



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO SUL E SUDESTE DO PARÁ  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS E ENGENHARIAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**DANILO SILVA LUZ**

**AVALIAÇÃO DA EFLORESCÊNCIA EM CERÂMICA VERMELHA COM ADIÇÃO  
DE ESCÓRIA GRANULADA DO ALTO-FORNO**

**MARABÁ-PA  
2019**

DANILO SILVA LUZ

**AVALIAÇÃO DA EFLORESCÊNCIA EM CERÂMICA VERMELHA COM ADIÇÃO  
DE ESCÓRIA GRANULADA DO ALTO-FORNO**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado à Faculdade de Engenharia de  
Materiais da Universidade Federal do Sul e  
Sudeste do Pará em cumprimento as  
exigências para obtenção do grau de  
Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador:

Prof. Dr. Adriano Alves Rabelo

MARABÁ-PA  
2019

**DANILO SILVA LUZ**

**AVALIAÇÃO DA EFLORESCÊNCIA EM CERÂMICA VERMELHA COM ADIÇÃO  
DE ESCÓRIA GRANULADA DO ALTO-FORNO**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado à Faculdade de Engenharia de  
Materiais da Universidade Federal do Sul e  
Sudeste do Pará em cumprimento às  
exigências para obtenção do grau de  
Bacharel em Engenharia de Materiais.

**DATA DA AVALIAÇÃO: 17/07/2019**

**CONCEITO: EXCELENTE**

**BANCA EXAMINADORA**



**Prof. Dr. Adriano Alves Rabelo  
(FEMAT- IGE- UNIFESPA- Orientador)**



**Prof. Dr. Denilson da Silva Costa  
(FEMMA- IGE- UNIFESPA- Membro)**



**Prof. Me. José Charles Moraes de Oliveira  
(FEMAT- IGE- UNIFESPA- Membro)**

Dedico este trabalho a meus pais, que me apoiaram e me deram todo o suporte possível durante toda minha graduação.

## **AGRADECIMENTOS**

Antes de tudo, agradeço a Deus. Agradeço aos meus pais por todo apoio prestado durante todos esses anos, pois sem eles eu não estaria aqui. Agradeço a toda minha família pelo suporte ao longo dos anos. Sou grato ao técnico do IFPA Walisson por ter disponibilizado o laboratório de química do instituto, agradeço o meu orientador Adriano Alves Rabelo por ter me orientado, sou grato aos meus professores da FEMAT, por todo conhecimento repassado. E por fim agradeço aos meus amigos, agradecimentos especiais para Jan Lucas, Idailson Santos, João André, Pablo Reis, Lívia Fernandes, Anny Caroline, Mário Castro e Tasso Medeiros, que estiveram presentes durante grande parte deste percurso, me ajudando muito durante a graduação, me concedendo diversos momentos divertidos e de descontração, tornando todos estes anos inesquecíveis. Obrigado de verdade.

*A grande conquista é o resultado de pequenas vitórias que passam despercebidas.*

*Paulo Coelho*

## RESUMO

Eflorescências são sais acumulados na superfície dos materiais cerâmicos, provenientes da migração e evaporação de líquidos salinizados. Os sais solúveis são os causadores do fenômeno da eflorescência e podem estar presentes nas matérias-primas, nas águas do subsolo e dentre outras possibilidades. São estes os principais agentes degradantes das cerâmicas porosas e de certos tipos de compósitos. Atualmente a reutilização de refugos é uma temática muito importante em termos socioeconômicos, e nestas se encaixam a utilização de resíduos siderúrgicos em materiais cerâmicos, principalmente quando se trata das cerâmicas vermelhas, nas quais tendem a ter maior facilidade em aceitar novos aditivos. As siderúrgicas geram uma diversidade de resíduos sólidos e na obtenção do ferro-gusa no alto-forno, a escória surge como subproduto, esta, representa um problema, pois deve ser armazenada de forma correta, nas quais vão se acumulando nos pátios das empresas. Uma parte dessa escória geralmente são aproveitadas principalmente pelas indústrias cimenteiras, no entanto, a quantidade de escória de alto-forno (EAF) gerado é extremamente elevada, é o resíduo de maior volume em uma siderúrgica, necessitando sempre de novos destinos. Neste trabalho, buscou viabilizar a escória em questão e avaliar o seu comportamento referente a formação da eflorescência. Foram confeccionados corpos de provas cerâmicos com adição da EAF em teores de 10, 15, 20, 25 e 30 % em peso e sinterizados à 700 °C, 800 °C e 900 °C durante 2 h. Realizou-se as caracterizações tecnológicas dos corpos de prova, nos quais os mesmos foram submetidos a ensaios mecânicos não destrutivos e destrutivos, para obtenção do módulo de elasticidade e sua resistência mecânica. Para acelerar a formação da eflorescência as peças cerâmicas foram lixiviadas em água e foi verificada a condutividade elétrica e a presença dos ânions solúveis. Caracterizou-se as fases mineralógicas por difratometria de raios X, partículas das matérias-primas e microestrutura final por microscopia eletrônica de varredura e espectroscopia de energia dispersiva. A adição da escória causou um acréscimo na formação da eflorescência, entretanto, proporcionou um acréscimo na resistência mecânica do corpo de prova cerâmico.

**Palavras-chave:** Cerâmica vermelha, eflorescência, escória de alto-forno, sais solúveis.

## ABSTRACT

Efflorescences are salts accumulated on the surface of ceramic materials from the migration and evaporation of salinized liquids. Soluble salts are the cause of the phenomenon of efflorescence and may be present in raw materials, underground water and other possibilities. These are the main degrading agents of porous ceramics and certain types of composites. Currently the reuse of refuse is a very important issue in socioeconomic terms, and in these the use of iron and steel residues in ceramic materials, especially when it comes to the red ceramics, fit in, in which they tend to be easier to accept new additives. The steelmakers generate a diversity of solid residues and in obtaining the pig iron in the blast furnace, the slag appears as a byproduct, this is a problem, since it must be stored correctly, in which they accumulate in the courtyards of the companies. However, the amount of blast furnace slag (EAF) generated is extremely high, it is the largest waste in a steel mill, always needing new destinations. In this work, it sought to make feasible the slag in question and to evaluate its behavior regarding the formation of efflorescence. Ceramics bodies with EAF addition were prepared at contents of 10, 15, 20, 25 and 30% by weight and sintered at 700 °C, 800 °C and 900 °C for 2 h. The technological characterization of the test specimens was carried out, in which they were submitted to non-destructive and destructive mechanical tests, to obtain the modulus of elasticity and its mechanical resistance. In order to accelerate the formation of the efflorescence the ceramic pieces were leached in water and the electrical conductivity and the presence of the soluble anions were verified. The mineralogical phases were characterized by X-ray diffraction, particulate matter and final microstructure by scanning electron microscopy and dispersive energy spectroscopy. The addition of the slag caused an increase in the formation of the efflorescence, however, provided an increase in the mechanical strength of the ceramic test piece.

**Keywords:** Red ceramics, efflorescence, blast Furnace slag, soluble salts.



## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> – Desenho esquemático da produção do ferro-gusa em alto-forno .....	19
<b>Figura 2</b> - Esquemática das principais zonas alto-forno .....	20
<b>Figura 3</b> - Escória granulada de alto-forno estocada em pátio .....	21
<b>Figura 4</b> - Esquemática de uma massa de argila com diferentes estágios da secagem .....	26
<b>Figura 5</b> - Efeito degradante da eflorescência em uma parede de alvenaria .....	28
<b>Figura 6</b> - Imersão dos corpos de prova para o ensaio de eflorescência .....	35
<b>Figura 7</b> - Suporte metálico para fixação de câmera fotográfica e corpo de prova .....	35
<b>Figura 8</b> - Quadro geral da metodologia aplicado no trabalho.....	38
<b>Figura 9</b> - Corpos de prova sinterizados à 700 °C e suas análises no software <i>Image J</i> .....	39
<b>Figura 10</b> - Corpos de prova sinterizados à 800 °C e suas análises no software <i>Image J</i> .....	40
<b>Figura 11</b> - Corpos de prova sinterizados à 900 °C e suas análises no software <i>Image J</i> .....	41
<b>Figura 12</b> - Módulo de elasticidade dinâmico em função do teor de resíduo.....	44
<b>Figura 13</b> - Gráfico do módulo de ruptura à flexão aplicando carga em três pontos.....	45
<b>Figura 14</b> - Análise da composição argilosa por DRX .....	48
<b>Figura 15</b> - Análise por DRX da escória de alto-forno.....	49
<b>Figura 16</b> - Morfologia da argila - (a) 1 mm (b) 200 µm (c) 100 µm.....	49
<b>Figura 17</b> – Análise por MEV da escória de alto-forno 500 µm.....	50
<b>Figura 18</b> - Análise por MEV da formulação F-3 900 °C .....	50
<b>Figura 19</b> - Espectro dos elementos presentes no F-3 900 °C .....	51

## LISTAS DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Fases mineralógicas dos elementos presentes no EAF.....	23
<b>Tabela 2</b> - Natureza química dos sais solúveis .....	24
<b>Tabela 3</b> - Formulações cerâmicas propostas com o resíduo granulado do alto-forno .....	31
<b>Tabela 4</b> - Porcentagem de partículas indicativas de efluorescência detectadas nos corpos de prova .	42
<b>Tabela 5</b> - Média dos resultados das caracterizações tecnológicas das peças sinterizadas à 700 °C..	42
<b>Tabela 6</b> - Média dos resultados das caracterizações tecnológicas das peças sinterizadas à 800 °C..	43
<b>Tabela 7</b> - Média dos resultados das caracterizações tecnológicas das peças sinterizadas à 900 °C..	43
<b>Tabela 8</b> - Porcentagem de sais solúveis diluídos nos filtrados dos extratos.....	46
<b>Tabela 9</b> - Valores quantitativos dos ânions solúveis presentes nos filtrados.....	47
<b>Tabela 10</b> - Caracterização microscópica da escória de alto-forno por EDS.....	48
<b>Tabela 11</b> - Elementos encontrados nas amostras com adições de escória.....	52

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

AF	Alto-Forno
DRX	Difração de raios X
EAF	Escória do alto-forno
EDS	Espectroscopia por dispersão de raios X
F-0	Sem adição de escória
F-1	10% de adição da escória do AF
F-2	15% de adição da escória do AF
F-3	20% de adição da escória do AF
F-4	25% de adição da escória do AF
F-5	30% de adição da escória do AF
MEV	Microscopia eletrônica de varredura

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	16
2 OBJETIVOS.....	18
<b>2.1 OBJETIVO GERAL .....</b>	<b>18</b>
<b>2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....</b>	<b>18</b>
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	19
<b>3.1 PROCESSO DE OBTENÇÃO DO FERRO-GUSA EM ALTO-FORNO .....</b>	<b>19</b>
<b>3.1.2 Alto-Forno .....</b>	<b>20</b>
<b>3.2 ESCÓRIA DE ALTO-FORNO .....</b>	<b>21</b>
<b>3.2.1 Mecanismo de formação da escória do alto-forno.....</b>	<b>22</b>
<b>3.2.2 Composição química e mineralógica da escória de alto-forno .....</b>	<b>23</b>
<b>3.3 EFLORESCÊNCIAS NOS MATERIAIS CERÂMICOS .....</b>	<b>23</b>
<b>3.3.1 Tipos das eflorescências formadas nos materiais cerâmicos .....</b>	<b>25</b>
<b>3.3.2 Dinâmica dos sais.....</b>	<b>26</b>
<b>3.3.3 Influência da velocidade de secagem .....</b>	<b>27</b>
<b>3.3.4 Efeitos da eflorescência na alvenaria e suas prevenções .....</b>	<b>27</b>
<b>3.4 ARGILA .....</b>	<b>28</b>
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	30
<b>4.1 MATERIAIS .....</b>	<b>30</b>
<b>4.2 METODOLOGIA PARA CONFECCÃO DOS CORPOS DE PROVA .....</b>	<b>31</b>
<b>4.2.1 Formulação .....</b>	<b>31</b>
<b>4.2.2 Conformação e sinterização.....</b>	<b>32</b>
<b>4.3 CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA .....</b>	<b>32</b>
<b>4.3.1 Ensaio de eflorescência.....</b>	<b>34</b>
<b>4.3.2 Método de quantificação dos sais formados nos corpos de prova.....</b>	<b>35</b>
<b>4.3.4 Método de quantificação dos sais nos filtrados dos extratos solubilizados .....</b>	<b>36</b>
<b>4.3.5 Análise de componentes químicos por Microscópio Eletrônico de Varredura e Difração de Raios X.....</b>	<b>37</b>
<b>4.3.5.1 Difratomia de Raios-X (DRX), caracterização microestrutural por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectrometria de Raios-X por Dispersão de Energia (EDS) .....</b>	<b>37</b>
<b>4.3.5.2 Caracterização de componentes químicos das amostras e corpos de prova .....</b>	<b>38</b>
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	39

<b>5.1 QUANTIFICAÇÃO DOS SAIS SOLÚVEIS FORMADOS ATRAVÉS DO SOFTWARE IMAGE J .....</b>	<b>39</b>
<b>5.2 MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO E RESITÊNCIA A FLEXÃO .....</b>	<b>44</b>
<b>5.3 CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DOS FILTRADOS DOS EXTRATOS.....</b>	<b>46</b>
<b>5.4 QUANTIFICAÇÃO DOS ÂNIONS SOLÚVEIS .....</b>	<b>46</b>
<b>5.5 ANÁLISE MINERALÓGICA POR DIFRAÇÃO DE RAIOS X.....</b>	<b>48</b>
<b>5.4.1 Argila .....</b>	<b>48</b>
<b>5.4.2 Escória do alto-forno .....</b>	<b>48</b>
<b>5.6 ANÁLISE MICROESTRUTURAL POR MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA (MEV) E ESPECTROSCOPIA POR DISPERSÃO DE ENERGIA (EDS) ..</b>	<b>49</b>
<b>5.5.1 Argila .....</b>	<b>49</b>
<b>5.5.2 Análise por MEV da escória do alto-forno.....</b>	<b>50</b>
<b>5.5.3 Corpos de prova.....</b>	<b>50</b>
<b>6 CONCLUSÕES.....</b>	<b>53</b>
<b>7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>54</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>55</b>
<b>ANEXO A – TRABALHOS PUBLICADOS E DIVULGADOS EM EVENTOS .....</b>	<b>57</b>



## 1. INTRODUÇÃO

As eflorescências são como manchas esbranquiçadas, que surgem na superfície dos corpos cerâmicos e de alguns tipos de compósitos, causando problemas estéticos e a longo prazo poderá afetar a resistência mecânica do material. Sua origem associa-se à porosidade e distribuição dos sais existentes nos materiais cerâmicos, através do fenômeno da capilaridade, estes sais migram para a superfície do material, resultando na eflorescência. Há várias décadas, são estudados os danos provenientes dos sais solúveis, os mecanismos que manipulam a formação de cristais em meios porosos e os avanços dos danos não são totalmente compreendidos (FERREIRA e BERGMANN, 2007).

Um dos principais agentes degradantes dos materiais de construção porosos, são os sais solúveis, para muitos dos envolvidos nas construções e conservação de edificações, é motivo para dor de cabeça. Este fenômeno além de afetar esteticamente o ambiente externo, causa problemas de insalubridade e contribuem no aceleração da degradação destes materiais.

Nas matérias primas argilosas, durante os processos de formação do solo, podem haver sais ou estes são trazidos por movimentos de águas subterrâneas. A denominação sais solúveis quando referidos a solo, significa que apresentam solubilidade em água consideravelmente elevada. Não podem ser totalmente evitadas a presença de sais nos corpos cerâmicos, portanto, para uma melhor compreensão do fenômeno da eflorescência, recomenda-se estudar o seu deslocamento em ambiente poroso (MENEZES, 2006).

Várias toneladas de resíduos são produzidas diariamente em uma siderúrgica, a escória de alto-forno, proveniente do processo de obtenção do ferro-gusa, é a de maior volume gerado. Sua composição consiste basicamente em FeO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, MgO e TiO<sub>2</sub>, devida as elevadas quantidades de óxidos de silício, cálcio e alumínio, se torna um excelente produto para as indústrias cimenteiras, porém estas não são o suficiente para consumir as elevadíssimas quantidades de EAF, estas continuam a se acumularem nos pátios das siderúrgicas, pois necessitam de um armazenamento adequado por conterem metais pesados como ferro e titânio, podendo trazer problemas ambientais e o custo do processo aumenta, devido ao transporte deste resíduo para locais ainda mais distantes de sua origem (ROCHA, 2013).

Com os diversos problemas ambientais no mundo atual, são extremamente válidas as ideias para reaproveitamento dos materiais que seriam descartados no meio ambiente. Neste

trabalho estudou-se o comportamento da adição da escória granulada do alto-forno em cerâmicas vermelhas, verificando principalmente a respeito da eflorescência. A formação deste fenômeno foi quantificada e comparada com corpos de provas contendo 0, 10, 15, 20, 25 e 30% em peso deste resíduo adicionados à argila.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1. OBJETIVO GERAL

Analisar a formação da eflorescência em cerâmica vermelha.

### 2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

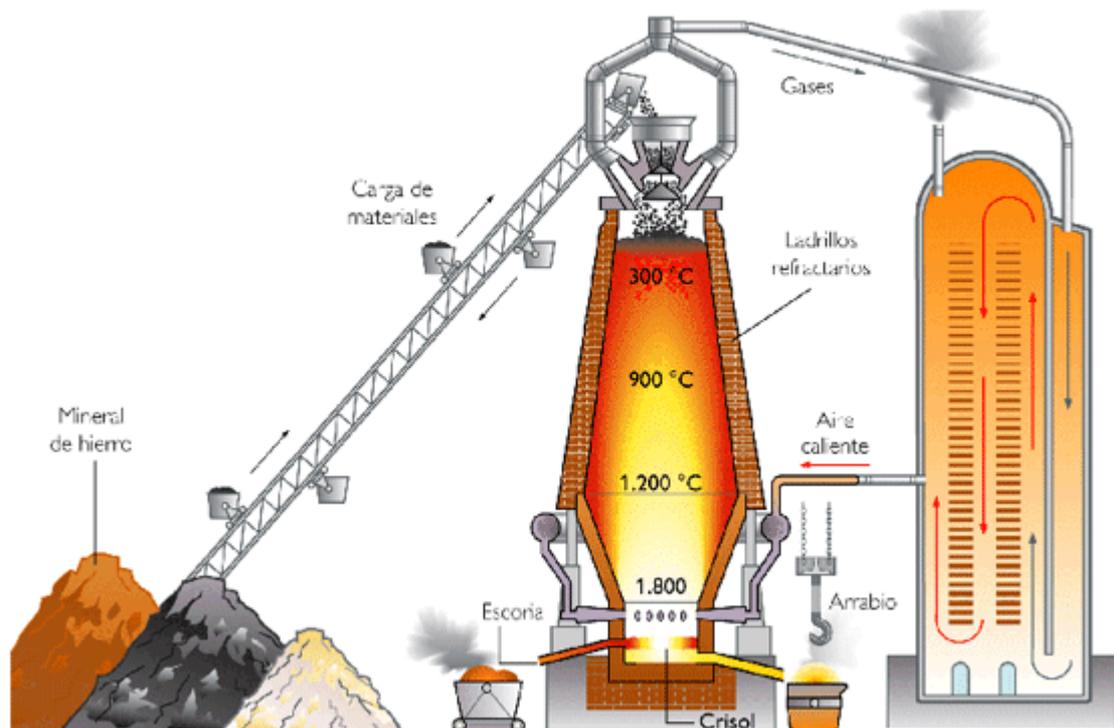
- Analisar a formação da eflorescência nas amostras com e sem adições da escória;
- Quantificar a formação do fenômeno por meio de captura de imagens utilizando o *software Image J* e a quantidade de sais presentes nos filtrados dos extratos das amostras por meio da condutividade elétrica;
- Comparar a resistência mecânica dos corpos de provas com e sem resíduo;
- Verificar a viabilidade do reaproveitamento da escória de alto-forno nas cerâmicas vermelhas.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 PROCESSO DE OBTENÇÃO DO FERRO-GUSA EM ALTO-FORNO

Na obtenção do ferro-gusa, adiciona-se no alto-forno aglomerados de minérios de ferro na forma de sinter ou pelotas, nos quais há adições de fundentes (cal, sílica e semelhantes) e o coque metalúrgico. Na sequência, injeta-se ar preaquecido em temperatura de aproximadamente 1200 °C, o gás oxigênio do ar reage com o carvão produzindo monóxido de carbono, no qual é o agente redutor do processo de obtenção do ferro-gusa. A fusão do minério de ferro é realizada pelo calor do ar quente e da combustão do carvão, neste momento, acontece a reação química entre o monóxido de carbono e o óxido de ferro, formando o ferro-gusa, além de elementos como enxofre, carbono, manganês, entre outros (RIZZO, 2009). O gusa geralmente contém até 5% de carbono, ele é despejado em um cadinho ou carro torpedo, onde seguirá para a aciaria ou será armazenado. A Figura 1 é de um desenho esquemático do alto-forno produzindo ferro-gusa:

**Figura 1** – Desenho esquemático da produção do ferro-gusa em alto-forno.



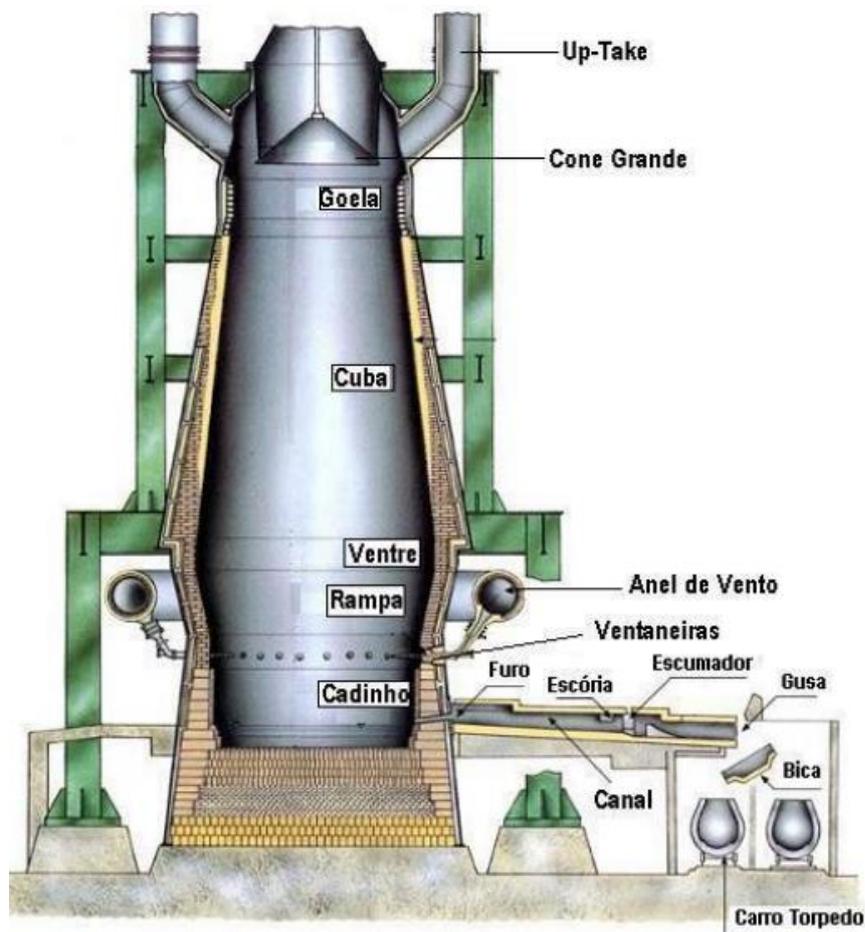
Fonte: Albatecnologia, (2009).

### 3.1.2 Alto-Forno

O alto-forno (AF) surgiu para produção em larga escala de metal fundido, os primeiros no século XIV produziam em média uma tonelada de gusa por dia, atualmente a produção é em média de 13.000 toneladas diárias (RIZZO, 2009). Utiliza a queima do carvão vegetal ou mineral como fonte de energia e em contrapartida esta combustão já auxilia nas reações químicas necessárias na produção do ferro-gusa.

Este forno é dividido em regiões, as principais são: goela, utilizada para alimentação; cuba, parte superior do AF onde inicia-se as primeiras reações em temperaturas entre 300 à 800 °C; em sequência temos o ventre, no qual ocorrem as principais reações de redução do metal em temperaturas de 1000 à 1800 °C; rampa, corresponde a zona mais quente do forno com temperaturas superiores à 1800 °C; furo de corrida, situado no cadinho e utilizado para o vazamento do gusa e escória; e por fim as ventaneiras, utilizadas para injeção de ar quente há elevadas velocidades (CHIAVERINI, 1986). Na Figura 2 uma esquematização básica do AF.

**Figura 2** - Esquematização das principais zonas do alto-forno.



**Fonte:** Edisciplinas.usp, (2017).

### 3.2 ESCÓRIA DO ALTO-FORNO

A EAF é obtida como coproduto da produção de gusa em alto-forno, por ser rica em óxidos de silício, cálcio e alumínio, é muito utilizada nas indústrias cimenteiras e em construções civis. Este é o resíduo de maior volume em peso gerado pelos processos siderúrgicos, chegando a atingir em média 300 Kg de escória para cada uma tonelada de gusa produzido (ACERLORMITTAL, 2017). Por conter metais pesados como ferro e titânio, este resíduo necessita de um armazenamento adequado para minimizar as agressões ao meio ambiente.

As indústrias que reutilizam este resíduo, atualmente não conseguem consumir toda a demanda de escória produzida diariamente, fazendo com que as siderúrgicas tenham gastos para armazená-la em locais cada vez mais distantes (ROCHA, 2013). Partindo desta premissa, é muito importante que novos destinos para a EAF sejam estudados. É de conhecimento que esta escória possui teores de óxidos metálicos, nos quais a recuperação desses metais se tornou muito importante no ponto de vista econômico e das restrições relativas à conservação do meio ambiente, contribuindo para compensar os gastos com instalações de equipamentos antipoluição (FAY, 2006). A Figura 3 mostra a forma granulada da escória de alto-forno.

**Figura 3** – Escória granulada do alto-forno estocada em pátio.



**Fonte:** Autor, (2019).

Existem diversos tipos de EAF, tudo depende da sua forma de resfriamento, sendo lentamente ou rapidamente, ela adquire diferentes características em sua estrutura cristalina, coloração, tamanho e densidade. Ela pode ser expandida, vítrea e amorfa, afetando diretamente nas suas propriedades e, portanto, em suas possíveis aplicações.

A escória granulada é utilizada como matéria-prima na fabricação de cimentos compósitos, por sua capacidade hidráulica que permite quando moída e em contato com a água, faz com que endureça, tal propriedade cimentante, permite a possibilidade de substituir o clínquer, material utilizado na fabricação de cimentos. As escórias cristalizadas devido o resfriamento lento, são geralmente empregadas como agregados graúdos na construção civil. Já as escórias expandidas ou esponjosas, possuem baixa densidade e podem ser utilizadas como agregados leves e possuem propriedades isolantes acústicas e térmicas (ACERLORMITTAL, 2017).

### 3.2.1 Mecanismo de formação da escória do alto-forno

A escória do alto-forno é formada pela fusão das impurezas do minério de ferro, juntamente com adição dos fundentes e as cinzas do coque. Esta escória fundida é insolúvel com o ferro-gusa e de menor densidade, se pondo sobre o gusa, e ao mesmo tempo exercendo um papel de proteção para o ferro fundido.

Depois de vasada, um fator é crucial na característica final da escória, se trata do tipo de resfriamento ao qual ela será submetida, são esses:

- Resfriamento brusco em água: Ocorre em tanques com água, são conhecidos como tanques de granulação. Necessitam em média de 5 a 10 m<sup>3</sup> de água por tonelada de escória, o resfriamento é tão rápido que não há tempo para formação dos cristais, a escória se granula ficando vitrificada, onde se obtém uma espécie de areia grossa e porosa, de fratura vítrea com tamanho máximo de grão de 5 mm, as cores podem ser esverdeadas, amareladas, esbranquiçadas ou marrom. A escória muito granulada é essencialmente amorfa (ACERLORMITTAL, 2017).
- Resfriamento lento: Acontece quando a escória é despejada em locais ao ar livre originando um produto cristalizado e maciço. Para sua utilização, é necessário ser britado e processado (ACERLORMITTAL, 2017).
- Escória resfriada por ar sob pressão: É a denominada escória esponjosa, este processo faz com que a escória incorpore ar e apresenta uma estrutura alveolar, sua massa específica varia entre 0,6 g/cm<sup>3</sup> a 0,9 g/cm<sup>3</sup>, considerado um material de baixa densidade na qual possui propriedades isolantes térmicas e acústicas (ACERLORMITTAL, 2017).

### 3.2.2 Composição química e mineralógica da escória de alto-forno

Como citado anteriormente, a escória de alto-forno é composta principalmente de cal, sílica e alumina. A Tabela 1 especifica os elementos e as percentagens das fases mineralógicas presentes em uma corrida de EAF. O tipo de resfriamento determinará a estrutura deste resíduo, quando resfriado rapidamente, não dá tempo para formação dos cristais, na qual adquire uma característica vítrea, porém esta fase não é estável, e aos longos dos anos irá perder gradualmente este aspecto de vidro até se tornar cristalina, no entanto, as escórias granuladas quando transformadas em pó, são essencialmente amorfas, ou seja, a microestrutura não é cristalina, onde não é ordenada em planos paralelos que refratem os raios X.

**Tabela 1** - Fases mineralógicas dos elementos presentes no EAF.

EAF	
SiO <sub>2</sub>	36,94%
CaO	28,52%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19,77%
MgO	5,71%
FeO	2,72%
Na <sub>2</sub> O	2,04%
TiO <sub>2</sub>	0,91%
K <sub>2</sub> O	1,53%
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,14%
SO <sub>3</sub>	0,08%
Outros	1,7%

Fonte: Sinobras, (2018).

### 3.3 EFLORESCÊNCIAS NOS MATERIAIS CERÂMICOS

A eflorescência são depósitos salinos, em sua grande maioria originados das matérias primas de composição do material cerâmico e de águas subterrâneas. Para que este fenômeno ocorra, são necessários três fatores simultâneos: sais solúveis, água e o gradiente hidráulico. A umidade percorre em meio o corpo poroso, dissolvendo os sais presentes e os deslocam até a superfície do material. Deste ponto, a água evapora gerando a precipitação dos sais, nos quais se depositam em forma de pó, dando aspecto de manchas sobre a superfície (JUNGINGER e MEDEIROS, 2002).

Tal fenômeno seria impossível sem a presença de um solvente, que na maioria dos casos é a água em favoráveis condições ambientais, um meio para a percolação do fluido e por fim, a presença de sais solúveis nestes líquidos.

A presença dos sais solúveis é um dos principais causadores para a degradação dos materiais cerâmicos porosos e certos tipos de compósitos para construção civis, é motivo de frustração com os envolvidos nas áreas das construções e preservação de edificações. Afeta principalmente na estética do ambiente externo, gera problemas de insalubridade e contribuem para a aceleração da deterioração das estruturas contaminadas (CAMPOS, 2010). A Tabela 2 mostra uma relação da natureza química dos sais solúveis e suas fontes prováveis.

**Tabela 2** - Natureza química dos sais solúveis.

<b>Composição Química</b>	<b>Provável Fonte</b>	<b>Solubilidade em água</b>
Carbonato de Cálcio	Carbonatação da cal lixiviada da argamassa ou concreto	Pouco solúvel
Carbonato de Magnésio	Carbonatação da cal lixiviada de argamassa de cal não-carbonatada	Pouco solúvel
Carbonato de Potássio	Carbonatação dos hidróxidos alcalinos de cimento com elevado teor de álcalis	Muito solúvel
Carbonato de Sódio	Carbonatação dos hidróxidos alcalinos de cimento com elevado teor de álcalis	Muito solúvel
Hidróxido de Cálcio	Cal liberada na hidratação do cimento	Solúvel
Sulfato de Magnésio	Água de amassamento	Solúvel
Sulfato de Cálcio	Água de amassamento	Parcialmente solúvel
Sulfato de Potássio	Agregados, água de amassamento	Muito solúvel
Sulfato de Sódio	Agregados, água de amassamento	Muito solúvel
Cloreto de Cálcio	Água de amassamento, limpeza com ácido muriático	Muito solúvel
Cloreto de Magnésio	Água de amassamento	Muito solúvel
Cloreto de Alumínio	Limpeza com ácido muriático	Solúvel
Cloreto de Ferro	Limpeza com ácido muriático	Solúvel

**Fonte:** Uemoto, (1988).

Se tratando de solo, sais solúveis são aqueles que apresentam uma boa solubilidade em água (FERREIRA e BERGMANN, 2007). Existem diversos tipos destes sais, dos encontrados nas matérias-primas, os principais são: Cloretos, existentes principalmente

próximos aos arredores marítimos. Nitratos, são diretamente associados com a presença de material orgânico. Carbonatos, frequentemente responsáveis em casos de eflorescências em forma de carbonato de sódio e estão geralmente ligados a umidade do solo ou argamassa do cimento. Sulfatos, são os principais responsáveis pela formação da eflorescência nos edifícios, devido a presença do sulfato de sódio que é o maior causador desta patologia.

Devido a impossibilidade física de realizar a total eliminação dos sais quando presentes nos corpos cerâmicos, evitar a eflorescência acaba esbarrando neste fator. Há várias décadas são investigados os danos causados pelos sais solúveis, o controle da formação dos cristais em meios porosos e o desenvolvimento dos danos a eles atribuídos ainda não são totalmente compreendidos (FERREIRA e BERGMANN, 2007).

### **3.3.1 Tipos das eflorescências formadas nos materiais cerâmicos**

Segundo Verduch e Solana (2000) três tipos para a formação da eflorescência podem ocorrer por meio de causas distintas, sendo elas, eflorescência de secagem, secador e de forno.

#### ❖ Eflorescências de secagem

Forma-se o fenômeno pela secagem ao ar livre nas argilas sem moldar, conhecidas como “véus de secagem”. Um bom exemplo, é a película salinizada formada sobre as partes protuberantes de um torrão de argila que seca espontaneamente ao relento. No presente caso a secagem é proveniente pela ação do ar natural sobre argilas não tratadas mecanicamente, que possui sua textura natural.

#### ❖ Eflorescências de secador

Nas eflorescências de secador a secagem é realizada pela ação do ar industrial possivelmente contaminado sobre argilas que foram conformadas mecanicamente. Os sulfatos de magnésio e de cálcio são os principais formadores de sais de secador nas argilas, e são uns dos mais indesejados por poderem se transformar facilmente em eflorescências permanentes de forno. As águas que concedem o estado plástico nos materiais argilosos, ao evaporar, transportam até a superfície uma parte dos sais solúveis existentes na argila (VERDUCH e SOLANA, 2000). Os sais mais solúveis são carregados com maior facilidade, contudo, por exemplo, o sulfato de magnésio heptahidratado ( $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ ) cuja solubilidade em água é bastante elevada, tem maior facilidade em formar eflorescência de secador que o sulfato de cálcio dihidratado ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ) cuja a solubilidade é baixa (VERDUCH e SOLANA, 2000).

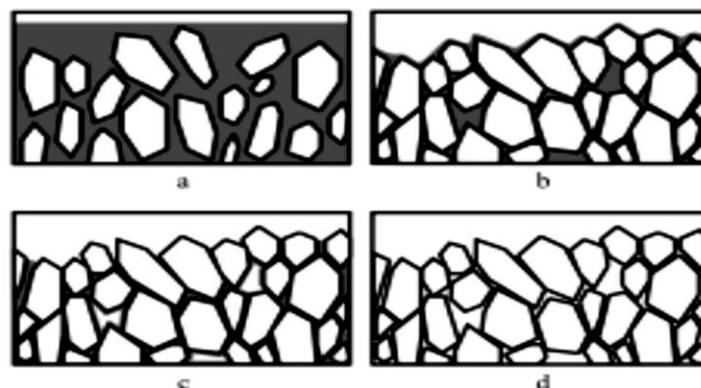
### ❖ Eflorescências de forno

As eflorescências de secador formadas na superfície dos corpos cerâmicos a verde, quando submetidas a queima nos fornos, ocorrem diversas reações, transformando-se em eflorescências de forno. Pode-se citar como exemplo o cloreto de bário ( $\text{BaCl}_2$ ), quando presente no material argiloso o excesso deste sal pode causar uma eflorescência de secador, e logo após a queima se converte em eflorescência de forno. Tal eflorescência não deve ser confundida com as películas esbranquiçadas de cinzas fundidas que as vezes se depositam sobre os tijolos no forno. Diferentes eflorescências de forno podem se originar a partir de uma única eflorescência de secador, tudo dependerá da atmosfera do forno e os ciclos de queima. A temperatura do forno influencia na formação deste fenômeno nas cerâmicas, os ciclos de queima a elevadas temperaturas, costumam diminuir a quantidade de eflorescência de forno visível nos produtos cerâmicos. É difícil uma análise direta deste tipo de eflorescência, pois são insolúveis, aderentes e muito finas, e em alguns casos, possui uma composição demasiadamente complexa (FERREIRA e BERGMANN, 2007).

### 3.3.2 Dinâmica dos sais

Durante a secagem os sais são transportados até a superfície das peças por capilaridade. A massa argilosa úmida passa por diferentes aspectos durante a secagem, tais mudanças estão representadas na Figura 4. A contínua eliminação da água modifica as partículas argilosas, no primeiro estágio são separadas por películas de água mais grossas, ao longo da secagem, essas películas vão afinando até o contato. Nesta etapa da secagem, a argila se contrai proporcionalmente à quantidade de água que foi eliminada (VERDUCH e SOLANA, 2000).

**Figura 4** - Esquematização de uma massa de argila com diferentes estágios da secagem.



**Fonte:** Verduch e Solana (2000).

A água que é eliminada após o fim da retração corresponde ao esvaziamento da rede capilar, nesta fase a água já não se evapora na superfície da peça, e sim no interior dos poros. Ao atingir um determinado estado de secagem, onde essa continuidade se rompe, a água restante evapora no interior da peça, não contribuindo mais para transportar os sais até a superfície. Pode-se dizer que a quantidade total de água presente em uma massa argilosa pode se dividir em duas. Uma sendo eficaz no transporte dos sais para a superfície, pois chega até o local na forma líquida. A segunda não é capaz de transportar sais, porque se evapora no interior da peça, chegando a superfície na forma de vapor (VERDUCH e SOLANA, 2000).

Quanto maior a umidade da argila, maior será a quantidade d'água capaz de transportar sais para a superfície do material, resultando em uma maior quantidade de sais transportados por capilaridade. A água é um fator primordial na formação das eflorescências de secador, devido a isto, precisa ser a mínima necessária (VERDUCH e SOLANA, 2000). Normalmente os valores de umidade utilizados nas massas para cerâmica vermelha são em torno de 8%.

### **3.3.3 Influência da velocidade de secagem**

Um fator muito importante é a velocidade de secagem, na qual afeta a quantidade de eflorescências formadas e também sua distribuição sobre a superfície das peças cerâmicas. Em um experimento, ao realizar a secagem em duas velocidades distintas, contendo sais marcados com isótopos radioativos segundo Verduch e Solana (2000), Brownell observou que, com uma maior velocidade de secagem, menor o nível de radiatividade que atinge a superfície. Isto significa que a quantidade de sal transportado até a superfície da peça é menor quando maior for a velocidade de secagem.

Os tijolos quando submetidos a uma secagem rápida, as eflorescências aparecem distribuídas de modo mais homogêneas e podem ficar menos visíveis. No inverso, com uma secagem lenta, os sais tendem a se concentrar nas arestas e vértices, onde a velocidade de evaporação é maior, ficando mais visível a eflorescência.

### **3.3.4 Efeitos da eflorescência na alvenaria e suas prevenções**

Dos efeitos causados pela eflorescência nas alvenarias, os primeiros a surgirem são na parte estética, devido as manchas da patologia, em sequência pode vir a deterioração das

alvenarias, fazendo com que se descamem aos poucos até causar degradação profunda, a Figura 5 mostra o descolamento do porcelanato causado pelo acúmulo de sais na alvenaria.

**Figura 5** - Efeito degradante da eflorescência em uma parede de alvenaria.



**Fonte:** Cichinelli, (2006).

Alguns métodos de prevenção podem ser tomados para minimizar a ocorrência deste fenômeno, dentre eles, não utilizar materiais ou componentes com alto teor de sais solúveis, evitar tijolos com altos teores de sulfatos, molhar os componentes cerâmicos demasiadamente secos, minimizando a absorção da água de amassamento e a reação com o cimento, sempre proteger da chuva a alvenaria recém acabada e evitar entrada de umidade com a ajuda de boa impermeabilização, usar argamassa mista (cimento, cal, areia) para minimizar a reação com os componentes cerâmicos, e por fim, usar cimento Portland pozolânico ou de alto-forno, que liberam menor teor de cal na hidratação. Esses cimentos são especialmente indicados em obras expostas à ação de água corrente e ambientes agressivos (UEMOTO, 1988).

### 3.4 ARGILA

As argilas comuns são as utilizadas nas indústrias de cerâmica vermelha, elas contêm uma vasta variedade de substâncias minerais. Formadas basicamente por sedimentos pelíticos consolidados e não-consolidados, como argilitos, siltitos, folhelhos, ritmitos e argilas aluvionares quaternárias, que queimam em cores avermelhadas com temperaturas entre 800 e 1.250 °C, dependendo de cada tipo do material argiloso.

Geralmente essas argilas possuem granulometria bem fina, tal característica lhes conferem juntamente com a matéria orgânica incorporada, diferentes índices de plasticidade,

quando adicionadas porcentagem distintas de água, além da resistência a verde e após a sinterização, tais aspectos são importantes para fabricação dos produtos cerâmicos. Na indústria de cerâmica vermelha ou estrutural, as argilas são empregadas como matéria-prima na fabricação de blocos de vedação e estruturais, telhas, tijolos maciços, tubos e ladrilhos (ALMEIDA et al, 2005).

Durante a extrusão, o comportamento destas massas está relacionado a diversos fatores, entre eles a composição mineralógica, teor de umidade, morfologia e distribuição granulométrica das partículas (RIBEIRO, 2003).

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Quando se refere ao beneficiamento das argilas, a redução do tamanho do grão das partículas se dá por meio de moedores, contando com um processo a seco com britadores de mandíbulas e moinhos. Os cuidados com estes equipamentos, são principalmente referentes a manutenção, e com o monitoramento com as grelhas e mandíbulas moedoras.

A massa cerâmica precisa estar com as condições adequadas para processo de produção, deve ter uma umidade adequada para realização da moldagem, a fim que a peça conformada tenha uma boa resistência mecânica a verde e a seco. A massa argilosa precisa ter uma adequada composição mineralógica, para que as transformações físico-químicas durante o processo de queima confirmem ao produto final as características pretendidas.

As principais propriedades tecnológicas das matérias-primas no que se diz respeito a moldagem das massas cerâmicas é a sua plasticidade e o grau de compactabilidade, estes influenciam diretamente na qualidade do produto final (ROCHA, 2013).

### 4.1 MATERIAIS

No desenvolvimento deste trabalho foram utilizadas a argila coletada na cerâmica Castanheira, situada na cidade de Marabá-PA, e a escória granulada do alto-forno oriunda da empresa Sinobras, localizada no distrito industrial de Marabá.

Para realização da compactação dos corpos de provas cerâmicos, utilizou-se a prensa hidráulica Marconi 15 toneladas, para a calcinação e sinterização foi utilizado o forno mufla MA 385/3. O valor do módulo de elasticidade foi obtido por ensaio não destrutivo, utilizando um Captador Acústico Direcional CA-DA da SONELASTIC do laboratório de análises térmicas da FEMAT Unidade 2. Obteve-se o resultado do módulo de ruptura à flexão a partir do procedimento aplicando carga em três pontos, realizado na máquina universal de ensaios da marca EMIC D10000, disponível no laboratório de ensaios destrutivos da UNIFESSPA Campus 2. A captura das imagens dos corpos de prova, foram realizadas por uma câmera digital de 15 megapixels fixada em um dispositivo de altura padrão.

Para o processo de quantificação da condutividade elétrica dos sais solúveis no extrato de solubilização, foi utilizado o condutivímetro digital de bancada Termo Orion Star A212 da marca ALPAX. Para determinação dos ânions solúveis, foram utilizados 7 reagentes, são eles: solução de fenolftaleína a 1%, ácido sulfúrico 0,025N, indicador metil Orange 0,01%

e 0,1%, solução de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,025 N, solução de cromato de potássio, solução de nitrato de prata, solução de BaCl<sub>2</sub> a 10%.

O Microscópio eletrônico de varredura utilizado foi o TM 3000 da marca Hitachi, o em aparelho da marca Oxford Inst., modelo SwiftED, disponível no laboratório de Caracterização Estrutural da FEMAT Unidade 2. O equipamento de Difração de raios x foi o X'PERT PRO MPD (PW 3040/60), da PANalytical disponível no mesmo laboratório.

## 4.2 METODOLOGIA PARA CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

### 4.2.1 Formulação

A etapa consiste basicamente em variar as proporções entre argila e a escória do alto-forno, a fim de caracteriza-las quanto as suas propriedades físicas e mecânicas. Foram confeccionados diversos corpos de provas com proporções distintas do resíduo siderúrgico e a argila, nas quais variaram as temperaturas de sinterização, totalizando 6 peças para cada formulação e temperatura, afim de comparar as formulações quanto aos seus aspectos físicos e para execução das demais etapas. A Tabela 3 representa as formulações utilizadas.

**Tabela 3** - Formulações cerâmicas propostas com o resíduo granulado do alto-forno.

Formulação	Porcentagem %		Temperaturas de queima (°C)
	Argila	EAF	
F0	100	0	700, 800 e 900
F1	90	10	
F2	85	15	
F3	80	20	
F4	75	25	
F5	70	30	

**Fonte:** Autor (2018).

Na fabricação de um produto cerâmico, o processo inicia-se a partir da mistura das matérias-primas, nas quais, quando submetidas aos efeitos da temperatura elevada, passam por transformações físico-químicas até atingir as propriedades mecânicas requeridas para o produto em questão. Foi realizado um processo de quarteamento para auxiliar na homogeneização da escória com a argila, esta massa foi umidificada até atingir de 6 a 8% de umidade total (realizada antes da prensagem), borrifando água e misturando manualmente.

#### 4.2.2 Conformação e sinterização

A conformação do material foi realizada em uma prensa hidráulica uniaxial, e para o molde, uma matriz metálica de aço ferramenta, possuindo as dimensões de 20 x 60 x 6 mm<sup>3</sup>. A carga de compactação utilizada nos corpos de prova foi de 55 MPa.

Em seguida, os corpos de prova foram sinterizados em forno mufla elétrica, nas temperaturas de 700°, 800° e 900°C, utilizada uma taxa de aquecimento de 10 °C por minuto e tempo de queima por 2 horas, com o intuito de observar o comportamento dos mesmos referente às propriedades tecnológicas.

#### 4.3 CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Os corpos de provas cerâmicos confeccionados, contendo em suas formulações diversas porcentagens em peso de escória granulada de alto-forno, cominuídas e passadas em peneiras de 100 mesh (0,15 mm), foram submetidos a caracterizações físicas e mecânicas, realizadas a partir de ensaios de acordo com as normas técnicas existentes e procedimento laboratorial padrão. Após a sinterização, caracterizou-se a absorção de água, porosidade aparente, densidade aparente, retração linear, módulo de elasticidade estático e resistência mecânica por módulo de ruptura à flexão em três pontos.

- **Absorção de água**

Menores valores de absorção de água, normalmente corresponde a uma resistência mecânica melhor, boa resistência a ácidos, dureza mais elevada e um bom comportamento ao frio. Os valores de absorção de água estão diretamente relacionados aos poros abertos do material, com isto, através da equação 1, se obtêm os valores da absorção de água.

$$AA = \frac{Pu - Ps}{Ps} \times 100 \quad \text{Equação 1}$$

No qual:

Pu = peso da amostra úmida

Ps = peso da amostra seca

- **Porosidade Aparente**

Quanto para a obtenção da porosidade aparente quanto para absorção de água, o procedimento relaciona a o peso da amostra seca ( $P_s$ ), peso da peça úmida ( $P_u$ ) e imersa em ( $P_i$ ). Para realização da pesagem do corpo de prova imerso e úmido, é necessária a imersão dos corpos de prova em água por 24 horas. Para o procedimento do peso imerso, utilizou-se o princípio de Arquimedes, determinando a porosidade aparente das peças cerâmicas utilizando a equação 2.

$$Pap = \frac{Pu - Ps}{Pu - Pi} \times 100 \quad \text{Equação 2}$$

- **Densidade Aparente**

A resistência mecânica é influenciada pela porosidade e densidade, quanto menor a quantidade e os tamanhos dos poros, maior será a densidade do material e elava a resistência mecânica, em contrapartida, diminui a resistência ao choque térmico. Para otimizar ambas as resistências, deve-se buscar trabalhar na porosidade do material, até a peça apresentar níveis satisfatórios de desempenho operacional. Calcula-se a densidade aparente utilizando a equação 3.

$$Dap = \left[ \frac{Ps}{Pu - Pi} \right] \quad \text{Equação 3}$$

- **Retração linear**

Os corpos de provas cerâmicos sofrem retração linear quando submetidos a sinterização, e na mediada em que se eleva a temperatura de queima, o valor de retração tende a aumentar. Mediu-se os comprimentos dos corpos de provas antes da queima e após a mesma, para possível determinação da retração linear. A equação 4 relaciona as dimensões medidas do corpo de prova para a obtenção dos resultados de retração.

$$Rlq = \frac{Ls - Lq}{Ls} \times 100 \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

RLQ = retração linear de queima (%)

L<sub>s</sub> = comprimento após a secagem (mm)

L<sub>q</sub> = comprimento após a queima (mm).

- **Módulo de ruptura à flexão**

A resistência mecânica se obteve pelo módulo de ruptura por flexão, no qual, é o quanto o corpo de prova pode resistir à fratura, quando submetido a uma tração mecânica. As peças cerâmicas foram submetidas a uma carga em três pontos. A fórmula a equação 5 é utilizada para o cálculo da resistência mecânica à flexão ( $\sigma$ ) das peças ensaiadas.

$$\sigma = \left(\frac{3}{2}\right) \times \left[\frac{P \times L}{b \times d^2}\right] \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

$\sigma$  = tensão máxima de ruptura, em Mpa

P = carga máxima aplicada, em N

b = largura do corpo de prova, em mm

d = altura do corpo de prova, em mm

L = distância entre os apoios inferiores, em mm.

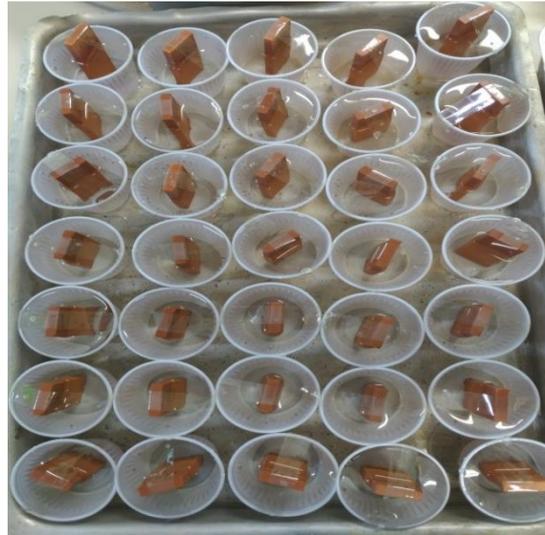
- **Módulo de elasticidade**

O módulo de elasticidade ou módulo de Young, é um parâmetro mecânico que proporciona a medida da rigidez de um material sólido. Para obtenção do valor do módulo de elasticidade, utilizou-se o método de ensaio não destrutivo, fazendo uso de um equipamento de captação acústica, onde o módulo elástico é determinado a partir da frequência de vibração da peça cerâmica com amplitudes de vibração mínimas. Este método de ensaio também é conhecido como dinâmico ou por ultrassom.

#### **4.3.1 Ensaio de efluorescência**

Realizou-se o ensaio de efluorescência segundo a norma ASTM C67-14<sup>(6)</sup>, emergindo-se os corpos de prova até aproximadamente 80% da altura em recipientes com água destilada, durante sete dias em temperatura ambiente, mantendo-se fixo o volume da água. Em seguida os corpos de prova foram secos em estufa a 110 °C por 24 h visando uma aceleração na formação da efluorescência. Analisou-se visualmente se a presença ou não de manchas brancas, decorrentes dos sais solúveis, para confirmar a formação de efluorescência.

**Figura 6** - Imersão dos corpos de prova para o ensaio de efluorescência.

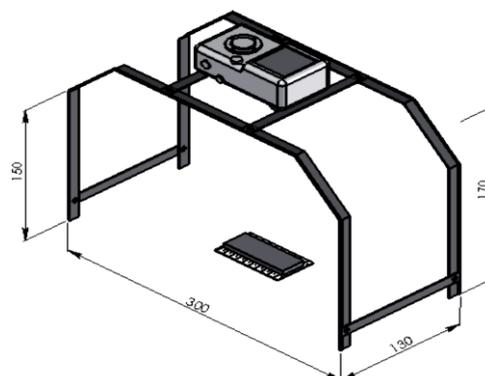


**Fonte:** Autor, (2018).

#### 4.3.2 Método de quantificação dos sais formados nos corpos de prova

Para quantificar a formação da efluorescência nos corpos de prova, utilizou-se o método de tratamento de imagem no *software Image J* (ALBUQUERQUE, 2007). Tal método baseia-se no mapeamento do corpo de prova a partir de uma imagem em preto e branco. As peças foram fotografadas em um ambiente iluminado com luz artificial, utilizou-se uma câmera fotográfica de 15 Megapixels fixada em um suporte de 170 mm de altura, para atender a distância especificada pelo método, a prática está representada pela Figura 7.

**Figura 7** - Suporte metálico para fixação de câmera fotográfica e corpo de prova.



**Fonte:** Ferreira e Bergmann, (2007).

As imagens foram editadas, afim de excluir qualquer área que não seja do corpo de prova, em seguida, processou-se as fotos no *software Image J*, e por fim, realizou a

determinação na área resultante da quantidade relativa de pixels pretos (eflorescência) sobre o total de pixels na imagem.

#### 4.3.4 Método de quantificação dos sais nos filtrados dos extratos solubilizados

Utilizou-se o filtrado de cada formulação a partir do extrato de saturação para a determinação dos sais solúveis e pH. Este filtrado é obtido após as amostras serem destorroadas e umidificadas, formando uma pasta que é lavada em filtro de papel com água destilada. Conforme Menezes (2006), para a quantificação do teor dos sais solúveis nos extratos solubilizados, utilizou-se a seguinte equação:

$$\% \text{ Sais} = \frac{CE \times 640 \times PS}{10^3 \times 10^3} \quad \text{Equação 6}$$

No qual, CE é a condutividade elétrica do filtrado (dS/cm); 640 é uma constante, utilizada para transformar condutividade elétrica em mg/L e PS é o volume necessário para saturar uma determinada quantidade de amostra.

Os carbonatos foram determinados por acidimetria com ácido sulfúrico em presença de fenolftaleína como indicador. Para o cálculo do teor de carbonatos foi realizada conforme a equação 7:

$$CO_3^- (\text{cmolc/l}) = \left[ \frac{\text{vol (ml) de ácido gastos} \times 5}{\text{vol (ml) do extrato}} \right] \quad \text{Equação 7}$$

Para quantificação dos bicarbonatos, o mesmo filtrado citado anteriormente foi utilizado. A prática foi realizada por acidimetria com ácido sulfúrico em presença de vermelho de metila como indicador e fenolftaleína para a prova em branco. Através da equação 8, calcula-se os teores de bicarbonatos:

$$HCO_3^- (\text{cmolc/l}) = \left[ \frac{(a-b \times 2)}{c} \times 5 \right] \quad \text{Equação 8}$$

Onde, a: volume de ácido sulfúrico gastos (ml)

b: volume de fenolftaleína gastos (ml)

c: volume do extrato (ml)

Para avaliação dos cloretos, utilizou-se o método de determinação volumétrica com nitrato de prata em presença de cromato de potássio como indicador. Para o cálculo deste teor, empregou-se a equação 9:

$$Cl^{-} (mg/L) = \left[ \frac{(a-b \times 5)}{c} \right] \times 354,5 \quad \text{Equação 9}$$

Onde, a: volume de nitrato de prata gastos (ml).

b: volume de nitrato de prata na prova em branco (ml).

c: volume do extrato (ml).

A constante 354,5 refere-se ao fator de transformação da unidade  $cmol/l$  para  $mg/L$ , utilizando a seguinte relação:

$$\frac{cmol}{l} Cl^{-} = \left[ \frac{\text{peso atômico}(g)}{\frac{\text{valência}}{100}} \right] \times 1000 = x \text{ mg/L} \quad \text{Equação 10}$$

Os sulfatos foram medidos por gravimetria com precipitação de cloreto de bário. O cálculo para esse ânion solúvel foi realizado aplicando a equação 11:

$$SO_4^{-} (mg/L) = \left[ \frac{(a \times 856,82)}{b} \right] \times 480,3 \quad \text{Equação 11}$$

Onde, a: massa do sulfato de bário (mg)

b: volume do extrato (ml).

A constante 480,3 refere-se ao fator de transformação da unidade  $cmol/l$  para  $mg/L$ , para os sulfatos, empregando-se a mesma relação da equação 10.

### 4.3.5 Análise de componentes químicos por Microscópio Eletrônico de Varredura e Difração de Raios X

#### 4.3.5.1 Difractometria de Raios-X (DRX), caracterização microestrutural por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectrometria de Raios-X por Dispersão de Energia (EDS)

A técnica de caracterização mineralógica por Difractometria de Raios-X (DRX) é muito utilizada para identificação das espécies de minerais presentes em uma amostra, permitindo estudar suas características cristalográficas. Esta técnica também conta com o auxílio de um software para quantificar cada espécie mineral (MELO, 2011).

A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) é uma técnica que permite analisar a morfologia das amostras “bulk” em escala micrométrica, e também as fases presentes nos materiais, distribuição de fases, tamanho médio de grãos, identificação de trincas, porosidade entre outras demais características.

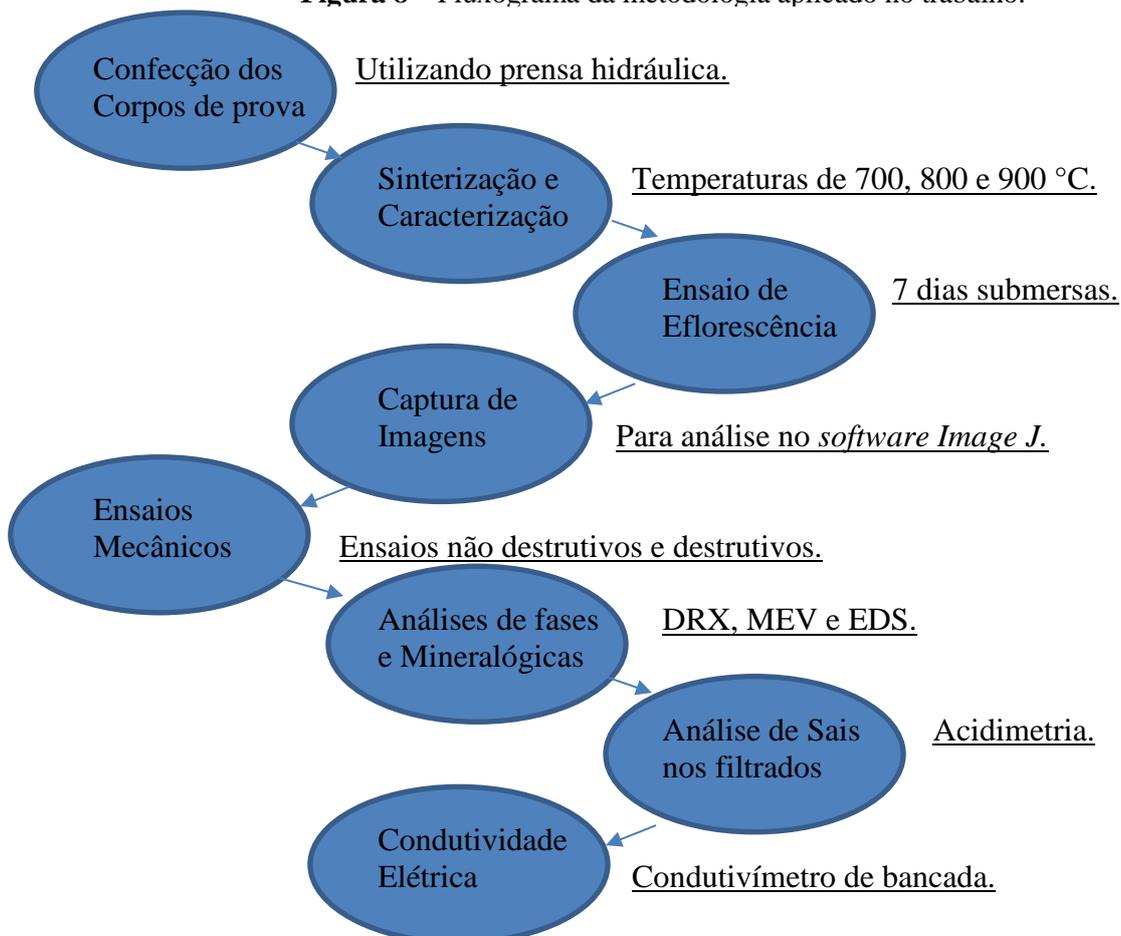
A análise de Espectrometria de Raios-X por Dispersão de Energia (EDS) é realizada por um equipamento acoplado ao MEV, na qual permite fazer uma avaliação química qualitativa e semiquantitativa das amostras.

#### 4.3.5.2 Caracterização da análise de fases das amostras e corpos de prova

A argila, o resíduo siderúrgico e os corpos de prova foram analisados por DRX, MEV e EDS, para verificar a presença e quantidade dos possíveis elementos químicos causadores do fenômeno da eflorescência.

Para uma melhor compreensão da metodologia aplicada no presente trabalho, foi elaborado um fluxograma geral do processo, desde a confecção das formulações até as análises dos componentes químicos, assim como mostra a Figura 8:

**Figura 8** – Fluxograma da metodologia aplicado no trabalho.



Fonte: Autor, (2019).

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

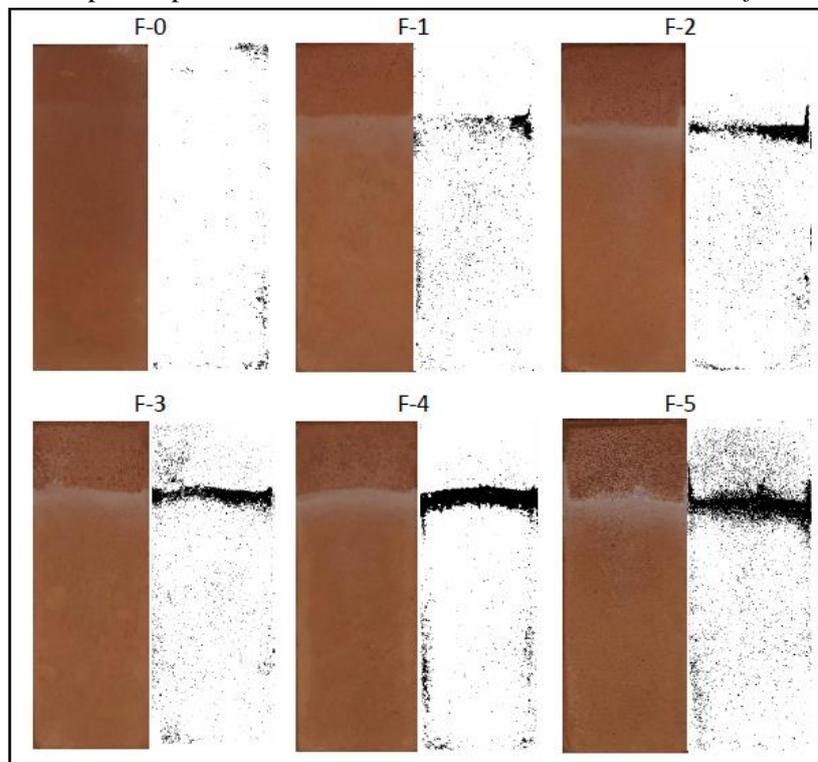
### 5.1 QUANTIFICAÇÃO DAS EFLORESCÊNCIAS FORMADAS POR MEIO DO SOFTWARE IMAGE J

Os corpos de prova sinterizados em temperaturas mais elevadas, formaram menos eflorescência em relação as peças queimadas em temperaturas mais baixas. Segundo Ferreira e Bergmann (2007), a temperatura de queima influencia diretamente na porosidade do material cerâmico, e um número maior de poros facilita a migração dos sais solúveis para a superfície do corpo cerâmico.

Em relação a adição da escória no material, influenciou diretamente na formação da eflorescência, quanto maior a quantidade do resíduo presente no corpo de prova, maior a detecção da patologia, isto ocorre devido a escória conter teores de cálcio e potássio em sua composição, tais elementos contribuem diretamente na formação do fenômeno (Bauer, 2007).

Na questão estética, as peças com elevadas adições de escória, ficaram levemente mais escuras em relação as peças sem o resíduo. As Figuras 9, 10 e 11 mostram os corpos de prova e suas respectivas análises no *software Image J*.

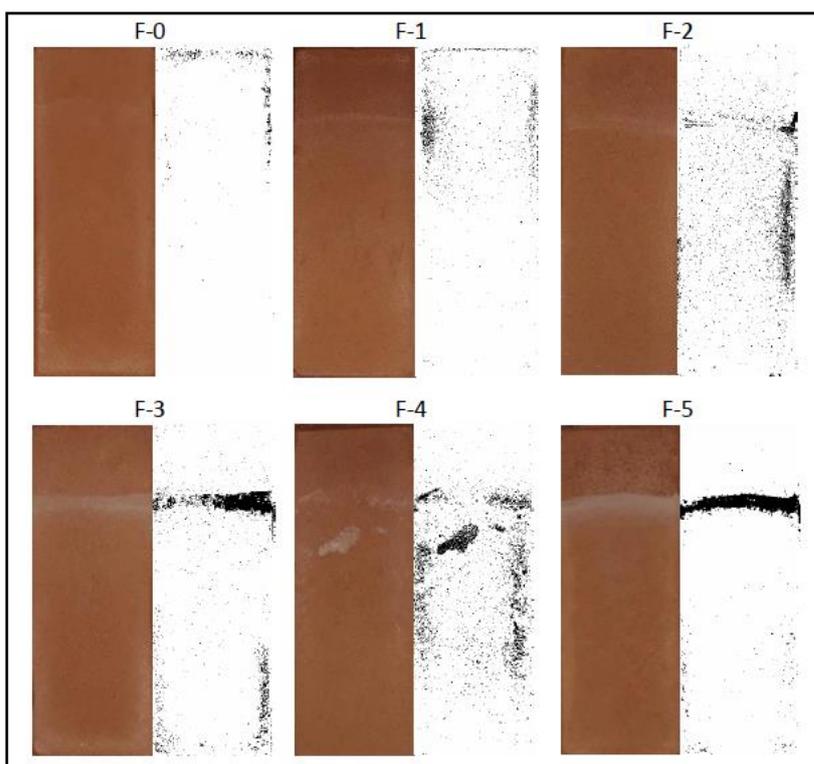
**Figura 9** – Corpos de prova sinterizados a 700 °C e suas análises no *software Image J*.



Fonte: Autor, (2019).

Análises para quantificação das eflorescências formadas nos corpos de prova sinterizados à 700 °C, as peças denominadas como F-0, F-1, F-2, F-3, F-4 e F-5, correspondem as porcentagens de escória do alto-forno presente em cada amostra, respectivamente 0, 10, 15, 20, 25 e 30% de escória em peso. Os pontos pretos representam as eflorescências formadas, observa-se uma crescente formação da patologia, a medida em que aumentam as quantidades do resíduo incorporado.

**Figura 10** – Corpos de prova sinterizados a 800 °C e suas análises no *software Image J*.

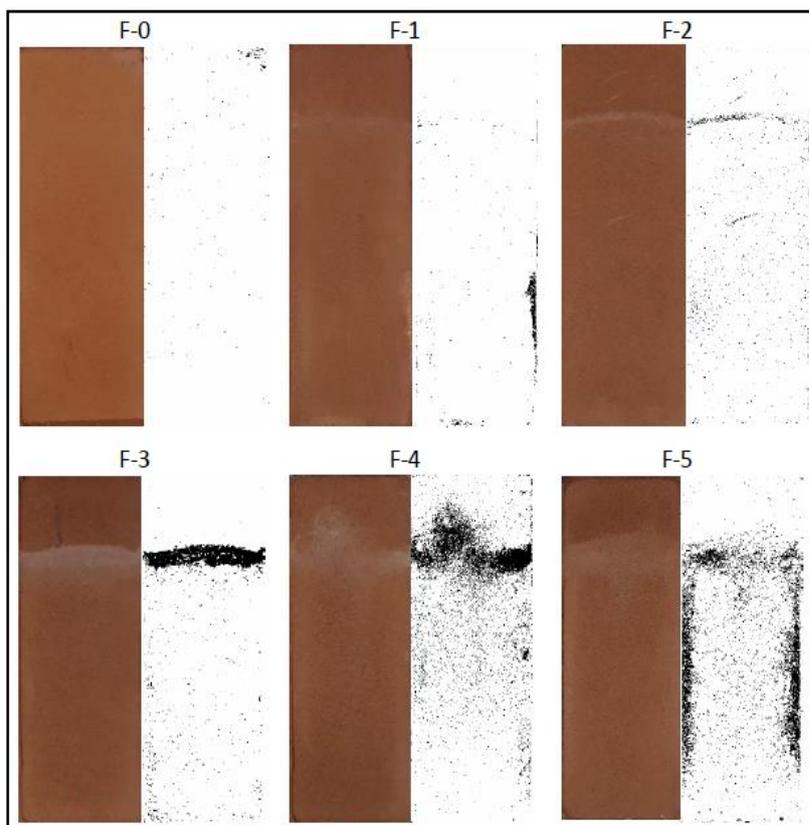


**Fonte:** Autor, (2019).

Imagem dos corpos de provas e suas análises no *software Image J*. Como na Figura 9, a medida em que aumentou a quantidade de escória nas peças, maior a quantidade de eflorescência detectada pelo software, porém, devido a temperatura de queima ser mais elevada, menor foi a formação da patologia quando comparadas com a Figura anterior.

Quando a temperatura de sinterização é maior, a microestrutura apresenta capilares de menor diâmetro, poros não interconectados, menor absorção de água e conseqüentemente uma maior quantidade de sais insolubilizados, seja por estarem em sua fase vítrea ou por terem reagidos com outros constituintes do material cerâmico, formando compostos não solúveis em água, impossibilitando que a água leve uma grande quantidade de sais para as superfícies do corpo de prova (CASTRO, 2017).

**Figura 11** – Corpos de prova sinterizados a 900 °C e suas análises no *software Image J*.



**Fonte:** Autor, (2019).

Análise por *Image J* nos corpos de prova sinterizados á 900 °C. A formação da efluorescência continuou seguindo o padrão de aumentar de acordo com os acréscimos do resíduo. Devido a uma temperatura de queima mais elevada, o surgimento do fenômeno foi menor que nas demais amostras sinterizadas a temperaturas amenas, com exceção das formulações F-3, F-4 e F-5, no qual, este parâmetro não prevaleceu, provavelmente por uma distribuição não-uniforme do resíduo no corpo de prova.

A porosidade é um fator que interfere na formação da efluorescência e da capacidade de retenção de água do material. Os poros mais grossos contribuem melhor para transferir água aos capilares, em contrapartida, os poros finos limitam o transporte capilar. Assim, a maior porosidade faz com que os sais solúveis sejam facilmente mais transportados até a superfície do material cerâmico (Ferreira, Bergmann, 2007)

O *software Image J* possibilitou a quantificação da efluorescência dos corpos de prova, por meio da pixelização das imagens, com pontos pretos representando a patologia, resultando em valores expressos em porcentagens com relação ao valor da área total da amostra. Os resultados obtidos são expressos pela Tabela 4.

**Tabela 4** - Porcentagem de área indicativas de eflorescência detectadas nos corpos de prova.

Temperatura (°C)	Corpos de prova	Porcentagem de partículas (%)
700	F-0	1,74
	F-1	3,53
	F-2	6,23
	F-3	8,85
	F-4	8,90
	F-5	12,29
800	F-0	0,96
	F-1	2,75
	F-2	5,78
	F-3	6,11
	F-4	8,27
	F-5	10,40
900	F-0	0,44
	F-1	1,93
	F-2	3,98
	F-3	8,25
	F-4	11,37
	F-5	11,92

Fonte: Autor, (2019).

Todos os corpos de prova apresentaram formação de eflorescência. Nas peças com ausência do resíduo em sua composição, a temperatura foi o fator que influenciou diretamente na quantidade da patologia formada, com uma redução de 1,3% entre as peças sinterizadas à 700 e 900 °C. Para os corpos de prova com as adições da escória em suas formulações, o resíduo contribuiu para um acréscimo no surgimento da eflorescência, quanto maiores os teores do aditivo, maior a formação da patologia na cerâmica, devido a escória conter a presença de cálcio e potássio em sua composição. As Tabelas 5, 6 e 7, apresenta os resultados dos parâmetros de retração linear, absorção de água, porosidade e densidade aparente.

**Tabela 5** – Média dos resultados das caracterizações tecnológicas das peças sinterizadas à 700 °C.

CORPOS DE PROVA (700°C)	RETRAÇÃO LINEAR (%)	ABSORÇÃO DE ÁGUA (%)	POROSIDADE APARENTE (%)	DENSIDADE APARENTE (g/cm <sup>3</sup> )
F-0	0,4	15,21	33,86	1,85
F-1	0,37	13,77	30,37	1,91
F-2	0,36	13,01	29,73	1,92
F-3	0,35	12,66	28,23	1,98
F-4	0,32	11,69	27,24	2,02
F-5	0,32	11,14	25,68	2,05

Fonte: Autor, (2019).

Houve retração linear, normal nos materiais cerâmicos quando submetidos a sinterização, devido a eliminação total da umidade e da matéria orgânica quando presente. Observava-se uma leve redução na retração, na medida em que se elevam as proporções de escória nos corpos de prova, isso é devido à argila geralmente conter material orgânico que é eliminado durante a queima, e quanto menor for a proporção de argila, menos matéria orgânica é eliminada e consequentemente a retração linear será menor (ALMEIDA, 2005).

Os índices da absorção de água e porosidade aparente são diretamente proporcionais, nos quais diminuiram gradualmente com as adições do resíduo. Isto pode ser explicado por dois fatores, granulometria do aditivo e o material orgânico presente na argila. Pelo fato da escória ter sido cominuída e peneirada na malha de 100 mesh (0,150 mm), concedeu uma melhor compactação aos corpos de prova, e como citado anteriormente, a adição do resíduo diminui os teores de material orgânico, tais fatores diminuiram a porosidade das peças, e consequentemente reduziu a absorção de água.

A densidade aparente aumentou com as adições da escória, este resultado foi totalmente esperado, pois houve diminuição da porosidade, que é inversamente proporcional à densidade.

**Tabela 6** – Média dos resultados das caracterizações tecnológicas das peças sinterizadas à 800 °C.

CORPOS DE PROVA (800°C)	RETRAÇÃO LINEAR (%)	ABSORÇÃO DE ÁGUA (%)	POROSIDADE APARENTE (%)	DENSIDADE APARENTE (g/cm <sup>3</sup> )
F-0	0,43	14,04	33,15	1,86
F-1	0,40	12,76	28,17	1,93
F-2	0,38	12,28	27,22	1,96
F-3	0,37	11,68	26,13	2,00
F-4	0,35	11,15	24,88	2,03
F-5	0,34	10,57	23,44	2,09

Fonte: Autor, (2019).

**Tabela 7** – Média dos resultados das caracterizações tecnológicas das peças sinterizadas à 900 °C.

CORPOS DE PROVA (900°C)	RETRAÇÃO LINEAR (%)	ABSORÇÃO DE ÁGUA (%)	POROSIDADE APARENTE (%)	DENSIDADE APARENTE (g/cm <sup>3</sup> )
F-0	0,69	13,61	31,98	1,90
F-1	0,63	11,95	27,97	1,95
F-2	0,60	11,33	26,74	1,99
F-3	0,58	10,87	25,53	2,02
F-4	0,57	10,02	23,82	2,07
F-5	0,54	9,47	22,13	2,12

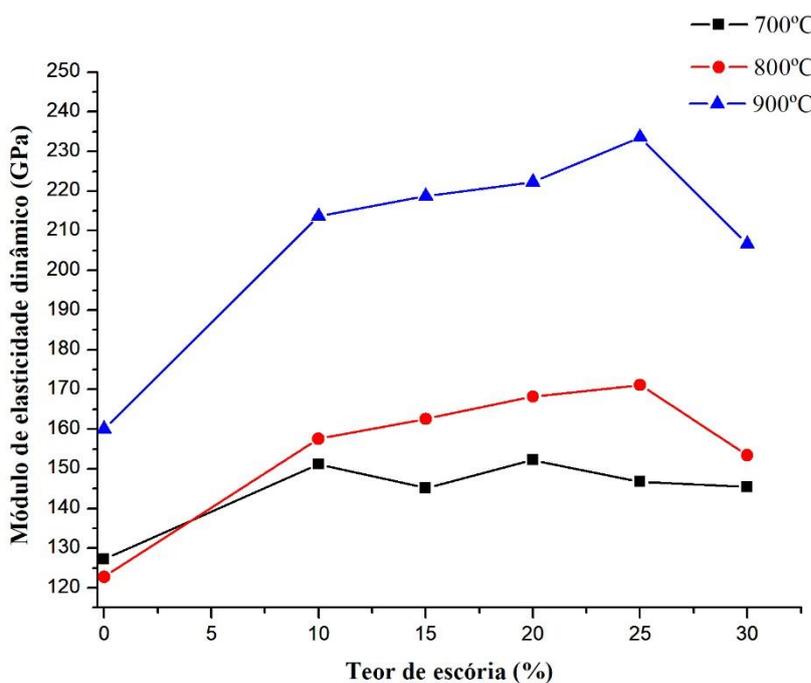
Fonte: Autor, (2019).

Para as tabelas 6 e 7, o aumento da temperatura de sinterização influenciou diretamente nos resultados das caracterizações tecnológicas, concedendo uma maior retração linear, menor absorção de água e porosidade aparente, resultando em um leve acréscimo na densidade aparente.

## 5.2 MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO E RESISTÊNCIA A FLEXÃO

O módulo de elasticidade dinâmico é obtido por ensaio não destrutivo, no presente trabalho, utilizou-se um equipamento de captação acústica, onde o módulo elástico é determinado a partir da frequência de vibração. A Figura 12 apresenta o resultado das médias dos módulos de elasticidade de cada formulação e suas variadas temperaturas.

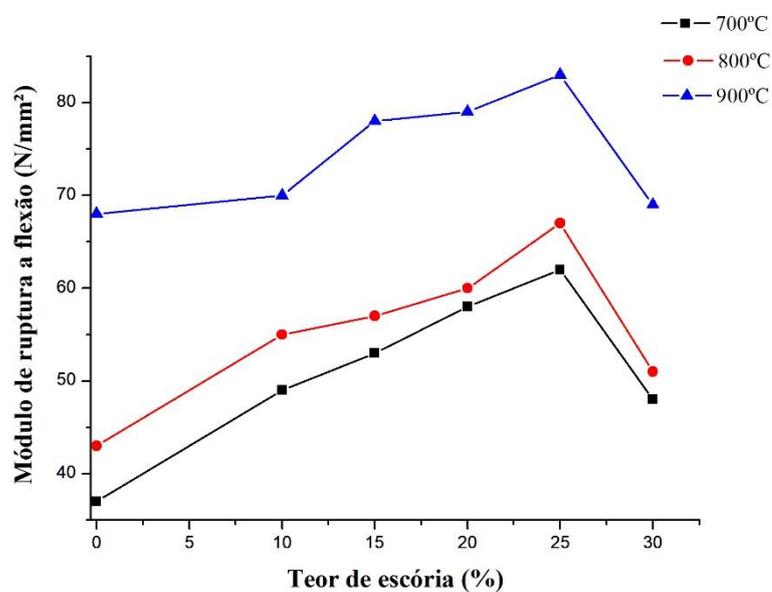
**Figura 12** – Módulo de elasticidade dinâmico em função do teor de resíduo.



**Fonte:** Autor, (2019).

Os valores dos módulos de elasticidade aumentaram com temperaturas de sinterização maiores, isto ocorre devido a redução da porosidade que a peça sofre quando submetida a temperaturas mais elevadas, poros e trincas reduzem a capacidade do material de se deformar elasticamente sem se romper (ALMEIDA, 2005).

**Figura 13** – Módulo de ruptura à flexão em função do teor de resíduo.



Fonte: Autor, (2019).

Os resultados para o módulo de ruptura à flexão dos corpos de prova, os valores foram aumentando de acordo com os acréscimos na temperatura de queima. Para formulação F-0 sinterizada a 700 °C obteve-se uma média do módulo de ruptura à flexão de 37 N/mm<sup>2</sup>, com a queima a 800 °C, a média subiu para 43 N/mm<sup>2</sup>, e por fim, utilizando uma temperatura de 900 °C, o valor obtido foi de 68 N/mm<sup>2</sup>.

Quando aplicada uma temperatura de queima elevada, a microestrutura apresenta capilares de menor diâmetro e poros não interconectados, tais fatores concedem ao material cerâmico uma maior resistência mecânica (ALMEIDA, 2005). A partir deste enunciado, justifica os valores maiores do módulo de ruptura à flexão para as peças sinterizadas à 900 °C.

Observa-se que a medida em que se elevam as adições de escória, maiores são os valores do módulo de ruptura à flexão. A característica mais importante da Escória Granulada de Alto-Forno é sua capacidade hidráulica potencial, permitindo, quando moída e em contato com a água, ela adquire propriedade cimentante e endurece, podendo substituir o clínquer, material utilizado tradicionalmente na fabricação de cimentos (ARCELOMITTAL, 2015). Este endurecimento juntamente com uma melhor compactação dos corpos de prova devido os finos da escória moída, concedeu até certo ponto um acréscimo na resistência mecânica da cerâmica. Quando adicionada em excesso, como nas peças com 30% do resíduo, o módulo de ruptura à flexão sofreu uma redução considerável, provavelmente por enrijecer demais o material reduzindo a sua resistência a flexão.

### 5.3 CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DOS FILTRADOS DOS EXTRATOS

A condutividade elétrica foi obtida pela análise por condutivímetro dos filtrados dos extratos de saturação dos corpos de prova, a partir destes resultados, calculou-se as porcentagens de sais presentes. A Tabela 8 aponta esses valores.

**Tabela 8** – Porcentagem de sais solúveis diluídos nos filtrados dos extratos.

<b>Formulação</b>	<b>Condutividade Elétrica (dS/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>PS (ml)</b>	<b>% Sais</b>
F-0	0,0128	1000	0,015
F-1	0,0301	1000	0,032
F-2	0,0470	1000	0,040
F-3	0,0635	1000	0,049
F-4	0,0802	1000	0,057
F-5	0,0933	1000	0,065

**Fonte:** Autor, (2019).

Quanto maior o valor da condutividade elétrica, maior é a presença de sais nos filtrados. A formulação F-0 apresentou o menor valor, enquanto a F-5 a maior quantidade de sais, comprovando a presença destes elementos na escória de alto-forno.

### 5.4 QUANTIFICAÇÃO DOS ÂNIONS SOLÚVEIS

A Tabela 9 apresenta os resultados das análises dos filtrados dos extratos de saturação dos corpos de prova com relação à presença de ânions solúveis.

**Tabela 9** - Valores quantitativos dos ânions solúveis presentes nos filtrados.

<b>Extrato de saturação</b>	<b>Cor do extrato</b>	<b>Sulfatos (ppm)</b>	<b>Cloretos (ppm)</b>	<b>Carbonatos (ppm)</b>	<b>Bicarbonatos (ppm)</b>
<b>F-0</b>	Amarelo	5,3	9,1	0	0
<b>F-1</b>	Amarelo	8,7	13,9	0	0
<b>F-2</b>	Amarelo	10,1	16,2	0	0
<b>F-3</b>	Amarelo	11,3	18,7	0	0
<b>F-4</b>	Amarelo	12,8	20,1	0	0
<b>F-5</b>	Amarelo	14,4	22,8	0	0

**Fonte:** Autor, (2019).

Os filtrados dos extratos solubilizados apresentaram nítida coloração amarela, observa-se que os cloretos se apresentaram em maior quantidade com relação aos sulfatos, aumentado de acordo com as adições do resíduo.

Tanto os carbonatos quanto bicarbonatos não apresentaram solubilidade em água em nenhuma dos filtrados, isso possivelmente deve-se ao fato de que esses compostos quando se trata da indústria cerâmica, provém em sua maioria da carbonatação da cal lixiviada da argamassa ou concreto além da baixa solubilidade em água desses sais (CASTRO, 2017). A Tabela 10 apresenta diversos elementos na forma oxida e quantitativa, detectada por meio de energia dispersiva de raios X (EDS).

**Tabela 10** - Caracterização microscópica da escória de alto-forno por EDS.

<b>Elementos</b>	<b>Quantidade (% peso)</b>
Oxigênio	46,438
Ferro	21,308
Cálcio	20,878
Silício	6,614
Alumínio	3,533
Titânio	0,733
Potássio	0,497

**Fonte:** Autor, (2019).

Os sulfatos e cloretos de forma geral, tendem a formar eflorescência por apresentarem maiores solubilidade em água, o que faz com que esses sais migrem para a superfície do material cerâmico em uma maior quantidade e de forma rápida a medida que o ciclo de umidade e secagem ocorre (CASTRO, 2017).

Analisando a tabela acima, verificamos a presença de grandes teores de Ca, que é um dos principais elementos causadores do fenômeno, além da presença do potássio em baixo teor. O cálcio quando na forma de cloreto, possui alta solubilidade em água, porém não tem a disposição para formar o desgaste cerâmico. Por outro lado, o sulfato de cálcio além de apresentar pouca solubilidade em água, possui uma alta temperatura de fusão e rápida formação de eflorescência, o cálcio ainda é um metal alcalino terroso e é indesejável em materiais cerâmicos devido a sua baixa solubilidade e alto ponto de fusão (CASTRO, 2017).

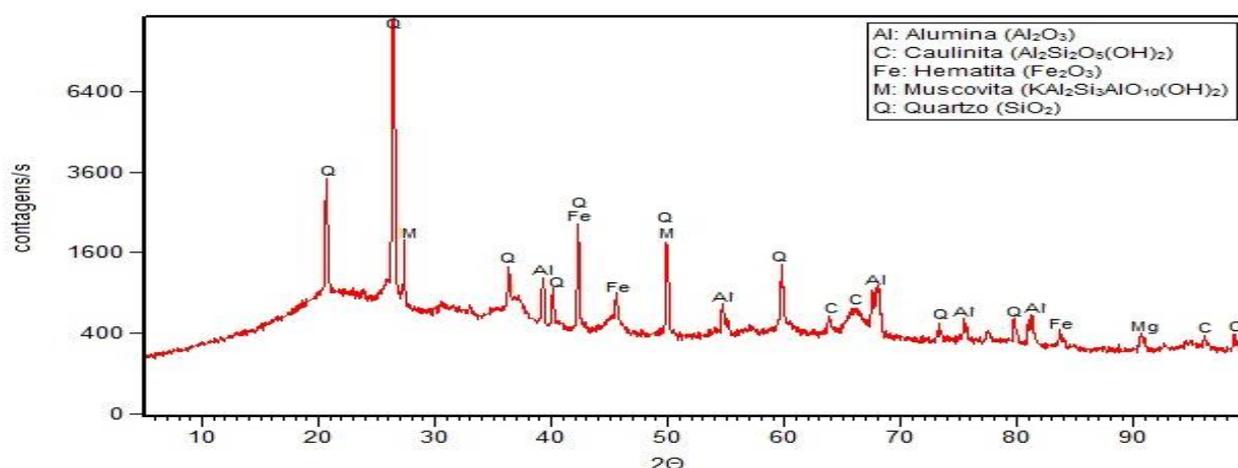
Segundo Bauer, 2007, o potássio pode se apresentar na forma de sais ou cloretos, apresentando alta solubilidade quando na forma de sulfato. Provavelmente a presença do cloro faz com que haja a formação de cloretos.

## 5.5 ANÁLISE MINERALÓGICA POR DIFRAÇÃO DE RAIOS X

### 5.4.1 Argila

Na análise por DRX das fases presentes na argila (Figura 14) não teve alteração incomum referente aos elementos comumente encontrados nesta matéria-prima. O quartzo, alumina e caulinita, foram as fases de maior predominância, e não foi detectado a presença de sais solúveis altamente formadores de eflorescência como o  $\text{CaSO}_4$  ou  $\text{KCl}$ , entre outros sais de mesma natureza agressiva.

**Figura 14** - Análise da composição argilosa por DRX.

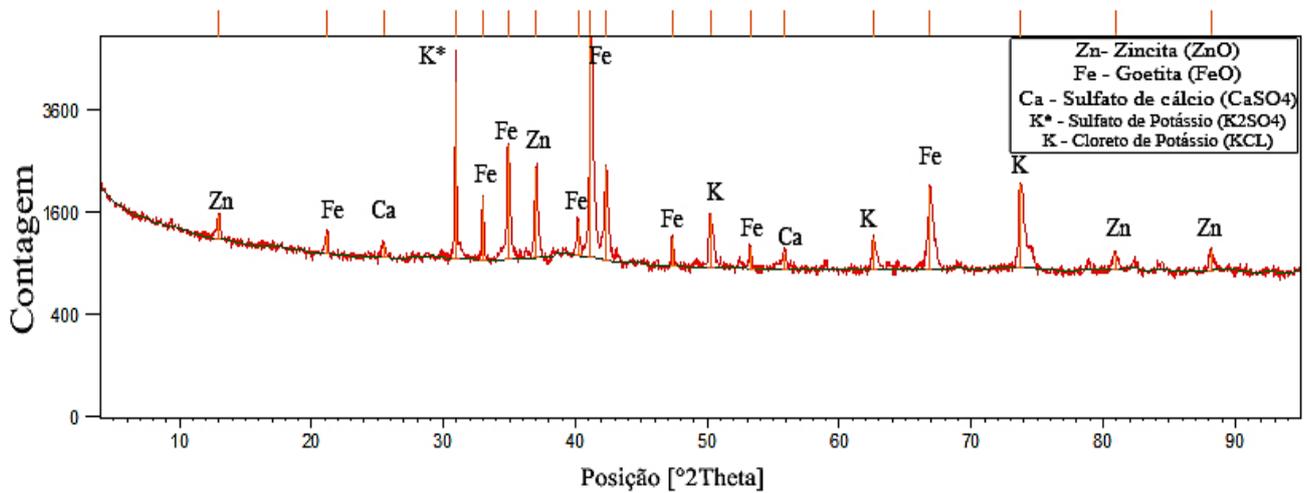


Fonte: Castro, (2017).

### 5.4.2 Escória do alto-forno

A análise por DRX dos compostos químicos presentes na escória de alto-forno, foram realizadas direcionando a identificação de elementos causadores da eflorescência, a Figura 15 apresenta os espectros gerados pela análise.

**Figura 15** - Análise por DRX da escória de alto-forno.



**Fonte:** Castro, (2017).

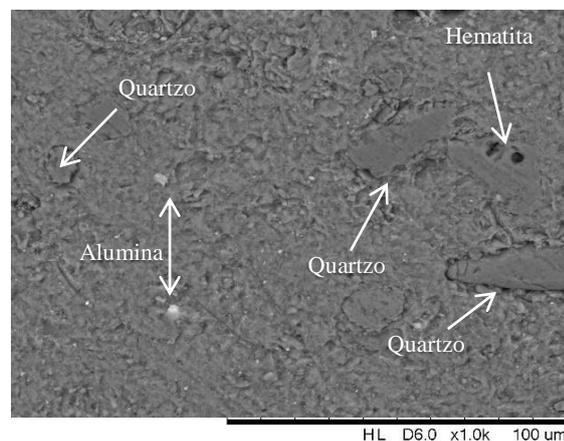
Observou-se a presença de sulfato de cálcio na amostra, este elemento é responsável por causar eflorescência nos materiais cerâmicos.

## 5.6 ANÁLISE MICROESTRUTURAL POR MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA (MEV) E ESPECTROSCOPIA POR DISPERSÃO DE ENERGIA (EDS)

### 5.5.1 Argila

A morfologia da composição da argila com suas respectivas fases, está representada na Figura 16. Nesta análise, foram identificadas as fases comuns às argilas, observando-se por meio do EDS a predominância dos elementos Silício, Alumínio e Ferro.

**Figura 16** - Morfologia da argila - (a) 1 mm (b) 200 µm (c) 100 µm.



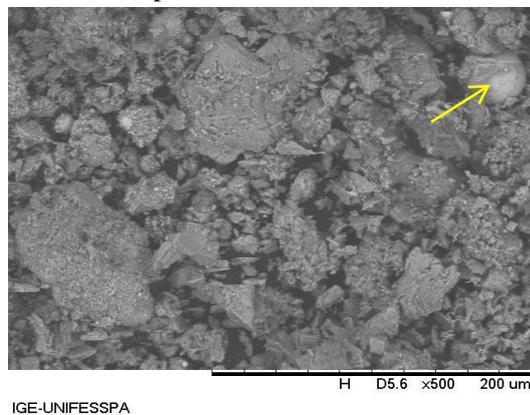
**Fonte:** Castro (2017)

A argila apresentou baixos índices de sais solúveis que poderiam vir a ter a disposição de formar eflorescência, explicando a pouca formação dessa patologia nos corpos de provas sem adição do resíduo.

### 5.5.2 Análise por MEV da escória do alto-forno

A escória de alto-forno apresentou uma coloração acinzentada após ser moída, isto ocorre devido o resíduo se tornar essencialmente amorfo quando moídos a pó.

**Figura 17** – Análise por MEV da escória de alto-forno.



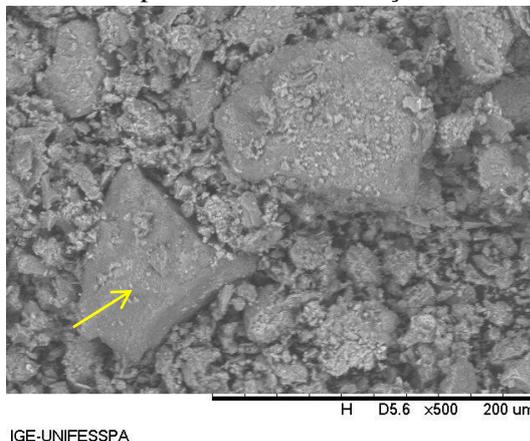
**Fonte:** Autor, (2018).

A fase marcada com seta amarela aponta para a existência de Cálcio.

### 5.5.3 Corpos de prova

A Figura 18 mostra o resultado do MEV do corpo de prova F-3 sinterizados a 900 °C, o mesmo foi moído para realização da análise. Pode-se identificar as fases mineralógicas formadas.

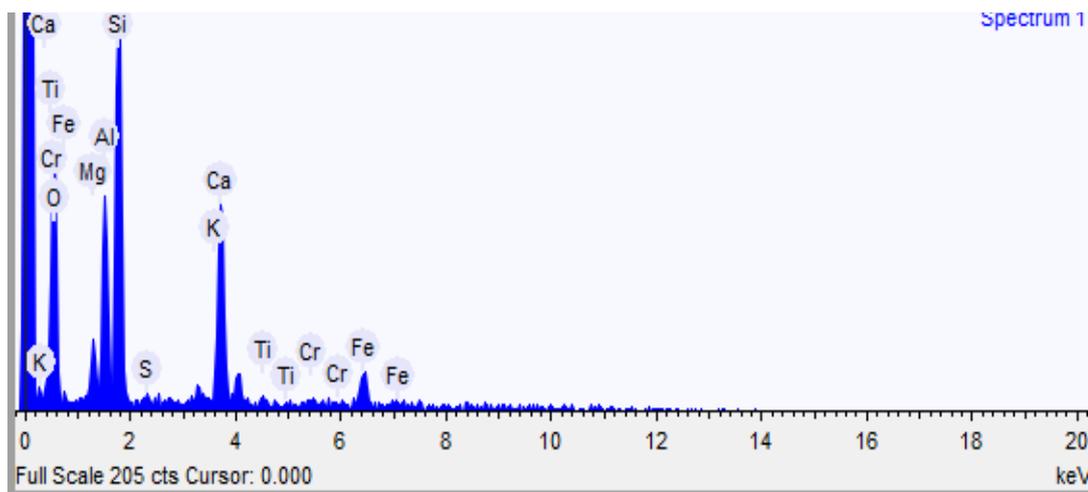
**Figura 18** – Análise por MEV da formulação F-3 900 °C.



**Fonte:** Autor, (2018)

O corpo de prova F-3 foi analisado por MEV (Figura 18), a seta amarela indica a presença de quartzo proveniente da argila. Analisou-se também pela Espectroscopia por Dispersão de Energia (Figura 19), esta última com o objetivo de identificar e estimar os elementos químicos com maior predominância na área de formação da eflorescência.

**Figura 19** - Espectro dos elementos presentes no F-3 900 °C.



**Fonte:** Autor, (2018).

Esse espectro possui em sua grande maioria a presença de Cálcio, Silício, Ferro, Oxigênio e Carbono, o que pode comprovar a formação de sulfato de cálcio, responsável pela quantidade elevada e rápida da formação de eflorescência.

Os sulfatos de cálcio ( $\text{CaSO}_4$ ) é uma das impurezas que com mais frequência formam sais de secador e é indesejável pela facilidade com que se transforma em eflorescências permanentes de forno. Possivelmente, a água que possuem os materiais cerâmicos em estado plástico, ao evaporar, transporta até a superfície uma parte dos sais solúveis que a escória de alto-forno contém (CASTRO, 2017).

Segundo MONTEIRO (2009), e seu estudo realizado sobre a formação da eflorescência em telhas e constatou que o sulfato de cálcio foi o principal causador da patologia em questão, que possivelmente é a mesma questão no caso de formulação argilosa agregada a escória de alto-forno.

Todos os sais solúveis que existem no resíduo tendem a ser mobilizados na direção da superfície, os sais alcalinos terrosos são os mais problemáticos, pois tem elevados pontos de fusão, como por exemplo o  $\text{CaSO}_4$ . Segundo Verduch e Solana 2000, os sais originam, pela reação com os componentes da argila, produtos não fusíveis na temperatura de queima dos materiais cerâmicos. Estes produtos constituem eflorescências permanentes de forno,

perfeitamente visíveis. Os sais alcalinos por ser bastante solúveis são muito mobilizáveis pela água e durante a queima fundem com facilidade e não acusam problemas de eflorescências de forno (VERDUCH e SOLANA, 2000).

A Tabela 11 apresenta a porcentagem dos elementos principais e com maior incidência detectada por EDS em todos nos corpos de prova com resíduo.

**Tabela 11** – Elementos encontrados nas amostras com adições de escória.

ELEMENTOS	QUANTIDADE (% PESO)
OXIGÊNIO	48,879
SILÍCIO	16,344
CÁLCIO	15,153
FERRO	7,689
ALUMÍNIO	7,508
MAGNÉSIO	2,039
TITÂNIO	0,971
CROMO	0,662
POTÁSSIO	0,474
ENXOFRE	0,282

**Fonte:** Autor, (2019).

A Tabela 11 apresenta a média de todos os elementos identificados pelo EDS de todos os corpos de prova com adição da escória, e seus teores em peso. Foram identificados elementos causadores de eflorescência como cálcio e enxofre, e demais elementos que reagem com a argila e formam fases que em determinadas condições contribuem para a formação da patologia, como citado no parágrafo acima.

## 6. CONCLUSÕES

- A adição do resíduo aumentou a quantidade da patologia formada, porém concedeu aos corpos de provas um acréscimo considerável no módulo de ruptura à flexão, atingindo uma média de aproximadamente 30% no aumento da resistência. Possibilitando reduzir a temperatura de queima sem comprometer a resistência final do material, como observado nos resultados dos corpos de prova com adição do resíduo sinterizados à 700 °C, no que resultaria em uma economia energética;
- A variação da temperatura de sinterização influenciou diretamente na quantidade de eflorescência formada e na resistência mecânica da cerâmica;
- As formulações com adições da escória ficaram levemente mais escuras, ou seja, não teve problema relacionado a parte estética do material, tendo uma boa aceitação do consumidor;
- A quantificação da eflorescência por meio do *software Image J* possibilitou resultados mais precisos em relação a inspeção apenas visual, no qual a peça F-0 sinterizada a 900 °C formou a menor quantidade de eflorescência 0,44%, e o corpo de prova F-5 sinterizado a 700 °C formou o maior teor da patologia 12,29%. A análise dos filtrados dos extratos de solubilização foi de suma importância para a quantificação geral dos sais solúveis presentes na escória de alto-forno;
- Foi detectado um aumento nos teores de cloretos e sulfatos no filtrado dos extratos das peças contendo o resíduo, porém, não foram detectados bicarbonatos e carbonatos;
- A partir da caracterização das fases e componentes químicos das matérias primas e corpos de prova, possibilitou a identificação de elementos causadores da eflorescência como Cálcio, Potássio e Enxofre.

## **7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

1. Realizar ensaios mecânicos e de eflorescência em escala piloto no material cerâmico com adições de escória do alto-forno.
2. Confeccionar tijolos de tamanho comercial e expô-los a intempéries sob ambiente natural por um tempo mínimo pré-determinado, para avaliar a resistência da cerâmica com e sem a formação da eflorescência, afim de entender melhor a influência deste fenômeno na resistência mecânica do material.

## REFERÊNCIAS

FERREIRA, C. C.; BERGMANN, C. P. **Formação da eflorescência em cerâmica vermelha: fatores de influência no transporte dos íons  $SO_4^{2-}$  e  $Ca^{2+}$** . *Cerâmica* 57, p. 356-363, 2007.

MENEZES, R. R. et al. Sais solúveis e eflorescência em blocos cerâmicos e outros materiais de construção – revisão. **Revista Cerâmica**, v. 52, p. 37-49.2006.

ROCHA, A. **Incorporação de pó de despoejamento em cerâmica vermelha.**, 57 f. Trabalho de conclusão de curso. Faculdade de Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Pará, Marabá-PA, 2013.

American Association State Highway and Transportation Officials Standard. **ASTM C67-14: Standard Test Methods for Sampling and Testing Brick and Structural Clay Tile**. West Conshohocken, United States, 2014.

RIZZO, E. M. da S., **Introdução aos processos de refino primário dos aços nos fornos elétricos a arco**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, 2009.

CHIAVERINI, VICENTE. **Tecnologia mecânica**. Processos de fabricação e tratamento, vol. II, 2ª edição, 1986.

ACERLORMITTAL TUBARÃO. **Escória granulada de alto-forno**, 2017. <http://www.tubarao.arcelormittal.com/produtos/coprodutos/escoria-granulada-alto-forno/index.asp>, 20 de janeiro de 2019 as 19:30 h.

JUNGINGER, M.; MEDEIROS, J. S. **Ação da eflorescência de carbonato de cálcio sobre o vidrado de placas cerâmicas**. Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 9, Foz do Iguaçu, Anais, Foz do Iguaçu: ENTAC, 2002.

CAMPOS FERNANDES, P. **Estudo sobre a influência do massará no processo de formação de salitre em rebocos na região de Teresina-Pi**. 2010, 72 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.

VERDUCH. A. Garcia; SOLANA, V. Sanz. **Formação de eflorescências na superfície dos tijolos**. *Cerâmica Industrial*, São Paulo, v. 5, n. 5, p. 38-46, set./out. 2000. Disponível em: [http://www.ceramicaindustrial.org.br/pdf/v05n05/v5n5\\_6.pdf](http://www.ceramicaindustrial.org.br/pdf/v05n05/v5n5_6.pdf). Acesso em: 16 de novembro de 2018 às 21h40min.

ALMEIDA, A. S.; CABRAL, M.J.; MOTTA, J.F.M.; TANNO, L. C.; **Argilas para Cerâmica Vermelha**. Rochas e Minerais Industriais . São Paulo, SP. 2005.

RIBEIRO, M. J. et al. Aspectos fundamentais sobre a extrusão de massas de cerâmicas vermelhas. **Cerâmica Industrial**, v. 8, n. 1, p. 37-42, 2003.

CLAESSEN, E.C; OLIVEIRA BARRETO, W. **Manual de métodos e análise de solos**, 2 ed. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Rio de Janeiro, 1997.

CASTRO, M. A.; **Reaproveitamento do resíduo siderúrgico pó de despeiramento em tijolos de vedação**. 70 f. Trabalho de conclusão de curso. Faculdade de Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Pará, Marabá-PA, 2017.

Associação Brasileira de Normas Técnicas: **NBR 10.006. Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos**. Segunda Edição. 2004

BOWLER GK, FISHER K. **Soluble salt analysis and indexation of sulphation risk**. Masonry Int. – J. Br. Masonry Soc. 1989;3(2):62–7.

CHWAST, J., TODOROVIC, J., JANSSEN, H., ELSEN, J., **Gypsum efflorescence on clay brick masonry: Field survey and literature study**. *Construction and Building Materials*. Edição 85, páginas 57–64, 2015. Acessado em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095006181500330X>, 12 de novembro de 2018 as 22:35 h

FAY, LILIANA. **Aproveitamento de resíduos siderúrgicos para a fabricação de elementos construtivos para alvenarias na construção civil**. 2006. 233 f. Tese de Pós Graduação (Doutorado)- Corpo Docente da Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

GONZAGA, L. B.; **Análise da formação de eflorescência nos blocos cerâmico em Russas-CE**. 51 f. Trabalho de conclusão de curso. Departamento de Ciências Exatas e Naturais, Universidade Federal Rural do Semiárido Mossoró - RN, 2013.

MONTEIRO, C. M.; **Influência da gipsita no surgimento de eflorescência em telhas cerâmicas**. 2009. 77 f. Dissertação (Mestrado em Processamento de Materiais a partir do Pó; Polímeros e Compósitos; Processamento de Materiais a part) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2009.

SANTOS, P. H. C. e FILHO, A. F. S. **Eflorescência: Causas e Consequências**. 2008. Disponível em: [http://info.ucs.br/banmon/Arquivos/ART\\_130109.pdf](http://info.ucs.br/banmon/Arquivos/ART_130109.pdf) Acesso em: 16/11/2016 às 15h52min.

SOUZA SANTOS P. **Ciência e tecnologia de argilas**. São Paulo: Edgard Blucher; 1989.

STEIGER M, HERITAGE A. **Modelling the crystallisation behaviour of mixed salt systems: input data requirements**. In 12th International Congress on the Deterioration and Conservation of Stone; 2012

TARDY, P J. MEZEI – **Situation and Tasks of Waste Treatment in the Hungarian Steel Industry – Global Symposium on Recycling, Waste Treatment and Clean Technology – REWAS’99**, TMS, 1999, vol. II, pp.1565-1574

UEMOTO, Kai Loh. **Patologia: danos causados por eflorescência**. In: Centro de Documento da Divisão de Edificações do IPT (Coord.). Tecnologia de Edificações. São Paulo: PINI, 1988. P. 561 - 564

**ANEXO A – TRABALHOS PUBLICADOS E DIVULGADOS EM EVENTOS**

**COSTA, F.G.;** CASTRO, M.A M.; LUZ, D.S.; FAGURY NETO, E.; RABELO, A.A..  
Avaliação da formação de eflorescência na composição de argila e pó de despoejamento antes e após o processo de lavagem do resíduo. In: VI Semana de Engenharia de Materiais, 2017, Marabá.

**COSTA, F.G.;** CASTRO, M.A M.; LUZ, D.S.; FAGURY NETO, E.; RABELO, A.A..  
Estudo de sais solúveis e eflorescência na incorporação de pó de despoejamento em cerâmica vermelha. In: 22° CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2016, Natal. Anais do 22° Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2016.