretation. *International Ceramics Journal*. October. 55-59. 2007.

DUTRA, Ricardo Peixoto Suassuna. "Efeito da velocidade de aquecimento nas propriedades de produtos da cerâmica estrutural." – Natal [RN] 2007. Tese de Doutorado – Universidade Federal do Rio Grande do Norte . Programa de Pós graduação em ciências e engenharia de materiais.

ELICHE-QUESADA, D.; LEITE-COSTA, J. Use of bottom ash from olive pomace combustion in the production of eco-friendly fired clay bricks. **Waste management**, v. 48, p. 323-333, 2016.

EMPRESA, DE PESQUISA ENERGÉTICA. Balanço energético nacional 2016: ano base 2018. *Ministério de Minas e Energia (MME)*, Rio de Janeiro, 2019.

FEAM – Fundação Estadual de Meio Ambiente. Plano de Ação para Adequação: Minas

Gerais. Minas Gerais: FEAM, 2012.

FIEMG/FEAM. Guias Técnicos Ambientais - Guia Técnico Ambiental da Indústria de Cerâmica Vermelha. Fonte: Site da FEAM - Fundação Estadual do Meio Ambiente: 2013

GABALDÓN-ESTEVAN, Daniel; CRIADO, Emilio; MONFORT, Eliseo. The green factor in European manufacturing: a case study of the Spanish ceramic tile industry. *Journal of Cleaner Production*, 2014, 70: 242-250.

GALÁN-ARBOLEDAS, Rosendo J., et al. Energy, environmental and technical assessment for the incorporation of EAF stainless steel slag in ceramic building materials. *Journal of cleaner production*, 2017, 142: 1778-1788.

GAYARRE, Fernando López, et al. Use of recycled mixed aggregates in floor blocks manufacturing. *Journal of cleaner production*, 2017, 167: 713-722.

GUIMARÃES, C. A. de Oliveira. avaliação do ciclo de queima nas propriedades tecnológicas de cerâmica vermelha. Dissertação - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Programa de Pós Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais. 2017.

INT/MCTI. Manual de Eficiência Energética na Indústria de Cerâmica Vermelha / Maurício Francisco Henriques Junior et al. – Rio de Janeiro: INT/MCTI, 2013. 28 p.

ISHIDA, Heitor Kazuhito; VALENTE, Ana Carla Ferreira. Análise da eficiência energética em segmentos industriais selecionados. Pesquisa/Produto/Trabalho executado com recursos provenientes do Acordo de Empréstimo nº 8.095-BR, formalizado entre a República Federativa do Brasil e o Banco Internacional para Reconstrução e Desenvolvimento. 2018.

JACOMINO, Vanusa Maria Feliciano, et al. Controle ambiental das indústrias de produção de ferro-gusa em altos fornos a carvão vegetal. Segrac, 2002.

KHAN, Mohammad Saleem, et al. Industrial ceramic waste in Pakistan, valuable material for possible applications. *Journal of cleaner production*, 2016, 139: 1520-1528.

LORYUENYONG, Vorrada et al. Effects of recycled glass substitution on the physical and mechanical properties of clay bricks. **Waste Management**, v. 29, n. 10, p. 2717-2721, 2009.

MAIA, F. A. M. ; QUEIROGA, A. F. F. ; RANGEL, N. V. P. ; RIOS, M. A. S. . Análise da qualidade de misturas de argilas para a indústria de cerâmica vermelha. In: *I Congresso*

*Internacional de Meio Ambiente e Sociedade e III Congresso Internacional da Diversidade do Semiárido*, 2019, Campina Grande. I Congresso Internacional de Meio Ambiente e Sociedade e III Congresso Internacional da Diversidade do Semiárido, 2019.

MALARD, Antonio Augusto Melo. Avaliação ambiental do setor de siderurgia não integrada a carvão vegetal do Estado de Minas Gerais. Dissertação - Universidade Federal de Ouro Preto. Programa de Pós-Graduação em Sustentabilidade Sócioeconômica e Ambiental. 2009.

MASCHIO, S., et al. Fast firing of tiles containing paper mill sludge, glass cullet and clay. *Waste management*, 2009, 29.11: 2880-2885.

MENEZES, J. N.; VARELA, D.L.V.; VARELA, M.L., Avaliação da porosidade aparente e absorção de água da massa cerâmica para porcelanato em função da incorporação de resíduo de caulim. 60º Congresso Brasileiro de Cerâmica. São Paulo, 2016.

MME - Ministério das Minas e Energia. Anuário estatístico: setor metalúrgico. Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral. Brasília, 2017.

MME - Ministério de Minas e Energia. (2018). Anuário Estatístico do Setor de Transformação de Não Metálicos. Fonte: Site do MME - Ministério de Minas e Energia: <http://www.mme.gov.br/documents/1138775/1732813/ANU%C3%81RIO+N%C3%83O-METALICOS+2018+21.08.2018.pdf/62490d76-b923-4592-98a7-10e2bd98279b>

MOREIRA, Marcos Aurélio Marcelino. Caracterização tecnológica das argilas aluvionares da Região Metropolitana de Fortaleza. 2015.

MORETE, Gustavo Figueiredo; PARANHOS, R. P. R.; HOLANDA, J. N. F. Avaliação de algumas propriedades físico-mecânicas de corpos cerâmicos incorporados com resíduo de escória de soldagem. *Revista Matéria*, 2006, 11.3: 232-237.

MYMRIN, Vsévolod, et al. Environmentally clean ceramics from printed circuit board sludge, red mud of bauxite treatment and steel slag. *Journal of cleaner production*, 2017, 164: 831-839.

NANDI, V. S., et al. The use of ceramic sludge and recycled glass to obtain engobes for manufacturing ceramic tiles. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 86: 461-470.

NAVARRO, F. J. L., et al. Depuración de los gases de combustión em la industria cerâmica. *Instituto de Tecnología Cerámica-AICE*: Castellón, Spain, 1998.

OLIVEIRA, F. R.; SILVEIRA, C. S.; ASSIS, P. S. Análise da Lama de Alto-Forno como Insumo em Siderúrgicas e Cerâmicas. *Revista Eletrônica de Materiais e Processos*, 2017, 12.1.

PÉREZ, C. A. S., et al. Caracterização de massas cerâmicas utilizadas na indústria de cerâmica vermelha em São Domingos do Sul-RS. *Cerâmica Industrial*, 2010, 15.1: 38-43.

PISSATO, E.; SOARES, L. Caracterização de Resíduos Finos de uma Mineração de Areia no Município de Guarulhos para Utilização em Cerâmica Vermelha. *Cerâmica Industrial*, 2009, 14.3: 41-46.

RAMOS *et al.* Caracterização de Argilas de Novos Jazimentos Situados em Parelhas/RN, Brasil, visando Aplicação na Indústria Cerâmica. *Revista Matéria*, v. 24, n. 02. 2019.

RAMOS, R. A. *Caracterização do pó de aciaria elétrica e estudo da viabilidade de processos de aproveitamento*. Monografia. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal do Ceará, 2013.

SALEIRO, G. T.; HOLANDA, J. N. F. Processing of red ceramic using a fast-firing cycle. *Cerâmica*, 2012, 58.347: 393-399.

SANTOS, P. S. *Ciência e Tecnologia de Argilas*. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda., 1989.

SILVA, CSW. Avaliação ambiental decorrente do uso agrícola de resíduos do sistema de limpeza de gases de uma indústria siderúrgica a carvão vegetal. Viçosa. 98p. 2007. PhD Thesis. Dissertação Universidade Federal de Viçosa.

SILVA, R. V., et al. The role of glass waste in the production of ceramic-based products and other applications: a review. *Journal of cleaner production*, 2017, 167: 346-364.

SOARES, R. A., et al. Avaliação da adição de dolomita em massa de cerâmica de revestimento de queima vermelha. *Cerâmica*, 2014, 60: 516-523.

SOUZA, M. H. O.; GASPAR JR, L. A.; CHRISTOFOLETTIC, S. R. Efeitos do dolomito da Formação Irati em uma Massa Cerâmica de Comportamento Fundente como Aditivo em Revestimentos Cerâmicos. *Cerâmica Industrial*, 2015.

TEO, Pao-Ter et al. Recycling of Malaysia's electric arc furnace (EAF) slag waste into

heavy-duty green ceramic tile. **Waste Management**, v. 34, n. 12, p. 2697-2708, 2014.

TUBINO, L.C.B, Borba, P., 2006. Etapas do processo cerâmico e sua influência no produto final: massa, extrusão, secagem e queima. *Dossiê Técnico*, SENAI. Rio Grande do Sul.

VIEIRA, C. M. F. et al. Incorporação de lama de alto forno em cerâmica vermelha (Incorporation of blast furnace sludge into red ceramic). *Cerâmica*, v. 53, p. 381-387, 2007.

VIEIRA, C. M. F.; HOLANDA, JNF de; PINATTI, D. G. Caracterização de massa cerâmica vermelha utilizada na fabricação de tijolos na região de Campos dos Goytacazes-RJ. *Cerâmica*, 2000, 46.297: 14-17.

VIEIRA, C. M. F.; TEIXEIRA, S. S.; MONTEIRO, S. N. Efeito da temperatura de queima nas propriedades e microestrutura de cerâmica vermelha contendo chamote. *Cerâmica*, 2009.