



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

FIAMA GOMES DA COSTA

**AVALIAÇÃO DE EFLORESCÊNCIA EM CERÂMICA VERMELHA COM ADIÇÃO
DO RESÍDUO SIDERÚRGICO PÓ DE DESPOEIRAMENTO ANTES E APÓS
PROCESSO DE LAVAGEM**

MARABÁ - PA
2017

FIAMA GOMES DA COSTA

**AVALIAÇÃO DE EFLORESCÊNCIA EM CERÂMICA VERMELHA COM ADIÇÃO
DO RESÍDUO SIDERÚRGICO PÓ DE DESPOEIRAMENTO ANTES E APÓS
PROCESSO DE LAVAGEM**

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
2017

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

Biblioteca II da UNIFESSPA. CAMAR, Marabá, PA

Costa, Fiana Gomes

Avaliação de eflorescência em cerâmica vermelha com adições do resíduo siderúrgico pó de despoejamento antes e após processo de lavagem / Fiana Gomes Costa; orientador, Adriano Alves Rabelo. — 2017.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Campus Universitário de Marabá, Instituto de Geociências e Engenharias, Faculdade de Engenharia de Materiais, Curso de Engenharia de Materiais, Marabá, 2017.

1. Reaproveitamento (sobras, refugos, etc.). 2. Resíduos industriais - Reaproveitamento. 3. Cerâmica. I. Rabelo, Adriano Alves, orient. II. Título.

CDD: 23. ed.: 363.7282



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

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

As dezesseis horas do dia catorze do mês de março do ano de dois mil e dezessete, na cidade de Marabá no Estado do Pará, reuniu-se a Banca Avaliadora composta pelos professores: Professor. Dr. Adriano Alves Rabelo (Orientador), Professora Dr. Eng. Giselle Barata Costa (Membro), Professor Dr. Eng. Silvio Alex Pereira da Mota (Membro), Professor Jailes de Santana Moura (Membro), para assistirem a defesa do Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) intitulado “Avaliação de eflorescência em cerâmica vermelha com adição do resíduo siderúrgico pó de despoeiramento antes e após processo de lavagem” de autoria da discente **Fiana Gomes da Costa**, matrícula 201240606002. Após a apresentação e arguição a respeito da monografia, ficou definido a atribuição do conceito EXC ao referido trabalho. Desta forma corroborada a defesa a ata foi lavrada e assinada pelos membros da Banca Avaliadora.

Membros da Banca Avaliadora:

Prof. Dr. Adriano Alves Rabelo
(FEMAT – IGE – UNIFESSPA – Orientador)

Prof. Jailes Santana Moura
(FEMAT – IGE – UNIFESSPA – Membro)

Prof. Dr. Giselle Barata Costa
(FEMAT – IGE – UNIFESSPA – Membro)

Prof. Dr. Silvio Alex Pereira da Mota
(FEMAT – IGE – UNIFESSPA – Membro)

Dedico este trabalho a meus pais, que nunca mediram esforços para realização desta etapa em minha vida.

AGRADECIMENTOS

A Deus. A meus pais, pela educação, dedicação, compreensão e apoio por lutarem junto comigo pela realização dos meus sonhos.

A todos os meus familiares, em especial à minha irmã por sempre me ouvir e me ajudar em todos os momentos, à minha prima Carolina Santos por me dá conselhos, dividir experiências e me estimular a lutar pelo os meus sonhos. Ao meu orientador por me auxiliar da melhor maneira possível. Aos professores Fábio Gonçalves, Márcio Mafra e Silvio Mota por terem me ajudado em análises fundamentais para este trabalho. À Sinobras por fornecerem resultados necessários para este trabalho.

A todos os meus colegas da turma FEMAT 2012, pela parceria e convívio durante os cinco anos de curso. Aos meus amigos Hilbenária Mercedes, Paulo César, Wilker Costa e Wirland Melo por todos os momentos, experiências, conselhos e cooperação. Ao meu amigo Mário Andrean pelos 2 anos de parceria enquanto bolsistas, além de toda a troca de conhecimento. À psicóloga Fernanda Vilarino e Dr. Fernando Monteiro por terem me ajudado e me orientado em momentos difíceis. Aos meus amigos de escola Danyelle Guimarães e Hatus Almeida por sempre estarem presentes e dispostos a trocarem pensamentos.

A todos os professores da Faculdade de Engenharia de Materiais que contribuíram para minha formação profissional.

É bom manter algumas coisas para si mesmo, é bom manter as próprias questões definidas.

Florence Welch

RESUMO

Eflorescências são depósitos salinos que se formam na superfície de materiais cerâmicos, resultantes da migração e posterior evaporação de soluções aquosas salinizadas. Os sais solúveis que dão origem as eflorescências podem estar presentes na composição das matérias-primas, nos materiais de construção, na água existente no subsolo, etc. e são os principais agentes da degradação de materiais cerâmicos porosos. Sabe-se que o setor siderúrgico gera uma diversidade de resíduos sólidos e a produção de aço está obrigatoriamente vinculada à acumulação de uma grande quantidade de rejeitos e dentre estes, o pó de despoeiramento, gerado em forno elétrico a arco, representa um dos maiores problemas pelo seu conteúdo em metais pesados emitidos na atmosfera durante a fabricação do aço. No presente trabalho, com o fim de se reaproveitar o rejeito em questão e estudar o seu comportamento quanto a formação da eflorescência, foram confeccionadas amostras cerâmicas com adições do resíduo “pó de despoeiramento” de aciaria antes e após processo de lavagem em um teor de 25% em peso e sinterizado à 950 °C, 1000 °C e 1050 °C durante 2 h. As amostras foram parcialmente imersas em água destilada por sete dias para verificar a formação de eflorescência. A partir dos extratos solubilizados, foi quantificada a condutividade elétrica dos sais e a presença de ânions solúveis. Fizeram-se MEV, DRX e FRX na argila e no resíduo na sua forma original e lavado, além dos corpos de prova que foram analisados por MEV. O processo de lavagem e o aumento da temperatura fez com que os corpos de prova com o pó de aciaria lavado apresentassem menor formação visual de eflorescência se comparado ao rejeito em sua forma original. Constatou-se que o sulfato de cálcio pode ser um dos principais responsáveis pela formação dessa patologia.

Palavras-chave: Eflorescência, Pó de aciaria, Sais solúveis, Cerâmica vermelha.

ABSTRACT

Efflorescences are saline deposits that form on the surface of ceramic materials, resulting from the migration and subsequent evaporation of saline aqueous solutions. The soluble salts that give rise to efflorescence may be present in the composition of raw materials, building materials, underground water, etc. and are the main agents for the degradation of porous ceramic materials. It is known that the steel industry generates a diversity of solid waste and steel production is bound to the accumulation of a large quantity of tailings, among them, the dedusting powder generated in an electric arc furnace dust represents one of the major problems by their content in heavy metals emitted into the atmosphere during the manufacture of steel. In the present work, in order to reuse the waste in question and study its behavior regarding the formation of efflorescence, ceramic samples were prepared with additions of the "dedusting powder" residue of steelworks before and after the washing process in a content of 25% by weight and sintered at 950 ° C, 1000 ° C and 1050 ° C for 2 hours. The samples were partially immersed in distilled water for seven days to verify the formation of efflorescence. From the solubilized extracts the electrical conductivity and the presence of soluble anions were determined. The residue was analyzed in its original form and washed by SEM and XRD, in addition to the specimens that were analyzed by SEM. The washing process and the increase of the temperature caused that the specimens with the washed steel powder presented visual decreases in the formation of efflorescence when compared to the reject in its original form. It was found that calcium sulfate may be one of the main responsible for the formation of this pathology.

Keywords: Efflorescence, Steel powder, Soluble salts, Red ceramics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxo de produção de um aço englobando vários processos utilizados	19
Figura 2 - Esquema do FEA	20
Figura 3 - Emissão de pós durante o vazamento de aço em forno elétrico	22
Figura 4 - Visão esquemática de uma massa de argila - água em gradativos estágios da secagem.	30
Figura 5 - Evaporação de água de uma massa argilosa úmida. (a) evaporação de água na película líquida superficial. (b) evaporação na boca dos poros. (c) evaporação no interior dos poros e transporte de vapor de água até a superfície.	31
Figura 6 - Efeito degradante da eflorescência	34
Figura 7 - Imersão dos corpos de prova como parte do ensaio de eflorescência	40
Figura 8 - Processo de lavagem a vácuo do resíduo siderúrgico.....	41
Figura 9 - Filtrados obtidos após as lavagens.....	42
Figura 10 - suporte metálico para fixação de câmera fotográfica e corpo de prova	43
Figura 11 - Formação da eflorescência no corpo de prova	45
Figura 12 - Fluxograma da metodologia adotada no trabalho.....	46
Figura 13 - Corpos de prova de composição somente argilosa nas temperaturas de 950°C (a), 1000°C (b) e 1050°C (c).....	47
Figura 14 - Formulação F4 sinterizada à 950, 1000 e 1050°C.....	48
Figura 15 - Parâmetros versus corpos de prova.....	51
Figura 16 - Análise da composição argilosa por DRX.....	55
Figura 17 - Análise do pó de despoeiramento antes da lavagem por DRX.....	56
Figura 18 - Análise do pó de despoeiramento após a lavagem por DRX	56
Figura 19 - Morfologia da argila - (a) 1 mm (b) 200 µm (c) 100 µm	57
Figura 20 - (a) pó de despoeiramento não lavado e (b) pó de despoeiramento lavado	58
Figura 21 - Pó de despoeiramento não lavado (a) 200 µm (b)100 µm (c) 30 µm.....	59
Figura 22 - Pó de despoeiramento lavado (a) 200 µm (b)100 µm (c) 30 µm	60
Figura 23 - Porcentagem de elementos presentes no rejeito siderúrgico antes e após lavagem	61
Figura 24 - Fase mista (2 mm).	62
Figura 25 - Área eflorescência (a) 200 µm (b)100 µm (c) 30 µm.....	63
Figura 26 - Espectro dos elementos presentes na área de desgaste.....	63
Figura 27 - Elementos detectados na área de desgaste.....	64

Figura 28 - Porcentagem em peso de O, Al, Si, Fe e Zn identificados nos corpos de prova ..	65
Figura 29 - Comparação entre as % de elementos na forma óxida no PDNL e PDL	67

LISTAS DE TABELAS

Tabela 1 - Fases mineralógicas dos principais elementos presentes em pó de fornos elétricos e conversores	24
Tabela 2 - Natureza química dos sais solúveis	26
Tabela 3 - Ação de diversos sais misturados com argilas que possuem ou não tendência a formar eflorescências.....	29
Tabela 4 - Formulações cerâmicas propostas com o resíduo pó de despoeiramento	37
Tabela 5 - Imagens obtidas dos corpos cerâmicos que apresentaram formação ou não de eflorescência processadas pelo software Image J.....	49
Tabela 6 - Porcentagem de partículas indicativas de eflorescência detectadas nos corpos de prova.	50
Tabela 7 - Porcentagem de sais solúveis diluídos nos extratos de saturação.	52
Tabela 8 - Valores quantitativos do ânions solúveis presentes no extrato de saturação.....	53
Tabela 9 - Caracterização microscópica do pó de despoeiramento por EDS.	54

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

DRX	Difração de raios X
EDS	Espectroscopia por dispersão de raios X
FEA	Forno elétrico a arco
L	Lavagem
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
Mg/L	Miligramas por litro
N	Normal
PAE	Pó de aciaria elétrica
PDL	Pó de despoeiramento lavado
PNDL	Pó de despoeiramento não lavado
SL	Sem lavagem

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
2. OBJETIVOS	18
2.1. OBJETIVO GERAL	18
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
3.1 PROCESSO DE OBTENÇÃO DO AÇO	19
3.1.2 Forno elétrico a arco	19
3.2 PÓ DE DESPOEIRAMENTO	20
3.2.1 Mecanismo de formação do pó de despoeiramento	23
3.2.2 Composição química e mineralógica de pós de aciaria	24
3.3 EFLORESCÊNCIAS EM MATERIAIS CERÂMICOS.....	25
3.3.1 Tipos de eflorescência formadas no material cerâmico	27
3.3.2 Eflorescências de secador	28
3.3.2.1 Dinâmica dos sais	30
3.3.2.2 Influência da velocidade de secagem	31
3.3.3 Eflorescências de forno	32
3.3.4 Efeitos e prevenção da eflorescência na alvenaria	33
3.4 ARGILA	34
4. MATERIAIS E MÉTODOS	35
4.1 MATERIAIS	36
4.2 METODOLOGIA PARA CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	37
4.2.1 Formulação	37
4.2.2 Conformação e sinterização	38
4.3 CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	38
4.3.1 Ensaio de eflorescência	40
4.3.2 Escolha da formulação e processo de lavagem do pó de despoeiramento	41
4.3.3 Método de quantificação dos sais formados nos corpos de prova	42
4.3.4 Método de quantificação dos sais nos extratos de solubilização do rejeito	43
4.3.5 Análise de componentes químicos por Microscópio Eletrônico de Varredura, Difração de Raios X e Fluorescência de Raios X (FRX)	45
4.3.5.1 Difractometria de Raio-X (DRX) e Caracterização microestrutural por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	45

4.3.5.2 Caracterização de componentes químicos das amostras e corpos de prova	45
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
5.1 QUANTIFICAÇÃO DOS SAIS SOLÚVEIS FORMADOS ATRAVÉS DO SOFTWARE IMAGE J	47
5.2 CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DOS EXTRATOS DE SATURAÇÃO.....	52
5.3 QUANTIFICAÇÃO DOS ÂNIONS SOLÚVEIS	53
5.4 ANÁLISE MINERALÓGICA POR DIFRAÇÃO DE RAIOS X.....	55
5.4.1 Argila	55
5.4.2 Pó de despoeiramento antes e após lavagem	55
5.5 ANÁLISE MICROESTRUTURAL POR MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA (MEV) E ESPECTROSCOPIA POR DISPERSÃO DE ENERGIA (EDS) ..	57
5.5.1 Argila	57
5.5.2 Pó de despoeiramento antes e após lavagem	58
5.5.3 Corpos de prova.....	62
5.6 ANÁLISE QUÍMICA POR FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X (FRX)	66
5.6.1 Argila e pó de despoeiramento antes e após lavagem.....	66
6. CONCLUSÕES.....	68
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	69
REFERÊNCIAS	70
ANEXO A – TRABALHOS PUBLICADOS E DIVULGADOS EM EVENTOS	73

1. INTRODUÇÃO

As eflorescências constituem uma patologia frequente nos produtos cerâmicos tradicionais, cuja solução é particularmente difícil ou impossível. Sua origem está em parte associada à porosidade intrínseca e à natureza e distribuição de sais existentes no corpo cerâmico, tornando os aptos a migrarem à superfície, resultando na forma de eflorescência mais clássica. Embora os danos causados pelos sais solúveis venham sendo investigados há várias décadas, os mecanismos e fatores que controlam a formação de cristais em meios porosos e o desenvolvimento do dano não são ainda compreendidos em sua totalidade (FERREIRA e BERGMANN, 2007).

Os sais solúveis são os principais agentes da degradação dos materiais de construção porosos, e um motivo de grande frustração para as pessoas envolvidas na construção e conservação das edificações. Esse tipo de manifestação além de afetar esteticamente o ambiente interno e externo, causa problemas de insalubridade e contribuem no aceleração e deterioração dos materiais de construção contaminados (WOOLFITT, 2008).

Na composição somente argilosa, os sais podem se originar durante o processo de formação do solo ou então são trazidos por movimentos de águas subterrâneas. O termo sais solúveis quando aplicado a solo, designa aqueles constituintes que apresentam apreciável solubilidade em água. A presença de sais nos produtos cerâmicos não pode ser totalmente evitada; portanto, avaliar o de seu deslocamento em ambiente poroso pode ajudar na melhor compreensão do fenômeno da quantificação da eflorescência (RIBEIRO, LEITE et al 2015).

Sabe-se que setor siderúrgico gera uma diversidade de resíduos sólidos, efluentes líquidos e emissões gasosas nas diversas etapas do seu processamento. Assim a produção de aço está obrigatoriamente vinculada à acumulação de uma grande quantidade de resíduos. Dentre estes, o pó de despoeiramento, gerado em forno elétrico a arco, representa um dos maiores problemas pelo seu conteúdo em metais pesados, tais como zinco, ferro, cromo, cádmio, chumbo, entre outros, emitidos na atmosfera durante a fabricação do aço (ROCHA, 2013).

O pó de despoeiramento é classificado como resíduo perigoso no Brasil, pela norma NBR 10.004. Sob esta classificação, os pós gerados em forno elétrico a arco não podem ser depositados em aterros comuns. Toneladas de pó encontram-se abandonadas em aterros esperando por uma devida solução. A disposição de resíduos em aterros, além de trazer problemas ambientais, aumenta os custos do processo, devido ao transporte deste material para

locais cada vez mais distantes do ponto de geração (ROCHA, 2013).

O reaproveitamento de resíduos dos mais diversos tipos de indústria tem sido um tema amplamente estudado e ampliado devido a sua importância. Com base em informações e dados anteriores, neste trabalho utilizou-se o pó de despoejamento na sua forma original e na sua forma após um processo de lavagem com água destilada. Esse procedimento teve como principal objetivo, solubilizar os sais solúveis presentes no rejeito em questão. Destaca-se que o processo de lavagem deu origem ao extrato de solubilização do resíduo. A formação da efluorescência foi avaliada e comparada em corpos de prova contendo 25% em peso deste resíduo com e sem a lavagem, adicionados à argila. Em seguida o teste de efluorescência foi realizado conforme ASTM C67-14, prosseguindo-se com a quantificação da área ocupada pela patologia nos corpos de prova meio do software *Image J*, determinação da condutividade elétrica dos sais e ânions solúveis presentes no extrato de solubilização, além das análises por microscopia eletrônica de varredura, difração de raios X e Fluorescência de raios X.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Analisar a formação da eflorescência em cerâmica vermelha com 25% em peso do resíduo siderúrgico pó de despoejamento lavado e não lavado.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

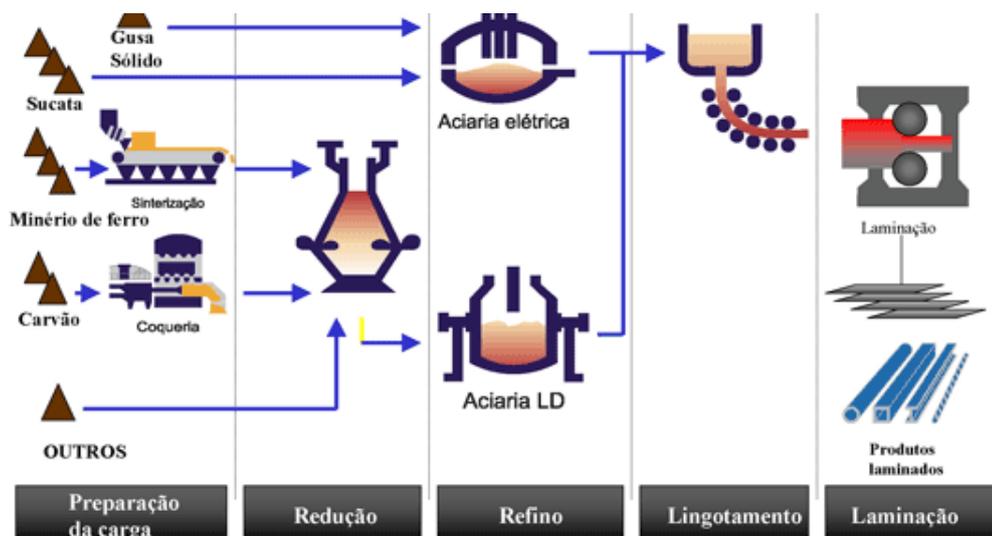
- Reaproveitar o resíduo siderúrgico em materiais cerâmicos;
- Analisar a eficiência do processo de lavagem no resíduo siderúrgico pó de despoejamento quanto a diminuição da eflorescência;
- Comparar a formação da eflorescência nos corpos de prova fabricados com o rejeito na sua forma original e lavada;
- Quantificar a patologia por meio de captura de imagens e metodologia aplicada ao *software Image J*;
- Quantificar os sais solúveis presentes no extrato de solubilização por meio da condutividade elétrica e determinação de ânions solúveis;
- Caracterizar componentes químicos presentes na argila, no pó lavado e não lavado através da microscopia eletrônica de varredura (MEV), difração de raios x (DRX) e Fluorescência de raios X (FRX);
- Comparar e identificar os elementos comuns formadores de eflorescência quando agregados na argila, no resíduo pó de despoejamento;
- Caracterizar os corpos de prova.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 PROCESSO DE OBTENÇÃO DO AÇO

O aço pode ser obtido por diversas rotas de processo, através de uma série de transformações metalúrgicas e de conformação mecânica. As duas mais utilizadas são o alto forno associado a um conversor a oxigênio e o forno elétrico a arco (NYRENDA,1991). A Figura 1 representa o fluxograma dos dois principais tipos de produção:

Figura 1 - Fluxo de produção de um aço englobando vários processos utilizados



Fonte: Fay, (2006).

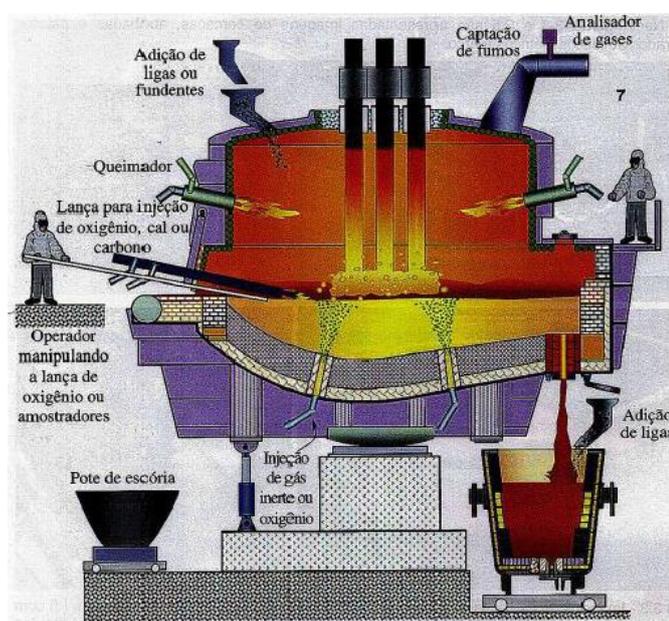
3.1.2 Forno elétrico a arco

O forno elétrico a arco (FEA) obteve uma rápida ascensão tecnológica devido às suas notórias vantagens produtivas, como a possibilidade de controlar a temperatura do banho metálico, bem como as condições de oxidação e redução da escória além da flexibilidade operacional (ROCHA, 2013).

O processo de elaboração utilizando a eletricidade como fonte de energia necessária

para fundir e refinar o aço apresenta a vantagem de utilizar uma elevada quantidade de sucata (em alguns casos, até 100% da carga). Além disso, é possível elaborar aços com um alto percentual de elementos de liga, razão pela qual esse processo é adequado para produção de aços alta liga (RIZZO, 2006.). O processo produtivo através de FEA é realizado através da reciclagem de sucata (consumo de 78% em relação aos outros insumos) contendo ferro e outros insumos, como carbono (grafite), oxigênio e cal. Observa-se na Figura 2 a esquematização básica do FEA.

Figura 2 - Esquema do FEA



Fonte: Rizzo, (2006).

3.2 PÓ DE DESPOEIRAMENTO

Independentemente do processo utilizado, a fabricação do aço é sempre acompanhado por uma grande geração de pós de aciaria elétrica (PAE), a qual é carregada dos fornos por meio de sistemas exaustores e armazenada em silos (ou bags) apropriados (ROCHA, 2013).

Dados do Instituto Brasileiro de Siderurgia registram que no Brasil, onde a produção de aço anual, em 2005, foi de 31,6 milhões de toneladas, foram geradas cerca de 13,5 milhões de toneladas de resíduos com uma média de 435 kg/t de aço produzido (FAY, 2006). Tais valores demonstram que as grandes quantidades têm sido geradas e sua disposição em aterros de resíduos industriais perigosos, que teve seu preço aumentado consideravelmente nos últimos anos devido às maiores exigências de monitoramento por parte dos órgãos responsáveis, não

configura uma situação ideal. Assim, torna-se importante o estudo e a viabilização de alternativas ao reaproveitamento do PAE (RAMOS, 2013).

Segundo (TAKANO, 1999) os principais resíduos sólidos recicláveis numa usina siderúrgica integrada são:

- Poeiras da sinterização;
- Poeira de aciaria elétrica;
- Pós de alto-forno;
- Lamas de alto-forno;
- Lamas de aciaria;
- Carepas de lingotamento contínuo;
- Carepas de escarragem;
- Laminas de laminação;
- Finos de coque;

É de conhecimento que os resíduos sólidos siderúrgicos possuem altos teores de óxidos metálicos, onde a recuperação desses valores metálicos passou a ser muito importante tanto do ponto de vista das restrições legais impostas pelas legislações relativas à proteção do meio ambiente, como do ponto de vista econômico, por contribuírem para a compensação dos custos de instalação e operação de equipamentos antipoluição instalados nas usinas (FAY, 2006).

Dentre os principais resíduos sólidos recicláveis, a poeira de aciaria elétrica tem como destinação cerca de 25% para o comércio, contendo cerca de 10 a 25% de Zinco e de 30 a 50% de Ferro. A reciclagem em aciaria ou a recuperação de Zinco tornam-se alternativas para reaproveitamento deste resíduo (TARDY, 1999). A emissão de pós durante o processamento do aço em forno elétrico é ilustrada na Figura 3, que apresenta a transferência de aço líquido do forno à panela.

Figura 3 - Emissão de pós durante o vazamento de aço em forno elétrico



Fonte: Nyrenda, (1991).

O pó de despoeiramento é classificado, de acordo com a norma NBR 10004 (2004), como resíduo sólido perigoso, classe I. A Secretaria de Meio Ambiente do Estado do Pará (SEMA) exige que este tipo de resíduo seja estocado em locais adequados, ou seja, locais cobertos e protegido das intempéries. Logo, devido à grande quantidade gerada de pó, torna-se importante o estudo de alternativas de reciclagem, ao invés de dispor o resíduo em aterros industriais.

Este pó é formado pela volatilização de metais de carga, tais como zinco, cádmio e chumbo, que devido às temperaturas de trabalho (1600 °C ou mais) nos fornos elétricos passam para o estado gasoso, são oxidados pelo excesso de oxigênio e, posteriormente, resfriado pelo ar do sistema de resfriamento, condensando. As partículas condensadas e outros materiais particulados são então coletados em sistemas de filtros. Óxidos de cálcio e silício também são encontrados, provenientes de fundentes, refratários ou da oxidação de matéria-prima metálicas, do tipo de processamento e da qualidade de aço produzido (SILVA, 2006).

As emissões de pó em forno elétrico estão associadas a todas as fases de operação do forno. A pluma de gases que sai do forno, quando a sucata está sendo carregada é de grande intensidade, devido a ignição de materiais combustíveis agregados à sucata metálica, gerada quando em contato com o aço já fundido na base do forno. Como medidas para prevenção e/ou minimização da poluição, o sistema de uma siderúrgica pode ser composto por unidades de despoeiramento, tais como precipitadores eletrostáticos, lavagem de gases e câmaras de filtração, que são utilizados para a limpeza dos gases antes de serem liberados para a atmosfera (SILVA, 2006).

3.2.1 Mecanismo de formação do pó de despoeiramento

Nos últimos anos, diversos estudiosos propõem-se a pesquisar sobre a formação de pós de aciaria, através de mecanismos que teoricamente são capazes de explicá-la. Entender a formação de pós gerados nos processos de produção de aço pode contribuir consideravelmente para sua diminuição. A taxa de geração de poeira durante a operação em conversores é fruto da temperatura muito alta situada na zona de impacto da lança de oxigênio, período em que ocorre uma maior formação de pó de despoeiramento (BREHM, 2004). A formação de poeiras em conversores é devida principalmente à ejeção de partículas de metal líquido, ocasionada pela reação de oxigênio com monóxido de carbono na superfície do banho metálico, conforme Silva (2006) *apud* Mantovani.

Segundo Silva (2006) *apud* Ellis e Glover, os autores em seus experimentos, descreveram quantitativamente as proporções de pós produzidos por vaporização ou pela ação das bolhas de monóxido de carbono. Com o fim de avaliar o grau de participação destes mecanismos, foram injetadas em direção às ligas Fe-C (1600°C) várias misturas de oxigênio e argônio. Concluíram então que a ação das bolhas de monóxido de carbono e a posterior oxidação e explosão das gotículas ejetadas contribuem bastante para a formação do pó tanto em escala laboratorial, pois 96% do pó foram gerados pela ação das bolhas, como em escala industrial. Os autores afirmam que a explosão das gotas inicialmente ejetadas ocorre porque uma porção da camada de óxido que cobre a gota é sugada para dentro da mesma, fazendo com que haja a formação de monóxido de carbono e a consequente explosão da gota.

O principal mecanismo de formação de pó em conversores ocorre pela ejeção de partículas de metal líquido e da escória, sendo que a volatilização de elementos contidos no banho é mais ativa no último estágio de sopro, conforme Silva (2006) *apud* Nedar. Algumas conclusões foram feitas do estudo de NEDAR, são elas:

- O mecanismo de vaporização que ocorre na zona de impacto da lança de oxigênio é importante principalmente para aqueles elementos que apresentam alta pressão de vapor;
- A oxidação de Zn é afetada pela pressão parcial de oxigênio presente em tubulações condutoras de gases, sendo que a condensação de Zn está provavelmente ocorrendo sobre as partículas ejetadas;
- Há possibilidade de separação de elementos volatilizados por meio do uso de sistemas de coleta que operem em altas temperaturas.

Assim, os seguintes mecanismos podem contribuir para a geração de pós tanto em fornos elétricos a arco como em conversores (SILVA, 2006):

- Vaporização de metais não ferrosos (Zn, Cd, Pb, entre outros);
- Ejeção de gotas de aço líquido;
- Ejeção de partículas oriundas da escória;
- Arraste de materiais adicionados ao forno;

3.2.2 Composição química e mineralógica de pós de aciaria

No processo de produção de aço em aciaria elétrica, os pós podem ser classificados de duas formas, para fins de estratégias de reciclagem, de acordo com a quantidade de zinco:

- Pós com altos teores de zinco: acima de 15% de Zn;
- Pós com baixos teores de zinco: abaixo de 15% de Zn.

A Tabela 1 apresenta uma breve visão das fases e principais elementos presentes nos pós gerados em fornos elétricos a arco e em conversores, segundo as observações de estudos de caracterização de diversos autores, relatados por Silva (2006) apud Nyrenda. Consistente com seu modo de formação em atmosfera oxidante, cerca de 90% das partículas que compõem o pó estão sob a forma de óxidos.

Tabela 1 - Fases mineralógicas dos principais elementos presentes em pó de fornos elétricos e conversores

Elemento	Fases que contêm o elemento
Fe	Fe ₃ O ₄ é a principal fase. Os cátions de ferro são substituídos em vários graus por cátions de Zn, Mg, Ca, Cr, Mn, etc.
Zn	Quando o pó possui acima de 15% de zinco, este começa a se apresentar na forma de ZnO. O restante está associado principalmente com o ferro, formando ZnFe ₂ O ₄ . Pequenas quantidades de zinco também podem se apresentar com sulfetos, silicatos ou aluminatos.
Cd	Devido a baixa concentração, tem uma distribuição não muito bem estabelecida, mas possivelmente semelhante à de zinco.
Pb	Principalmente presente como óxidos ou também como PbSO ₄ e PbCl ₂ .
Cr, Ni	Geralmente substituem os cátions de ferro em Fe ₃ O ₄
Ca	Apresenta-se como CaO e CaO ₃ , principalmente, e o restante pode estar presente como fluoretos, ferritas ou silicatos.
Mn	Principalmente como espinélios (Zn, Fe, Mn) Fe ₃ O ₄
Cl, Na, F, K	Presentes como sais ou cloretos e preenchem em muitos casos, os vazios de outras partículas.

Fonte: Nyrenda, (1991).

3.3 EFLORESCÊNCIAS EM MATERIAIS CERÂMICOS

O fenômeno da eflorescência representa o depósito de sais, geralmente provenientes das matérias primas que compõe o material cerâmico sobre sua superfície. Para que ele ocorra, são necessários e suficientes três fatores simultâneos: água, gradiente hidráulico e sais solúveis. A umidade, atravessando um corpo poroso, dissolve os sais nele presentes e os transporta até a superfície. Nesse local, ocorre a evaporação da água e a consequente precipitação dos sais, que se depositam na forma de pó ou manchas sobre a superfície (JUNGINGER e MEDEIROS, 2002).

É importante ressaltar que estes fenômenos não ocorreriam sem que houvesse a presença de um solvente, neste caso, a água, condições ambientais favoráveis, um meio pelo qual a água pudesse percolar, e claro, a presença de sais que sejam solúveis nas matérias primas (SANTOS e FILHO, 2008)

Os sais solúveis são os principais agentes da degradação dos materiais de construção porosos, e um motivo de grande frustração para as pessoas envolvidas na construção e conservação das edificações. Esse tipo de manifestação além de afetar esteticamente o ambiente interno e externo, causa problemas de insalubridade e contribuem no aceleração e deterioração dos materiais de construção contaminados (CAMPOS, 2010). Com relação à origem dos sais, a Tabela 2, a seguir, apresenta uma relação da natureza química dos sais solúveis e suas prováveis fontes.

Tabela 2 - Natureza química dos sais solúveis

Composição Química	Fonte Provável	Solubilidade em água
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).

O termo sais solúveis quando aplicado a solo, designa aqueles constituintes que apresentam apreciável solubilidade em água (FERREIRA e BERGMANN, 2007). Os principais sais solúveis encontrados nas matérias-primas são:

- Cloretos: especialmente o cloreto de sódio, que é encontrada principalmente nas proximidades de zonas marítimas.
- Nitratos: estão principalmente associados diretamente com a presença de matérias orgânicas.
- Carbonatos: são frequentemente responsáveis em casos de eflorescências principalmente em forma de carbonato de sódio e estão normalmente ligados com a argamassa de cimento ou a umidade do solo.

- Sulfatos: São os principais culpados na maioria dos casos de patologia em edifícios, nas quais o sulfato de sódio o sal mais comum em casos de eflorescência.

Evitar a eflorescência esbarra na impossibilidade física de realizar a total eliminação de sais solúveis quando presentes no corpo cerâmico. Embora os danos causados pelos sais solúveis venham sendo investigados há várias décadas, os mecanismos e fatores que controlam a formação de cristais em meios porosos e o desenvolvimento do dano não são ainda compreendidos em sua totalidade (FERREIRA e BERGMANN, 2007).

3.3.1 Tipos de eflorescência formadas no material cerâmico

De acordo com Verduch e Solana (2000) existem três tipos de eflorescência que podem acontecer através de diferentes causas, são elas:

- Eflorescências de secagem

As eflorescências se formam por secagem ao ar livre nas argilas sem moldar. Chamam-se “véus de secagem”. Um exemplo é a película salina que se forma sobre as partes protuberantes de um torrão de argila que seca espontaneamente no campo. Neste caso a secagem se produz pela ação do ar limpo, natural, sobre argilas sem forma específica, não tratadas mecanicamente, que ainda conservam sua textura natural.

- Eflorescências de secador

Contrariamente ao caso anterior, nas eflorescências de secador a secagem se produz pela ação do ar industrial – possivelmente contaminado - sobre argilas que foram tratadas mecanicamente. Nelas ficaram impressas as características geométricas e texturais impostas pelas máquinas.

- Eflorescências de forno

As eflorescências de secador, formadas na superfície dos tijolos crus, se consolidam no forno pela ação de diversas reações, se transformam no que denominamos eflorescências de forno. Portanto as eflorescências de forno são eflorescências de secador consolidadas, tornadas permanentes pela queima no ambiente e nas condições térmicas específicas de um forno determinado. Uma mesma eflorescência de secador pode dar origem a diferentes eflorescências de forno, quando para sua transformação e consolidação se usam atmosferas e ciclos térmicos também distintos.

3.3.2 Eflorescências de secador

Os sulfatos de cálcio e de magnésio são as impurezas das argilas que com mais frequência formam sais de secador. São indesejáveis pela facilidade com que se transformam em eflorescências permanentes de forno. A água que possuem os materiais cerâmicos em estado plástico, ao evaporar, transporta até a superfície uma parte dos sais solúveis que a argila contém (VERDUCH e SOLANA, 2000)..

Os sais mais solúveis são carregados com maior facilidade. Assim, por exemplo, o sulfato de magnésio heptahidratado ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$) cuja solubilidade é de 71g/100 ml de água fria, produz eflorescências de secador com mais facilidade que o sulfato de cálcio dihidratado ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) cuja solubilidade é de apenas 0,241g/100 ml de água fria (VERDUCH e SOLANA, 2000).

Embora em maior ou menor grau todos os sais solúveis que existem na argila são mobilizados na direção da superfície, onde os sais alcalinos terrosos são os mais indesejáveis porque tem pontos de fusão mais elevados. Eles originam, pela reação com os componentes a argila, produtos não fusíveis na temperatura de queima dos tijolos. Estes produtos constituem eflorescências permanentes de forno, perfeitamente visíveis (VERDUCH e SOLANA, 2000).

Os sais alcalinos por ser bastante solúveis são muito mobilizáveis pela água. Durante a queima fundem com facilidade e não acusam problemas de eflorescências de forno, embora a camada vítrea formada possa modificar ligeiramente o brilho, a cor ou a textura superficial (VERDUCH e SOLANA, 2000).

Verduch e Solana (2000) *apud* Brownell adicionou diversos sais a um grupo de argilas que, espontaneamente, não apresentavam tendência para formação de eflorescências. Observa-se que a solubilidade e o ponto de fusão dos sais são de grande importância como fatores determinantes para a formação de eflorescências. A solubilidade é importante porque governa a dinâmica do transporte salino. A fusibilidade é importante porque determina as reações superficiais e o aspecto final da superfície. Na Tabela 3 temos os resultados obtidos, junto com as respectivas solubilidades em água fria e os pontos de fusão dos sais ensaiados.

Tabela 3 - Ação de diversos sais misturados com argilas que possuem ou não tendência a formar eflorescências

Sal	Solubilidade G/100 ml água fria	Temperatura de fusão (f) ou de decomposição (d)/°C	Formação de Eflorescências
MgCO ₃	0.0106	350 (d)	Não
CaCO ₃	0.0014	825 (d)	Não
BaCO ₃	0.0022	1450 (d)	Não
Na ₂ CO ₃	7.1	851 (f)	Não
MgCl ₂	35.3	147 (f)	Não
CaCl ₂	59.5	772 (f)	Não
SrCl ₂	43.5	873 (f)	Não
BaCl ₂	31	962 (f)	Abundante
ZnCl ₂	432	262 (f)	Não
MgSO ₄ . 7 H ₂ O	71	1185 (f)	Abundante
CaSO ₄ . 2 H ₂ O	0.241	1450 (f)	Rápida
SrSO ₄	0.0113	1580 (d)	Não
BaSO ₄	0.00023	1580 (f)	Não
ZnSO ₄	86.5	740 (d)	Sim
CdSO ₄	75.5	1000 (f)	Sim
Na ₂ SO ₄	4.76	884 (f)	Não
Cd(NO ₃) ₂ . 4 H ₂ O	109.7	100 (f)	Não

Fonte: Brownell, (1955)

Andres, (2003) utilizou uma argila onde os elementos cátions, sódio, cálcio, magnésio, vanádio e ânions, cloro, sulfato e carbonato foram apontados como principais componentes da formação de eflorescência em tijolos. A maior concentração encontrada neste material foi o sulfato de cálcio, que estava de acordo com a composição mineralógica da argila. O autor também destacou que o teor do sulfato encontrado era maior na área que houve formação de eflorescência aparente, do que na área em que essa degradação não se apresentava.

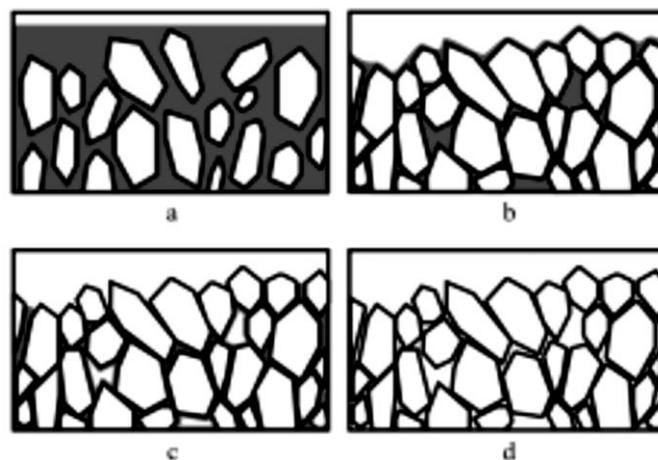
Segundo Chwast *et al* (2015) *apud* Bowler, afirma que pelo fato do sulfato de cálcio (CaSO₄.2 H₂O) possuir uma baixa solubilidade, este não conduz eflorescência. De forma similar, segundo Chwast (2015) os autores Steiger e Heritage (2012) observaram que este composto é considerado bastante inativo em relação à mudanças de temperatura, portanto, não passando por transições de fase, sendo assim, não susceptível de causar danos como outros sais.

Chwast *et al* (2015) realizou estudos sobre a eflorescência formada em algumas casas na Noruega, que se dava de forma persistente e concluiu que mesmo em pequenas quantidades, o sulfato de cálcio era capaz de formar essa degradação e que este composto independia do teor que apresentava no material cerâmico, sendo capaz de formar eflorescência.

3.3.2.1 Dinâmica dos sais

Para que os sais sejam transportados até a superfície das peças durante a secagem, é necessário que exista continuidade capilar. A massa plástica de argila passa por distintas configurações texturais durante a secagem como ilustra a Figura 4. A gradativa eliminação da água faz com que as partículas argilosas, primeiro separadas por grossas películas de água, fiquem depois mais próximas entre si, até o contato. Nessa etapa da secagem a massa argilosa se contrai proporcionalmente à quantidade d'água eliminada. Nessa fase a eliminação de um centímetro cubico de água corresponde a um centímetro cubico de retração (VERDUCH e SOLANA, 2000).

Figura 4 - Visão esquemática de uma massa de argila - água em gradativos estágios da secagem.

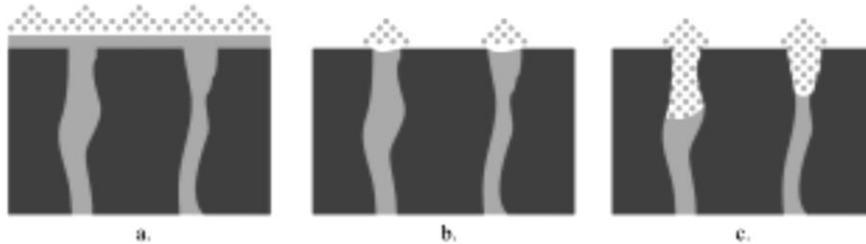


Fonte:
Verduch e Solana
(2000)

Por outro lado, a água que se elimina após o fim da retração, corresponde essencialmente ao esvaziamento da rede capilar. Durante esta fase a água já não se evapora na superfície da peça, sim no interior dos poros conforme a Figura 5. Quando se atinge um determinado estado de secagem no qual esta continuidade se rompe, a água que resta se evapora no interior das peças. Não mais contribui para transportar sais até a superfície. Portanto, a quantidade total d'água que contém uma massa argilosa plástica pode se dividir em duas frações. A primeira eficaz para transportar sais até a superfície, porque chega até ela em forma

líquida. A segunda não transporta sais porque evapora no interior da peça e chega na superfície em forma de vapor (VERDUCH e SOLANA, 2000).

Figura 5 - Evaporação de água de uma massa argilosa úmida. (a) evaporação de água na película líquida superficial. (b) evaporação na boca dos poros. (c) evaporação no interior dos poros e transporte de vapor de água até a superfície.



Fonte: Verdurch e Solana (2000)

Segundo Verdurch e Solana (2000), Brownell realizou um estudo com sulfato de cálcio marcado com enxofre radioativo (S35), para examinar como se acumulam os sais na superfície dos tijolos durante sua secagem, demonstrando que a quantidade de radiatividade na superfície vai aumentando a medida que o tijolo vai secando, até que, bruscamente, se estabiliza num determinado patamar. Isto indica que, na umidade para a qual se produz a mencionada estabilização, cessa o aporte de água líquida na superfície dos tijolos. A massa experimental se preparou por adição de 0,3 g de sulfato de cálcio radioativo sobre 500 g de uma argila que espontaneamente não produzia eflorescências de secador.

Para muitas argilas este limiar está situado entre 8% e 12% de umidade. Isto significa que se uma peça se modela com umidade inferior a esse limiar, por exemplo um valor menor que 8%, não existirá a possibilidade de que se forme eflorescência de secador. As peças obtidas por extrusão de massa plástica contém sempre um teor de água superior a este limiar (VERDUCH e SOLANA, 2000).

Quando se aumenta a água de amassamento, aumenta a fração de água capaz de transportar sais na superfície e, por tanto, aumenta a quantidade de sais transportados. A água de formação é um fator primordial na formação de eflorescências de secador, e por esse motivo deve ser a mínima necessária (VERDUCH e SOLANA, 2000).

3.3.2.2 Influência da velocidade de secagem

A velocidade de secagem afeta a quantidade de eflorescências formadas e também sua distribuição sobre a superfície dos tijolos. Ao ser realizar o experimento de secagem em duas

velocidades diferentes, com sais marcados com isótopos radioativos segundo Verduch e Solana (2000), Brownell observa que, para uma maior velocidade de secagem, menor resulta o nível de radiatividade que atinge finalmente a superfície. Isto evidentemente indica que a quantidade de sal transportado até a superfície do tijolo é tanto menor quanto maior a velocidade de secagem.

Quando se submetem os tijolos a uma secagem rápida, numa temperatura mais elevada, a eflorescência aparece distribuída de modo mais homogêneo e até, em alguns casos, pode resultar menos visível. Pelo contrário, quando a secagem é lenta, os sais tendem a se concentrar nas proximidades dos vértices e das arestas, onde a velocidade de evaporação é maior e a eflorescências resultam mais visíveis.

3.3.3 Eflorescências de forno

O mecanismo mais frequente de formação da eflorescências de forno é a reação entre as substâncias que compõem a eflorescência de secador e a argila subjacente. A análise direta das eflorescências de forno é difícil porque são muito finas, insolúveis, muito aderentes e, as vezes, de composição muito complexa.

Verduch e Solana (2000) cita mais um experimento de Brownell. Ele utilizou um método roentgenográfico (raios X) simples e demonstrativo. O método consiste em cortar com um disco de diamante uma pequena lâmina superficial do tijolo, com uma espessura aproximada de 1,5 mm. Uma face da lâmina contém o véu de forno, a outra expõe a matéria interna do tijolo cozido. Este corpo de prova para raios X se monta na platina da unidade de difração, de modo que o feixe de raios X incida sobre a superfície que contém a eflorescência de forno, e se obtém o diagrama de difração correspondente a essa face. A seguir se inverte a posição do corpo de prova e se faz incidir o feixe de raios X sobre a face oposta, que não contém eflorescência, e se registra o correspondente diagrama de difração. A identificação das substâncias que constituem a eflorescência de forno se realiza pela comparação de ambos os diagramas, identificando as linhas de difração da face que contém a eflorescência que não aparecem no diagrama da face oposta.

Quando o sal solúvel mobilizado é o sulfato de cálcio (o que é muito frequente) costuma se formar anortita ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) ou soluções sólidas de anortita com outros compostos. Houve um caso concreto em que se achou labradorita, que é uma solução sólida de albita ($\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$) em anortita. Em determinadas condições de queima, e quando existe

abundância de $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, pode se formar anidrita (CaSO_4). As eflorescências de $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ em reação com os componentes da argila, costumam dar cordierita ($2\text{MgO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$) forsterita ($2\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$) ou enstatita ($\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$).

Os sais solúveis alcalinos, tais como o sulfato de sódio, fundem a baixas temperaturas, reagem facilmente com a argila e com o quartzo. Por este motivo não costumam deixar camadas visíveis de produtos de alto ponto de fusão, como fazem os compostos de cálcio e magnésio. O cloreto de bário (BaCl_2) se usa as vezes como corretivo de eflorescências, pela sua capacidade de precipitar os sulfatos em forma de sulfato de bário insolúvel. Quando se usa cloreto de bário em excesso, o próprio excesso deste sal é capaz de causar uma eflorescência intensa de secador, que depois da queima se transforma em eflorescência muito visível e estável. Esta eflorescência está constituída frequentemente por ortossilicato de bário ($2\text{BaO} \cdot \text{SiO}_2$).

As eflorescências de forno não devem ser confundidas com as películas esbranquiçadas de cinzas – mais ou menos aderentes ou fundidas – que podem depositar-se sobre os tijolos no forno.

A atmosfera redutora do forno tem influência na formação de eflorescência nos produtos cerâmicos. A aplicação de um ciclo redutor de queima a temperatura alta costuma causar uma diminuição da quantidade de eflorescência de forno, visível nos tijolos. Não se conhecem com detalhe as complexas reações que produzem este efeito. Parece razoável a intervenção do íon ferroso em reações com os silicatos ou sílico-aluminatos, e com os óxidos alcalino terrosos, para dar compostos coloridos. Estes compostos têm cores mais parecidas às cores do tijolo. Por isso a camada dos novos compostos que se formam se percebe menos.

Os tijolos vermelhos que formam véu branco em queima oxidante, em queima redutora a alta temperatura e esfriamento oxidante, formam menos véu branco, a sua cor vermelha melhora notavelmente. Na prática, não se deve fazer um uso indiscriminado deste procedimento para diminuir a eflorescência de forno, porque as condições redutoras da queima podem aumentar a tendência dos tijolos a eflorescer, o qual pode ser mais grave (VERDUCH e SOLANA, 2000).

3.3.4 Efeitos e prevenção da eflorescência na alvenaria

As eflorescências podem modificar a aparência da superfície sobre a qual se depositam, podendo ocorrer em qualquer material da alvenaria. Esse fenômeno pode trazer modificações apenas estéticas ou ser agressiva. No primeiro comportamento, ela altera a

aparência do elemento onde está depositada e, no segundo, devido aos sais constituintes, pode até causar degradação profunda, como mostra a Figura 6.

Figura 6 - Efeito degradante da eflorescência



Fonte: Gonzaga, (2014).

Alguns trabalhos sobre prevenção de eflorescência têm sido feitos e portanto algumas precauções podem ser tomadas para minimizar a ocorrência deste fenômeno (UEMOTO, 1988):

- 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 e vedação;
- Usar argamassa mista (cimento, cal, areia) para minimizar a reação com os componentes cerâmicos;
- 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.

3.4 ARGILA

As argilas utilizadas na indústria de cerâmica vermelha ou, como também conhecidas na literatura técnica, argilas comuns abrangem uma grande variedade de substâncias minerais de natureza argilosa. Compreendem, basicamente, sedimentos pelíticos consolidados e

inconsolidados, como argilas aluvionares quaternárias, argilitos, siltitos, folhelhos e ritmitos, que queimam em cores avermelhadas, a temperaturas variáveis entre 800 e 1.250°C.

Essas argilas possuem geralmente granulometria muito fina, característica que lhes conferem, com a matéria orgânica incorporada, diferentes graus de plasticidade, quando adicionada de determinadas porcentagens de água; além da trabalhabilidade e resistência a verde, a seco e após o processo de queima, aspectos importantes para fabricação de uma grande variedade de 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).

O sudeste paraense apresenta uma produção expressiva de cerâmica vermelha ou estrutural devido à qualidade e abundância das matérias-primas utilizadas, argilas plásticas que são extraídas em áreas de várzea para a produção de blocos de alvenaria, blocos de vedação e telhas, utilizando para este processo de produção a conformação de massas cerâmicas através de extrusão em marombas.

O comportamento destas massas durante a extrusão está relacionado a vários fatores, tais como: composição mineralógica, teor de umidade, morfologia e distribuição granulométrica das partículas (RIBEIRO, 2003).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

No beneficiamento das argilas, o grau de redução do grão ou da granulometria das partículas se dá através de moedores, em um processo a seco em britadores de mandíbulas e moinhos de martelo. O cuidado que geralmente deve ser tomado com estes equipamentos, além dos processos rotineiros de manutenção, é o monitoramento dos corpos moedores e das grelhas.

Algumas condições são necessárias para que a massa cerâmica esteja com as condições adequadas ao processo de produção: relação entre plásticos e não plásticos deve ser tal que confira à massa cerâmica, plasticidade necessária pra realizar um adequado molde, e a peça conformada tenha suficiente resistência mecânica a verde e a seco; a preparação da mistura, se realizada por via úmida, deve ser facilmente defloculante; a massa deve apresentar uma adequada composição química e mineralógica de modo que as transformações físico-químicas, que têm lugar durante o processo de queima, confirmem ao produto acabado as características desejadas.

A plasticidade e o grau de compactabilidade são as propriedades tecnológicas das matérias-primas de maior interesse na moldagem de massas cerâmicas e influenciam nas características do produto final (ROCHA, 2013).

4.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados para o desenvolvimento deste trabalho foram a argila vermelha coletada na cerâmica Castanheira situada em Marabá, o pó de despoeiramento que é oriundo da aciaria elétrica da empresa Sinobras, situada no distrito industrial de Marabá.

Para a compactação dos corpos de provas, foi utilizada a prensa hidráulica Marconi 15 toneladas, para a calcinação e sinterização foram utilizadas o forno mufla MA 385/3 e forno FE - 1500-, respectivamente. A resistência a flexão foi realizada na máquina universal de ensaios marca EMIC D10000, disponível no laboratório de Ensaios destrutivos da UNIFESSPA Campus 2. Para a captura de fotos dos corpos de prova foi utilizado um dispositivo de fixação com altura padronizada.

Para o processo de quantificação da condutividade elétrica dos sais solúveis no extrato de solubilização, foi utilizado o condutivímetro de bancada mCA -100 da marca Tecnopon. Os ânions solúveis foram determinados através 7 reagentes, sendo eles: solução de fenolftaleína a 1%, ácido sulfúrico 0,025N, indicador metil Orange 0,01% e 0,1%, solução de H₂SO₄ 0,025 N, solução de cromato de potássio, solução de nitrato de prata, solução de BaCl₂ 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 da UNIFESSPA Campus 2. O equipamento de Difração de raios x foi X'PERT PRO MPD (PW 3040/60), da PANalytical disponível no laboratório de caracterização mineração da UFPA - Belém. O equipamento de FRX utilizado foi o de modelo Axios Advanced, marca PANalytical., disponível na Sinobras.

4.2 METODOLOGIA PARA CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

4.2.1 Formulação

De forma geral, esta etapa consiste em variar a proporção entre argila e pó de despoejamento com o objetivo de caracteriza-los quanto as suas propriedades físicas e mecânicas. Primeiramente, foram formuladas diversas proporções entre o pó de despoejamento e argila que foram aplicadas nos corpos de prova bem como as suas respectivas temperaturas, para a posterior escolha da melhor formulação quanto aos seus aspectos físicos e execução das etapas seguintes. A Tabela 4 apresenta as formulações que foram confeccionadas.

Tabela 4 - Formulações cerâmicas propostas com o resíduo pó de despoejamento

Formulação	Porcentagem %		Temperaturas de queima (°C)
	Argila	PD	
F0	100	0	800, 850 e 900
F1	90	10	
F2	85	15	
F3	80	20	
F4	75	25	
F5	65	35	
F6	55	45	
F7	45	55	

Fonte: Autor (2016)

Independentemente do sistema utilizado na produção e fabricação de qualquer produto cerâmico, o processo de obtenção inicia-se a partir da mistura de matérias-primas que, sob o efeito da temperatura, sofrem diversas transformações físico-químicas até alcançar as propriedades requeridas para o produto final. A mistura foi realizada em moinhos de bolas com adição de água o suficiente para formar uma pasta, durante 45 minutos, a fim de obter uma massa homogênea. A umidificação da massa cerâmica (feita antes da prensagem) foi realizada pulverizando-se água e misturando-se manualmente.

4.2.2 Conformação e sinterização

As formulações foram conformadas em uma prensa hidráulica de simples efeito, uniaxial, e uma matriz metálica de aço ferramenta, possuindo as dimensões de 20 x 60 x 6 mm³. A pressão de compactação utilizada para os corpos de prova foi de 50 MPa.

Em um primeiro estágio, os corpos de prova contendo resíduo adicionado em argila foram sinterizados em forno elétrico, nas temperaturas de 800°, 850° e 900°C, com uma taxa de aquecimento de 10 °C por minuto e patamar de queima de 2 horas, a fim de observar-se o comportamento dos mesmos frente às propriedades tecnológicas.

4.3 CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

As caracterizações físicas e mecânicas das massas aditivadas com pó de despoejamento foram realizadas a partir de ensaios de acordo com normas técnicas e procedimentos laboratoriais. Após a queima, caracterizou-se a absorção de água, porosidade aparente, densidade aparente, retração linear, resistência mecânica (módulo de ruptura à flexão em três pontos).

- **Absorção de água**

Geralmente, menores valores de absorção de água correspondem ao melhor desempenho do revestimento no que diz respeito à resistência mecânica, dureza, resistência a ácidos e ao frio. Os valores de absorção de água estão diretamente ligados à porosidade aberta do material e, portanto, a absorção de água é obtida através da equação 1.

$$AA = \frac{P_u - P_s}{P_s} \times 100 \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

P_u = peso da amostra úmida

P_s = peso da amostra seca

- **Porosidade Aparente**

O procedimento para a obtenção da porosidade aparente e absorção de água baseia-se na determinação do peso da amostra seca (P_s) e dos pesos úmido (P_u) e imerso (P_i). Para que se

possa realizar a pesagem do corpo cerâmico imerso e úmido é necessário que os corpos de prova tenham sido imergidos em água por 24 horas. Para a realização do peso imerso, utilizou-se o princípio de deslocamento de um fluido de Arquimedes. Deste modo, determina-se a porosidade aparente dos corpos de prova, expressa pela equação 2.

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

- **Densidade Aparente**

A densidade e a porosidade influem na resistência mecânica, na resistência ao desgaste e na absorção de água pelo produto cerâmico. A diminuição da densidade, por causa de um aumento na porosidade do material, acarreta simultaneamente na diminuição da resistência mecânica e aumento da resistência ao choque térmico. Mas é através da porosidade que pode-se otimizar ambas as resistências, conduzindo-as para níveis que assegurem um bom desempenho operacional da peça. A densidade aparente foi calculada através da equação 3.

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

- **Retração linear**

Corpos de provas cerâmicos sofrem retração linear após a sinterização, onde o valor de retração tende a aumentar a medida que a temperatura de queima aumenta. Para a determinação da retração linear foi tomada a medida do comprimento do corpo de prova, utilizando um paquímetro após a queima em diferentes temperaturas. A equação 4 relaciona as dimensões medidas do corpo de prova para a obtenção da propriedade.

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

Onde:

RL = retração linear de queima (%)

L_s = comprimento após a secagem (mm)

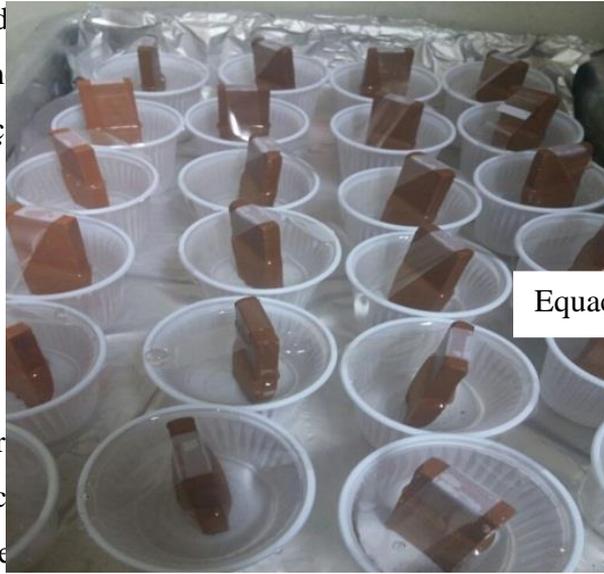
L_q = comprimento após a queima (mm).

- **Resistência a flexão**

O módulo de ruptura à flexão é a propriedade dos materiais que corresponde à tração

Figura 7 - Imersão dos corpos de prova como parte do ensaio de eflorescência

mecânica por unidade de
 sujeito a um decréscim
 em três pontos. A equaç
 à flexão (σ) dos corpos



romper, quando estiver
 dos a um carregamento
 da resistência mecânica

Equação 5

Onde:

σ = tensão máxima de r

P = carga máxima aplic

b = largura do corpo de

d = altura do corpo de prova, em mm

L= distância entre os apoios inferiores, em mm.

4.3.1 Ensaio de eflorescência

O ensaio de eflorescência consiste em emergir verticalmente até aproximadamente 80% da altura dos corpos de prova em recipientes com água destilada conforme a Figura 7, mantendo imersos durante sete dias em temperatura ambiente, onde todos os dias em um horário específico, o recipiente deve ser completado o volume da água destilada que evaporou. Após o período de imersão, os corpos de prova são colocados em estufa à 110 °C por 24 horas visando uma aceleração na formação da eflorescência. Findada a secagem, faz-se a análise visual para atestar se os corpos de prova possuem manchas brancas, decorrentes dos sais solúveis, para confirmar a formação ou não de eflorescência (ASTM C67-14, 2014).

Figura 8 - Processo de lavagem a vácuo do resíduo siderúrgico



4.3.2 Escolha da formulação e processo de lavagem do pó de despoeiramento

Após avaliação dos resultados das propriedades tecnológicas e ensaio de efluorescência obtido para todas as formulações, a composição F4 (25% do resíduo siderúrgico em peso) foi selecionada e novamente elaborado novos corpos de prova em duas versões, com e sem o método de lavagem além de temperaturas maiores, que foram 950, 100 e 1050°C.

O processo de lavagem com água destilada tem como principal objetivo, a solubilização dos sais presente no resíduo obtendo-se então, o extrato de solubilização que é usado para a determinação dos sais solúveis e feito a partir da homogeneização da matéria com a água, com um período de repouso determinado. Para o rejeito siderúrgico, a extração foi feita a partir da homogeneização do mesmo com 1 litro de água destilada em um bécher. O recipiente ficou sob agitação mecânica durante 5 minutos e posteriormente em repouso durante 7 dias (NBR 10006, 2004).

Após este tempo de inércia, o rejeito foi transferido para um funil de Buckner contendo papel de filtro e adaptado a um kitasato de 500 ml, iniciando-se a filtração a vácuo conforme Figura 8. O papel de filtro utilizado é da marca Whatman, grau 5 e porosidade de 2,5 μm , que é o grau máximo de filtração de partículas finas na gama qualitativa, sendo capaz de reter os precipitados finos encontrados em análises químicas, taxa de fluxo lenta e excelente desempenho para análises de águas e solos.

Fonte: Autor, (2016).

O processo de lavagem a vácuo foi realizado 5 vezes, de forma que a cada lavagem era adicionado 1 litro de água destilada ao resíduo contido no papel de filtro para a posterior filtração e adicionado para balões volumétricos, totalizando então 5 litros do filtrado conforme ilustra a Figura 9. Os filtrados foram classificados como 1F a 5F.

Figura 9 - Filtrados obtidos após as lavagens



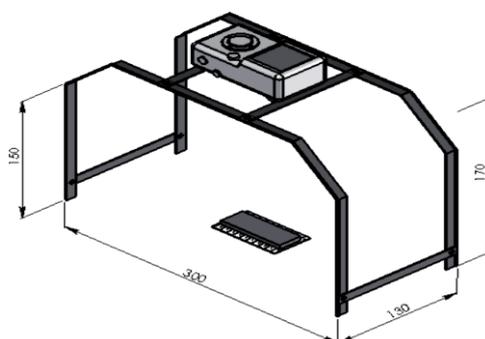
Fonte: Autor, (2016).

4.3.3 Método de quantificação dos sais formados nos corpos de prova

Com o propósito de quantificar e classificar a formação da mancha oriunda da eflorescência nos corpos de prova, aplicou-se um método de tratamento de imagem no *software Image J* (ALBUQUERQUE, 2007). O método está baseado no mapeamento da peça a partir de uma imagem em preto e branco. Inicialmente, fez-se a leitura das dimensões do corpo cerâmico com um paquímetro digital. Após, as peças foram fotografadas em um ambiente iluminado com

luz artificial, câmera fotográfica de 16 Megapixels que estava fixada em um suporte a uma distância de 170 mm de altura, conforme Figura 10.

Figura 10 - suporte metálico para fixação de câmera fotográfica e corpo de prova



As imagens foram salvas em formato jpeg e em seguida processadas pelo software Image J, seguindo as etapas: i) determinação da área do corpo cerâmico fotografado; ii) extração das regiões que não pertencem ao corpo cerâmico; iii) determinação na área resultante da quantidade relativa de pixel pretos (indicativo de eflorescência) sobre o total de pixels na imagem.

4.3.4 Método de quantificação dos sais nos extratos de solubilização do rejeito

Conforme Menezes et al., (2006) para a quantificação do teor dos sais solúveis nas lavagens fez-se uso da seguinte equação:

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

Onde, CE é a condutividade elétrica do extrato (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. O cálculo do teor de carbonatos foi feito de acordo com 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 quantificar os bicarbonatos utilizou-se o mesmo extrato preparado para determinar os carbonatos. O método foi realizado por acidimetria com ácido sulfúrico em presença de vermelho de metila como indicador e fenolftaleína para a prova em branco. O teor de bicarbonatos é calculado através da equação 8:

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

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

b: volume de fenolftaleína gastos (ml)

c: volume do extrato (ml)

Os cloretos foram avaliados através de determinação volumétrica com nitrato de prata em presença de cromato de potássio como indicador. A equação 9 foi empregada para calcular esse teor:

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

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-se a relação seguinte:

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

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

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

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, utilizando-se a mesma relação da equação 10.

4.3.5 Análise de componentes químicos por Microscópio Eletrônico de Varredura, Difração de Raios X e Fluorescência de Raios X (FRX)

4.3.5.1 Difractometria de Raio-X (DRX) e Caracterização microestrutural por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A Difractometria de raios-X (DRX) é uma técnica de caracterização mineralógica de materiais muito utilizada para identificação das espécies de minerais presentes e também permite estudar as características cristalográficas destes minerais e, com o uso de software, quantificar cada espécie mineral (MELO, 2011). A identificação dos componentes mineralógicos foi realizada através de um difratômetro de raios-X, modelo X'PERT PRO MPD (PW 3040/60), da PANalytical, com goniômetro PW3050/60 (θ / θ), tubo de Raios-X cerâmico e anodo de Cu ($K\alpha_1 = 1,540598 \text{ \AA}$).

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

A técnica de espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX) é um método para determinação precisa, rápida e não-destrutiva para análises elementares, tanto quantitativas quanto qualitativas usando o princípio de medida dos comprimentos de onda e intensidade das radiações emitidas pelos elementos.

4.3.5.2 Caracterização de componentes químicos das amostras e corpos de prova

O resíduo siderúrgico foi analisado antes e após do processo de lavagem por DRX, MEV e EDS, a fim de comparar-se a presença e quantidade de possíveis elementos químicos causadores da eflorescência em cada amostra. A área do corpo de prova que não apresentava eflorescência e as manchas brancas características deste desgaste (Figura 11) foram analisadas através do MEV para identificação dos componentes químicos presentes nessa patologia.

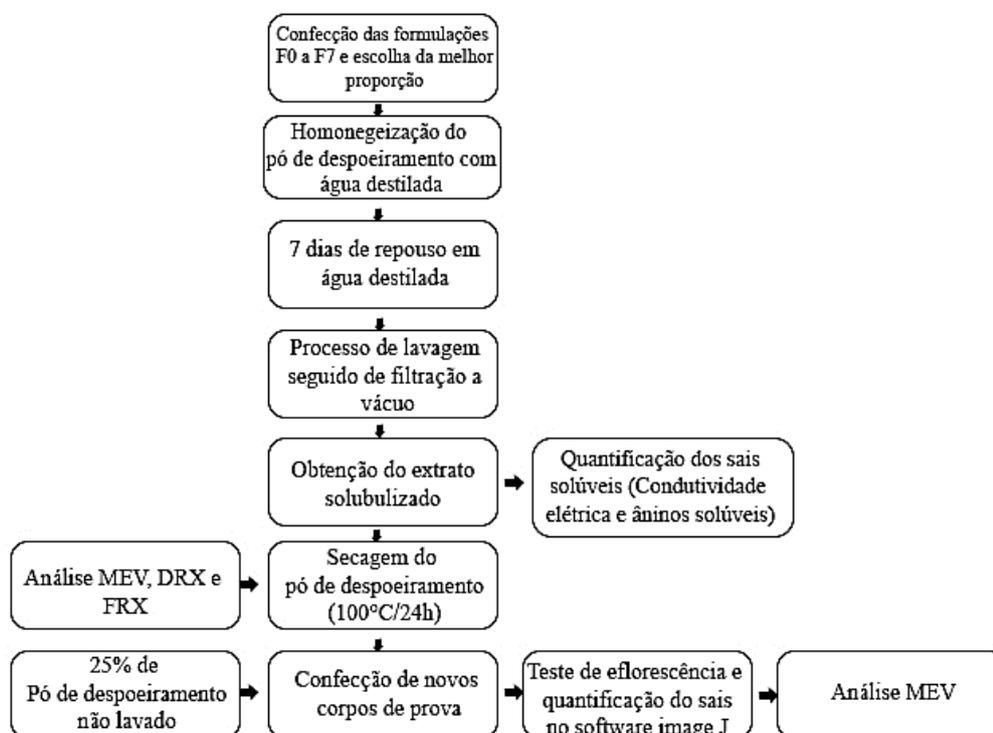
Figura 11 - Formação da eflorescência no corpo de prova



Fonte: Autor, (2016).

Para fins de compreensão geral da metodologia adotada neste trabalho, a Figura 12 apresenta o fluxograma de todo o processo, que vai desde a confecção de formulações até as análises de componentes químicos.

Figura 12 - Fluxograma da metodologia adotada no trabalho.



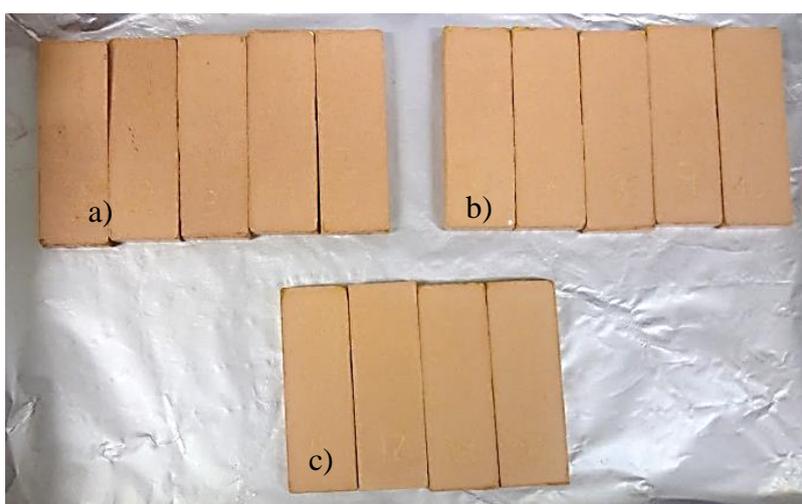
Fonte: Autor, (2017).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 QUANTIFICAÇÃO DOS SAIS SOLÚVEIS FORMADOS ATRAVÉS DO SOFTWARE IMAGE J

A Tabela 5 apresenta as imagens obtidas dos corpos cerâmicos da formulação F4 que apresentaram nítida formação de eflorescência e a correspondente imagem processada pelo *software Image J*. As amostras que continham somente argila, não apresentaram eflorescência em nenhuma das três temperaturas de sinterização (Figura 13), e por isso não foram inseridas na Tabela.

Figura 13 - Corpos de prova de composição somente argilosa nas temperaturas de 950°C (a), 1000°C (b) e 1050°C (c)



Fonte: Autor, (2017).

Os corpos cerâmicos com a lavagem do resíduo siderúrgico sinterizados a 1050°C não apresentaram formação de eflorescência visível, porém foram incluídos na Tabela 5 para fins de comparação. As amostras identificadas pela numeração de 1 a 15 representam as que foram confeccionadas sem o processo de lavagem do pó de despoejamento e as amostras identificadas como L1 a L15 são as que foram feitas com o resíduo do pó de despoejamento após o processo de lavagem.

Em termos estéticos, os corpos de prova que foram fabricados com o rejeito siderúrgico lavado apresentaram maior uniformidade na cor e menos presença de manchas (Figura 14), caracterizando-se como um ponto positivo desse processo.

Figura 14 - Formulação F4 sinterizada à 950, 1000 e 1050°C



Fonte: Autor, (2017)

Tabela 5 - Imagens obtidas dos corpos cerâmicos que apresentaram formação ou não de efluorescência processadas pelo software Image J

Temperatura (°C)	Identificação dos corpos de prova				
	01	02	03	04	05
950					
	L1	L2	L3	L4	L5
					
1000					
	L6	L7	L8	L9	L10
					
1050					
	L11	L12	L13	L14	L15



Fonte: Autor, (2017).

Observa-se que à medida que a temperatura aumenta, a formação da eflorescência tende a diminuir tanto nos corpos de prova sem o processo de lavagem, quanto nos corpos com o processo de lavagem do resíduo. Por outro lado, a formação da eflorescência diminuiu consideravelmente com relação aos corpos de prova confeccionados com o processo de lavagem. Através da Tabela 5 observa-se essa diferença principalmente entre as amostras 11 a 15 e L11 a L15.

O software Image J possibilitou a quantificação através da pixelização das imagens por pontos pretos (indicativos de eflorescência) resultando em valores expressos em porcentagens com relação ao valor da área total da amostra. A Tabela 6 mostra os resultados.

Tabela 6 - Porcentagem de partículas indicativas de eflorescência detectadas nos corpos de prova.

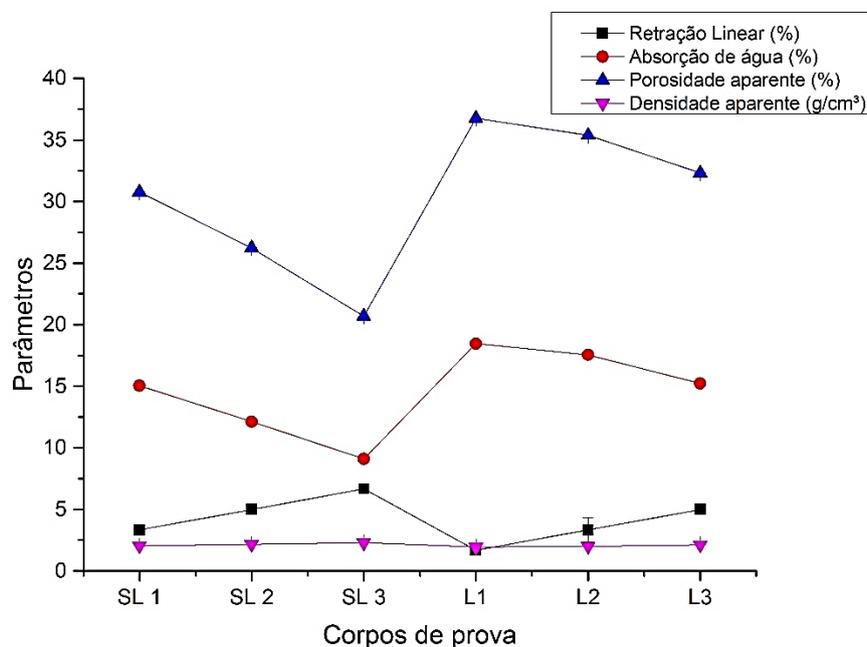
Temperatura (°C)	Corpos de prova	Porcentagem de partículas (%)
950	01 a 05	4,65
	L1 a L5	0,42
1000	06 a 10	6,36
	L6 a L10	0,42
1050	11 a 15	0,51
	L11 a L15	0

Fonte: Autor, (2017).

Apesar do aumento da formação da eflorescência a partir da temperatura de 950°C para 1000°C com relação às amostras 01 a 10, observa-se que para os corpos de prova L1 a L10 a porcentagem de partículas se mantiveram em um mesmo teor com relação a estas temperaturas. Somente a partir de 1050°C é que se nota uma nítida diminuição na identificação de eflorescência para os dois tipos de corpos de prova. Vale ressaltar que não houve detecção de partículas nas amostras L11 a L15, diferentemente das amostras 11 a 15.

A Figura 15 apresenta o resultados dos parâmetros de retração linear, absorção de água, porosidade e densidade aparente.

Figura 15 - Parâmetros versus corpos de prova.



Fonte: Autor, (2017).

Os resultados para flexão dos corpos de prova sinterizados à 800 °C, 850 °C e 900°C apresentaram valores cada vez maiores, onde esta última temperatura apresentou 17 Mpa de resistência a flexão, sendo este valor satisfatório e que tende a aumentar conforme aumenta-se a temperatura de sinterização.

Quando se tem uma maior temperatura de queima, 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 reagido com outros constituintes do material cerâmico, formando compostos não solúveis em

água, impossibilitando que a água leve uma grande quantidade de sais para a superfícies do corpo de prova.

Os corpos de prova SL1 a SL3 (sinterizados à 950 °C, 1000 °C e 1050°C) apresentaram menor porosidade do que L1 a L3 (sinterizados à 950 °C, 1000 °C e 1050°C), e segundo Ferreira e Bergmann (2007), a porosidade é outro fator que interfere na formação da patologia e a sua capacidade de retenção de água. A contribuição dos poros finos é mais limitada para o transporte capilar, por outro lado, os poros mais grossos contribuem melhor para transferir água aos capilares. Assim, a maior porosidade faz com que os sais solúveis sejam facilmente mais transportados até a superfície do material cerâmico.

Seguindo este raciocínio, as amostras com o resíduo lavado deveriam mostrar uma maior área visível de eflorescência, o que não ocorreu, pois mesmo com a porosidade maior se comparada aos corpos de prova SL1, SL2 e SL3, a área quantificada da degradação para as amostras L1 a L3, foi menor. Isso provavelmente se deve ao fato de que a lavagem fez com os

Extratos de saturação	Condutividade Elétrica (dS/cm)	PS (ml)	% Sais
01	0,0865	1000	0,055
02	0,0018	1000	0,001
03	0,0017	1000	0,001
04	0,0015	1000	0,0009
05	0,0014	1000	0,0008

sais solubilizassem e deixassem mais espaços na estrutura do material e devido o menor teor de sais no resíduo após a lavagem, o transporte capilar se deu em menor quantidade.

5.2 CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DOS EXTRATOS DE SATURAÇÃO

Conforme a equação 06, determinou-se a porcentagem em sais do extrato de saturação do pó de despoeiramento obtido pelo processo de lavagem realizado 5 vezes sucessivamente. A Tabela 7 aponta esses valores.

Tabela 7 - Porcentagem de sais solúveis diluídos nos extratos de saturação.

Fonte: Autor, (2017).

Quanto maior é o valor da condutividade elétrica, maior é a concentração de sais e a partir da Tabela, observa-se que o maior valor de condutividade elétrica detectado foi no extrato de saturação 01, que apresenta considerável diferença entre os demais, ou seja, os extratos 02 a 05 apresentaram valores de pouca diferença.

5.3 QUANTIFICAÇÃO DOS ÂNIONS SOLÚVEIS

A Tabela 8 apresenta os resultados das análises dos extratos de saturação do pó de despoeiramento com relação à presença de ânions solúveis.

Tabela 8 - Valores quantitativos do ânions solúveis presentes no extrato de saturação.

Extrato de saturação	Cor do extrato	Sulfatos (mg/L)	Cloretos (mg/L)	Carbonatos (mg/L)	Bicarbonatos (mg/L)
L1	Amarelo	205765,3	6735,5	0	0
L2	Incolor	1646,1	177,25	0	0
L3	Incolor	1646,1	141,8	0	0
L4	Incolor	8230,6	14,725	0	0
L5	Incolor	24691,8	0	0	0

Fonte: Autor, (2017).

O extrato solubilizado L1 apresentou nítida coloração amarela, diferentemente das outras amostras. O mesmo ocorreu no extrato de solubilização do resíduo de cromo da tese de Abreu, 2006. Conforme a ABNT NBR 10004, o limite máximo permitido no extrato de solubilização tanto para cloretos quanto para sulfatos é de 200 mg/L.

Observa-se que os cloretos apresentaram-se em menor quantidade com relação aos sulfatos, onde a partir da segunda lavagem o resultado expresso em mg/L para os cloretos, encontra-se abaixo do limite máximo permitido pela norma, além disso os valores decrescem desde o extrato de saturação L1 até o L5. Por outro lado, os sulfatos mostram um comportamento não decrescente, além de um súbito aumento do teor desse sais entre os extratos L4 e L5, e nenhum dos teores obtidos encontram-se abaixo do permitido pela norma.

Tanto os carbonatos quanto bicarbonatos não apresentaram solubilidade em água em nenhuma das lavagens, 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, como apresentado pela Tabela 2 e 3 respectivamente. Para fins de detecção de elementos químicos presentes no resíduo

siderúrgico na sua forma original, para posterior correlação dos mesmos com os sais formadores de eflorescência, a Tabela 9 mostra diversos elementos na forma oxidada e quantitativa, detectada por meio de energia dispersiva de raios X (EDS).

Tabela 9 - Caracterização microscópica do pó de despoeiramento por EDS.

Elementos	Quantidade (% peso)
Ferro	47.282
Zinco	23.782
Oxigênio	14.232
Cloro	4.018
Alumínio	3.502
Cálcio	2.121
Potássio	2.039
Manganês	1.643
Silício	1.382

Fonte: Autor, (2017).

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.

Dentre os principais elementos causadores da eflorescência, observa-se a presença de grandes teores de Zn, além a presença do Ca, K e Cl em baixos teores. Conforme a Tabela 03 o zinco na forma de cloreto, misturado com argila que não possui tendência a formar eflorescência, não apresenta propensão para a formação desta patologia, possui um valor alto de solubilidade em água, além do seu baixo ponto de fusão, diferentemente do zinco na forma de sulfato, que apresenta a tendência para formação de eflorescência e um valor médio de decomposição.

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 baixíssima solubilidade em água, possui uma alta temperatura de fusão e rápida formação de eflorescência. Destaca-se ainda que o cálcio é um metal alcalino terroso e é indesejável em materiais cerâmicos devido a sua baixa solubilidade e alto ponto de fusão.

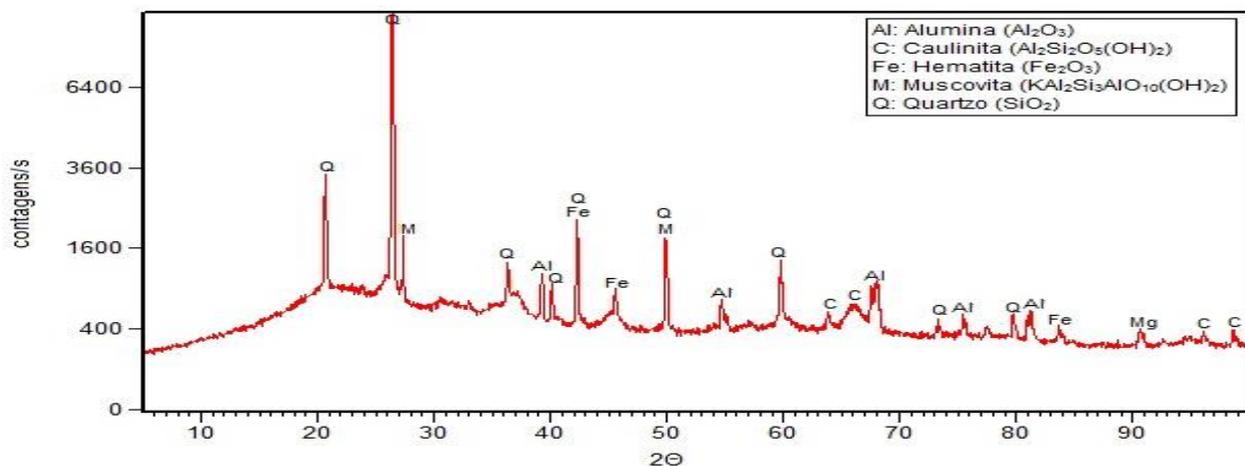
O potássio conforme Tabela 02 pode se apresentar na forma de sais ou cloretos, apresentando alta solubilidade quando na forma de sulfato, segundo Bauer, 2007. Possivelmente a presença do cloro faz com que haja a formação de cloretos.

5.4 ANÁLISE MINERALÓGICA POR DIFRAÇÃO DE RAIOS X

5.4.1 Argila

A análise por DRX das fases presentes na argila (Figura 16) não demonstrou nenhuma alteração incomum referente aos elementos frequentemente encontrados nesta matéria prima. As fases de maior predominância foram o quartzo, alumina e caulinita, não sendo detectado a presença de sais solúveis que como o CaSO_4 , MgSO_4 , KCl , K_2SO_4 e dentre outros.

Figura 16 - Análise da composição argilosa por DRX

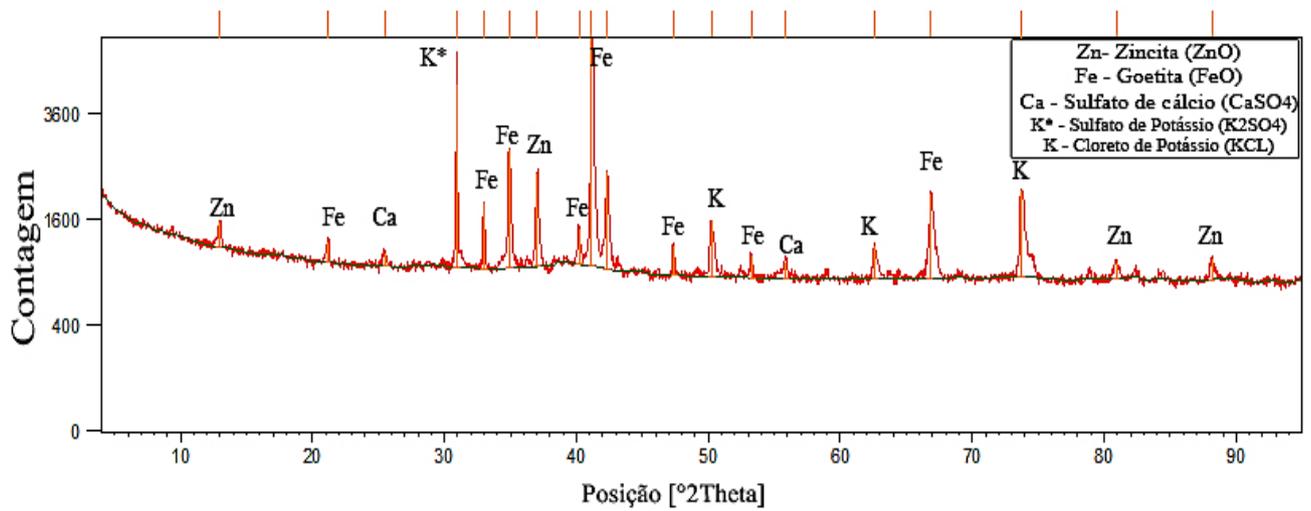


Fonte: Castro, (2017).

5.4.2 Pó de despoeiramento antes e após lavagem

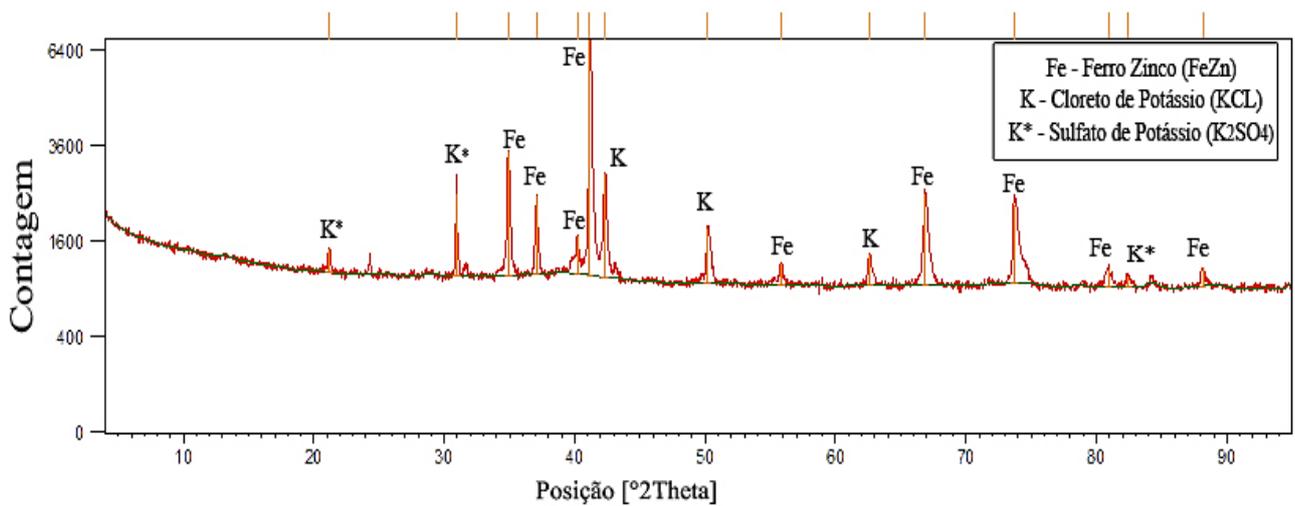
A análise por DRX dos compostos químicos presentes no pó de despoeiramento foram feitas voltadas para a identificação dos sais presentes no resíduo, antes e após lavagem conforme ilustra a Figura 17 e 18, respectivamente.

Figura 17 - Análise do pó de despoeiramento antes da lavagem por DRX



Fonte: Autor, (2017).

Figura 18 - Análise do pó de despoeiramento após a lavagem por DRX



Fonte: Autor, (2017).

Observou-se a presença de sulfato de cálcio apenas na amostra que não passou pelo processo de lavagem. Este composto pode ter sido solubilizado em pequena quantidade através da lavagem e por isso não foi identificado após esse procedimento, porém isso não exclui a possibilidade de ainda haver a presença desse composto.

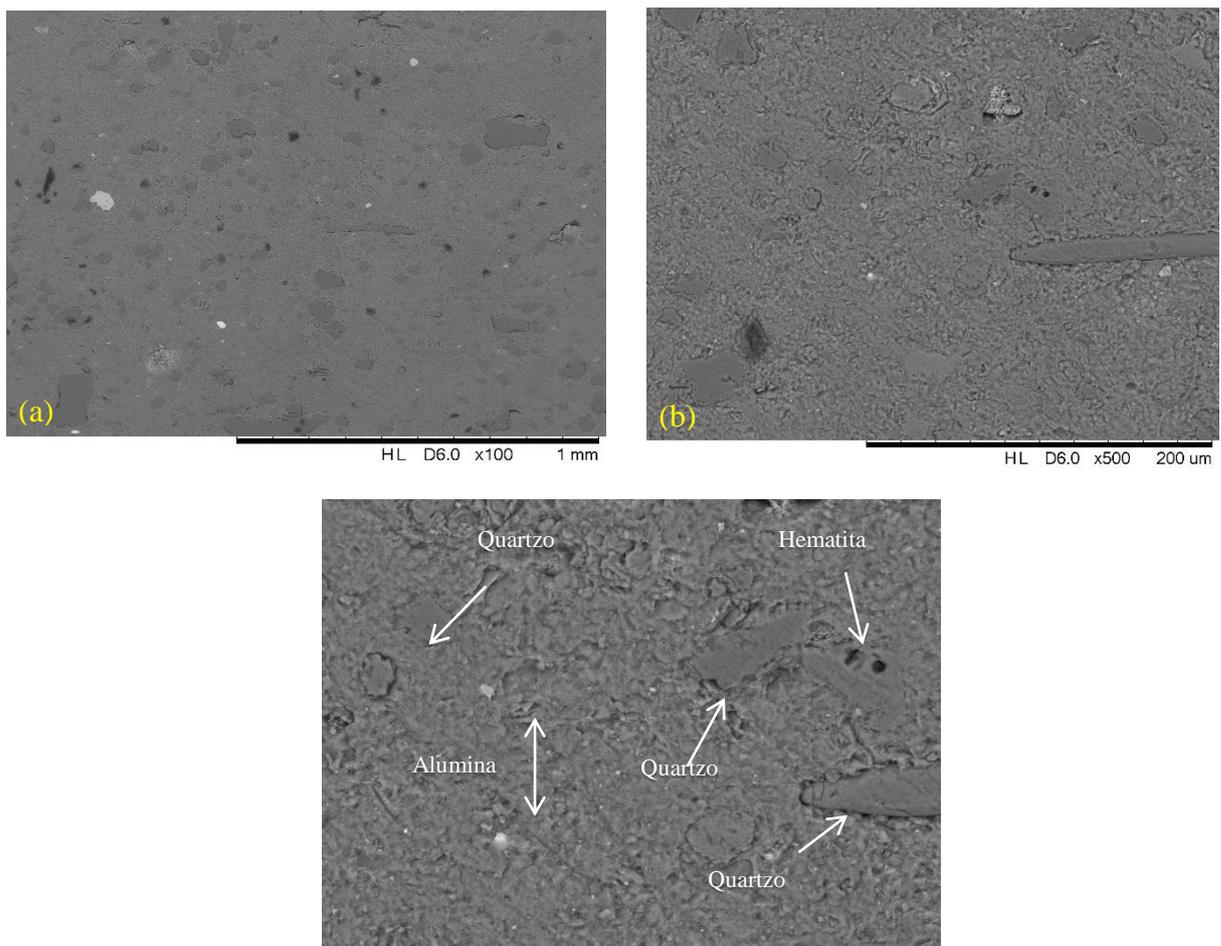
O cloreto e sulfato de potássio foi identificado em ambas às amostras e de acordo com a Tabela 1, é possível que este elemento químico esteja presente como sais ou cloretos nas fases que o pó de despoejamento pode apresentar.

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

5.5.1 Argila

A morfologia da composição argilosa com suas respectivas fases é apresentada na Figura 19. Nesta análise, assim como DRX, foi identificada as fases comuns às argilas, onde observou-se por meio de EDS a predominância dos elementos Silício, Ferro e Alumínio.

Figura 19 - Morfologia da argila - (a) 1 mm (b) 200 μm (c) 100 μm



(c)

Fonte: Castro (2017)

Como já esperado, a argila não apresentou sais solúveis que poderiam vir a ter a disposição de formar eflorescência, o que possivelmente explica a não formação dessa degradação em nenhum dos corpos de provas de composição somente argilosa.

5.5.2 Pó de despoeiramento antes e após lavagem

O pó de despoeiramento após ser lavado apresentou leve alteração de cor, com uns tons mais claro do que o usual (Figura 20) o que provavelmente tenha causado uma maior uniformidade de cores e menor presença de manchas nas formulações (Figura 14) que continham o rejeito lavado.

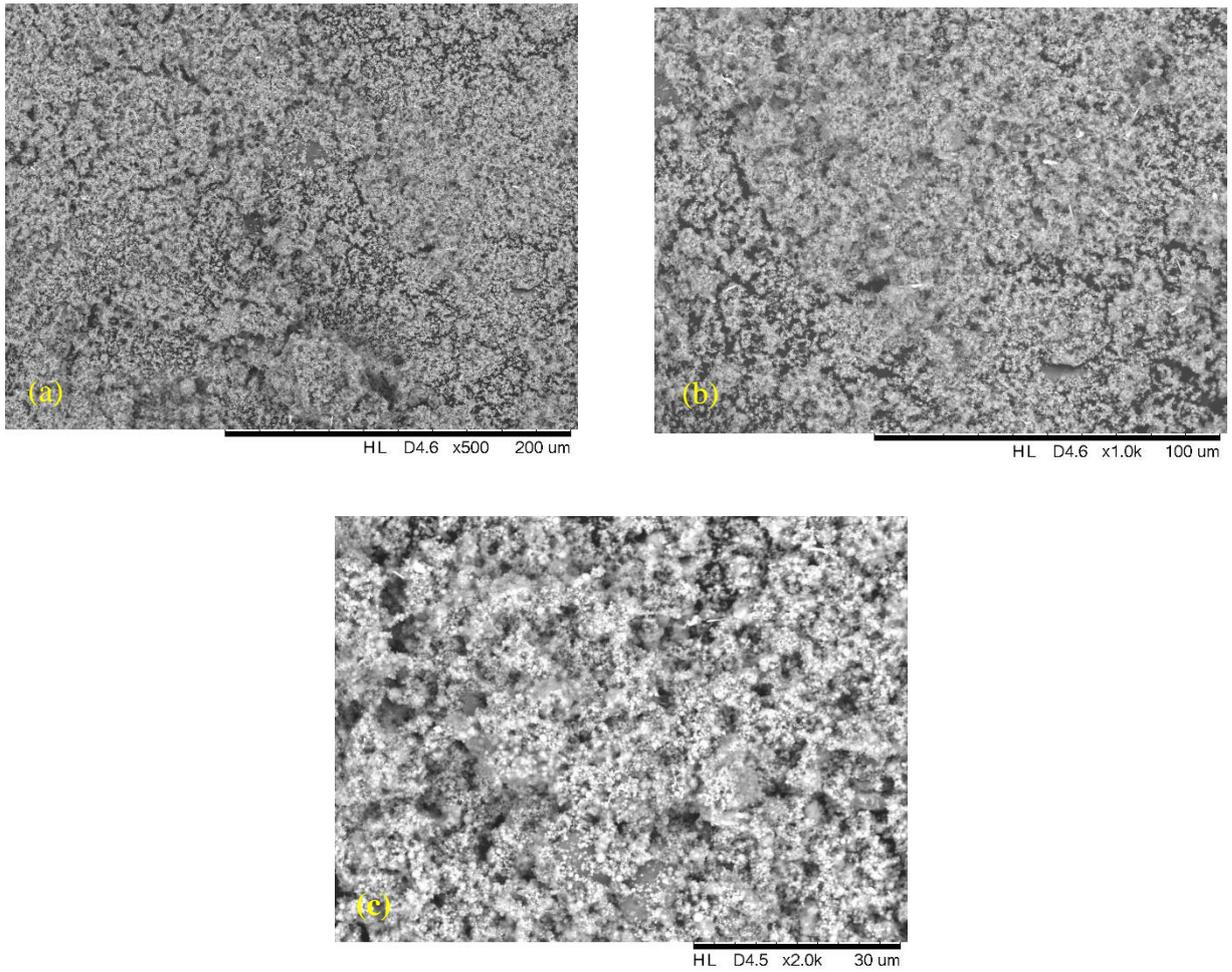
Figura 20 - (a) pó de despoeiramento não lavado e (b) pó de despoeiramento lavado



Fonte: Autor, (2016).

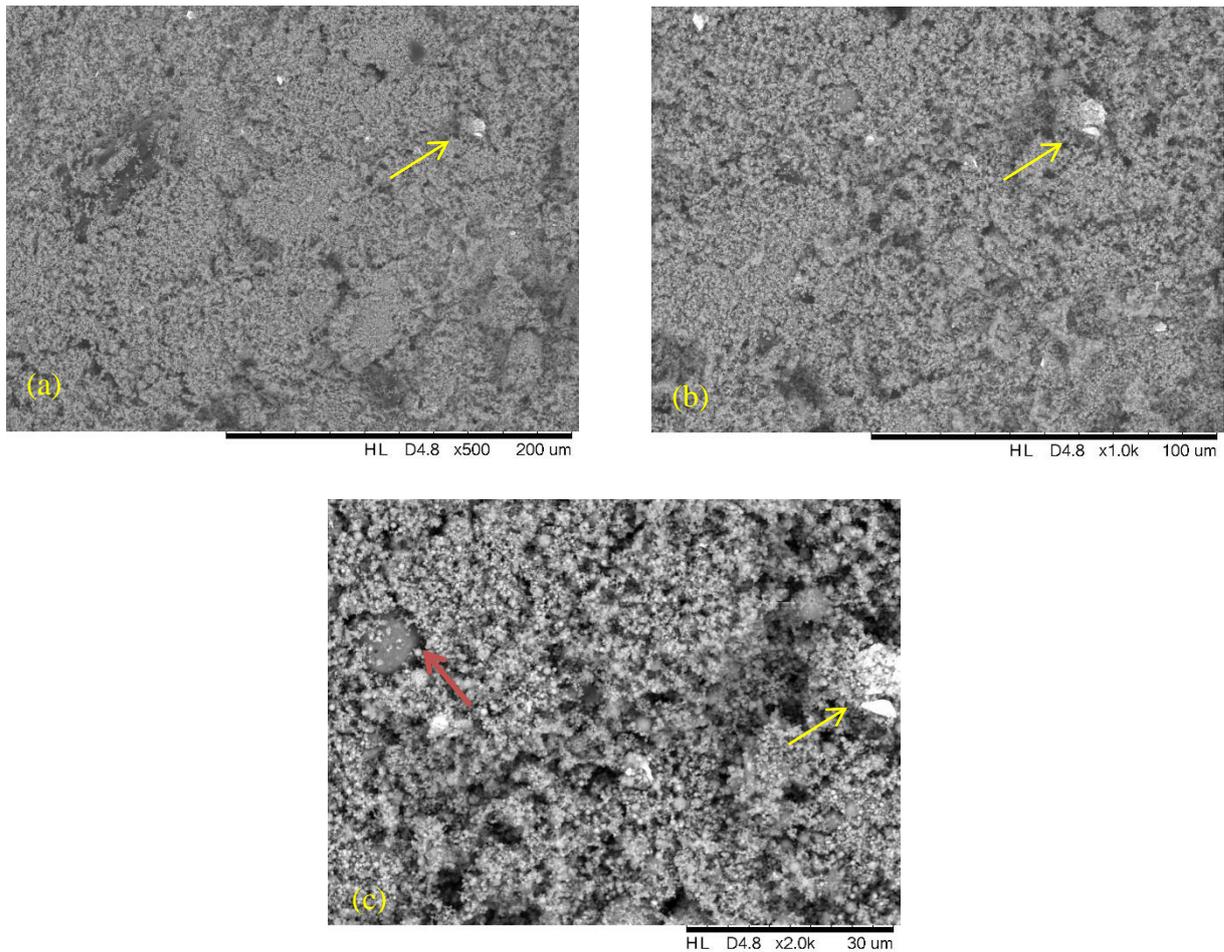
A morfologia do pó de despoeiramento antes e após lavagem é apresentada nas Figuras 21 e 22, respectivamente.

Figura 21 - Pó de despeiramento não lavado (a) 200 μm (b) 100 μm (c) 30 μm



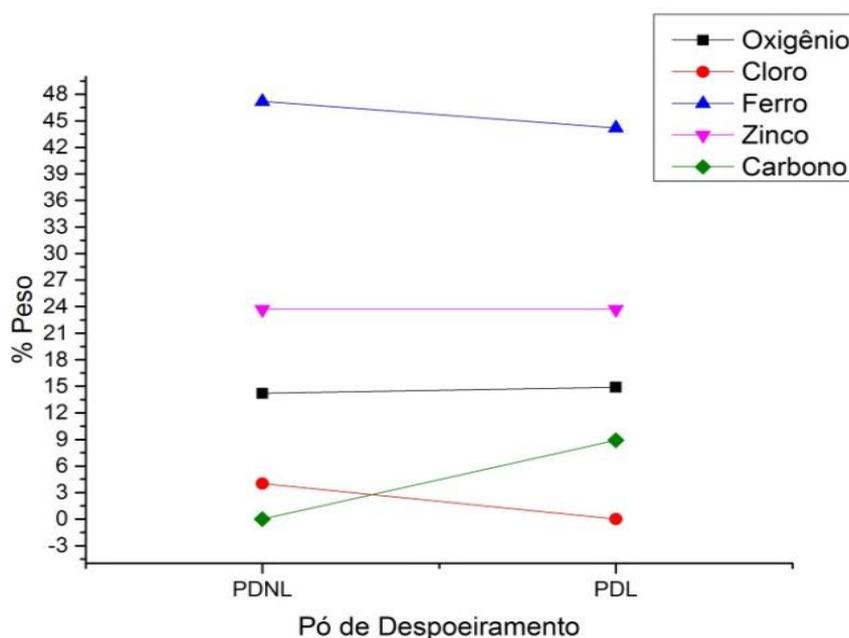
Fonte: Autor, (2017).

Figura 22 - Pó de despoejamento lavado (a) 200 μm (b) 100 μm (c) 30 μm



Fonte: Autor, (2017).

De forma geral, a morfologia entre as duas amostras não apresenta diferenças perceptíveis. Na Figura 22 observou-se a presença de uma fase (marcada com seta amarela) que é composta em uma maioria por Carbono, Oxigênio, Ferro, Zinco e Chumbo. O chumbo se apresenta principalmente como óxido, além da possibilidade da presença de sulfato de chumbo (PbSO_4) e cloreto chumbo (PbCl_2). A fase marcada com seta vermelha aponta para a existência de Ferro, Zinco, Silício, Oxigênio e Cálcio. A Figura 23 estima a porcentagem de elementos presentes no pó de despoejamento não lavado (PDNL) e pó de despoejamento lavado (PDL).

Figura 23 - Porcentagem de elementos presentes no rejeito siderúrgico antes e após lavagem

Fonte: Autor, (2017).

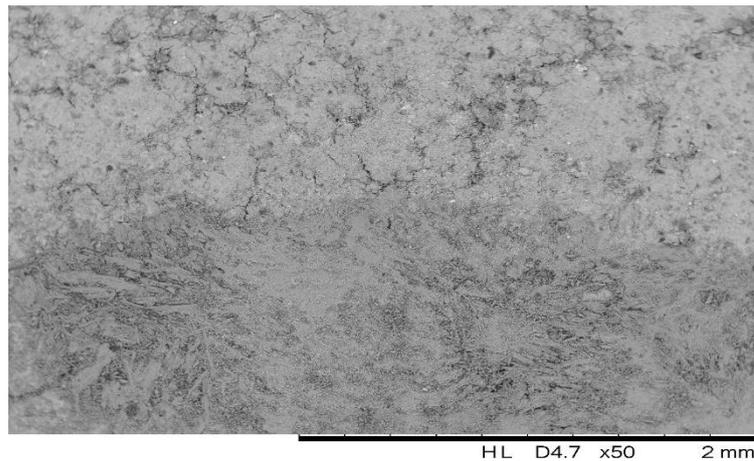
Por meio da figura 23 nota-se a presença de cloro no PDNL, em pequenas quantidades, onde por sua vez não é detectado no PDL. Possivelmente ocorreu a solubilização desse elemento agregado a outro formando um composto, por meio do processo de lavagem. Também constatou-se a presença do carbono no PDL, ao contrário do PDNL. A presença dos demais elementos mantiveram-se em valores parecidos para as duas amostras.

Observa-se que devido ao fato de este ser um resíduo provindo da produção do aço, os elementos que sempre apresentam uma maior frequência de presença em todos os pontos e áreas analisadas do pó de despoeiramento, são o Ferro, Zinco e Oxigênio. Todos os elementos encontrados estão de acordo com Nyrenda (1991), inclusive quanto à predominância dos elementos Fe, Zn e O.

5.5.3 Corpos de prova

Denominada como “área mista”, a Figura 24 diferencia as duas áreas pela diferença de brilho, sendo a parte superior e inferior correspondente à área sem a presença do desgaste e com a presença do mesmo, respectivamente.

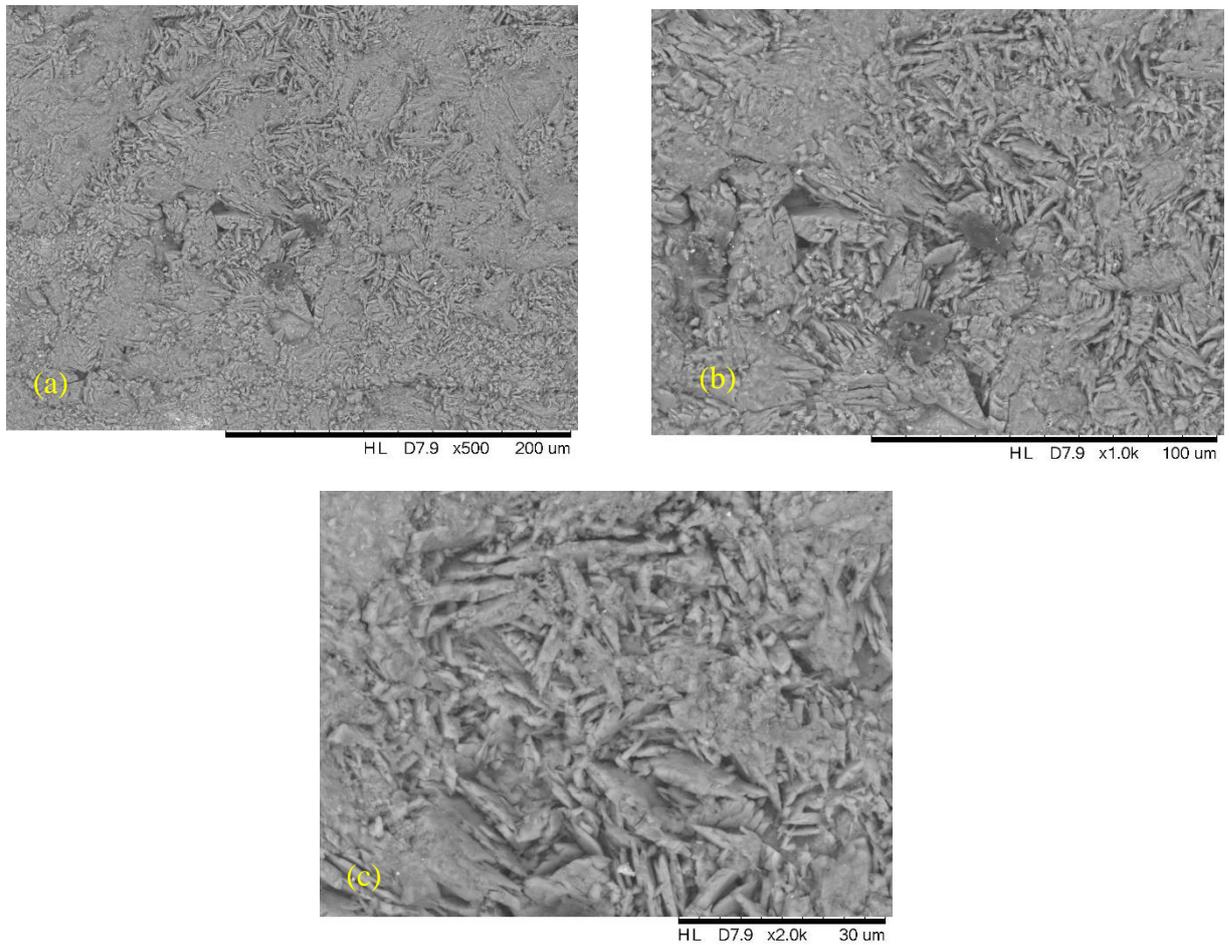
Figura 24 - Fase mista (2 mm).



Fonte: Autor, (2017).

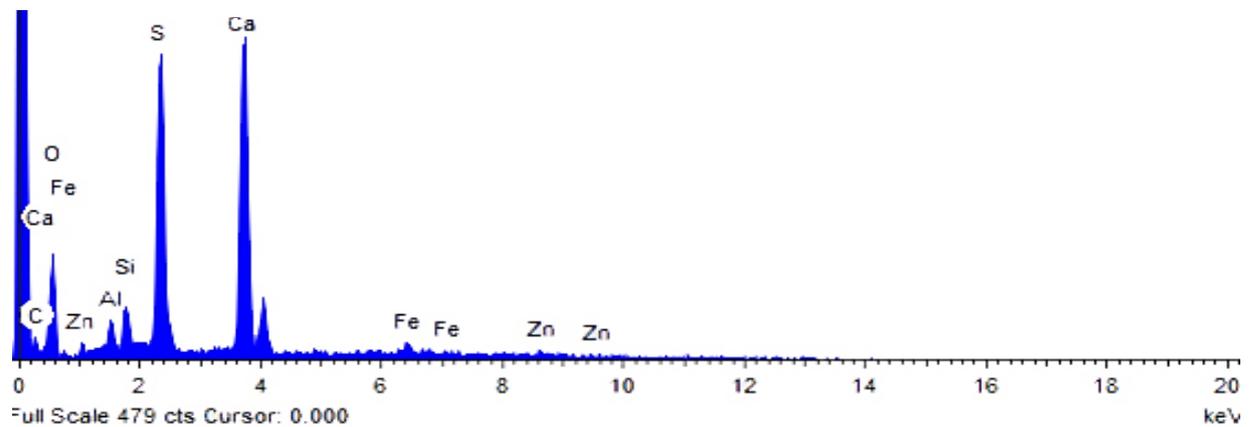
A área marcada pelo desgaste foi analisada por MEV (Figura 25) e Espectroscopia por Dispersão de Energia (Figura 26), esta última com o objetivo de identificar e estimar os elementos químicos com maior predominância na área de formação da eflorescência.

Figura 32 - Área efluorescência (a) 200 μm (b) 100 μm (c) 30 μm



Fonte: Autor, (2017).

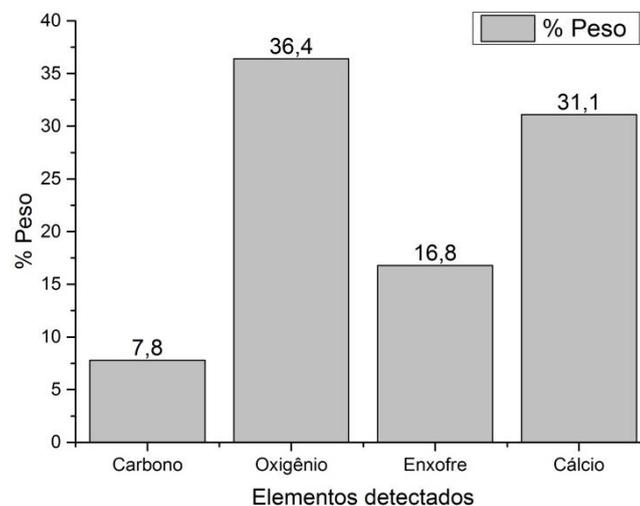
Figura 41 - Espectro dos elementos presentes na área de desgaste.



Fonte: Autor, (2017).

Na Figura 25 é possível observar a estrutura microscópica da eflorescência, que apresenta semelhança de lamelas em sentido descontínuo. Essas estruturas possuem em sua grande maioria a presença de Sulfato, Cálcio, Oxigênio e Carbono o que pode comprovar a formação de sulfato de cálcio, responsável pela abundante e rápida formação de eflorescência, além da sua baixa solubilidade em água no valor de 0,241 G/100 ml de água fria. A Figura 27 estima a quantidade detectada dos elementos na área de desgaste com maior predominância por meio da análise de EDS.

Figura 50 - Elementos detectados na área de desgaste.



Fonte: Autor, (2017).

Os sulfatos de cálcio (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 o pó de despoeiramento contém.

MONTEIRO (2009), realizou um estudo 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 ao resíduo pó de despoeiramento.

Em maior ou menor grau todos os sais solúveis que existem no rejeito tendem a ser mobilizados na direção da superfície, onde os sais alcalinos terrosos são os mais indesejáveis

porque tem pontos de fusão mais elevados, como o 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).

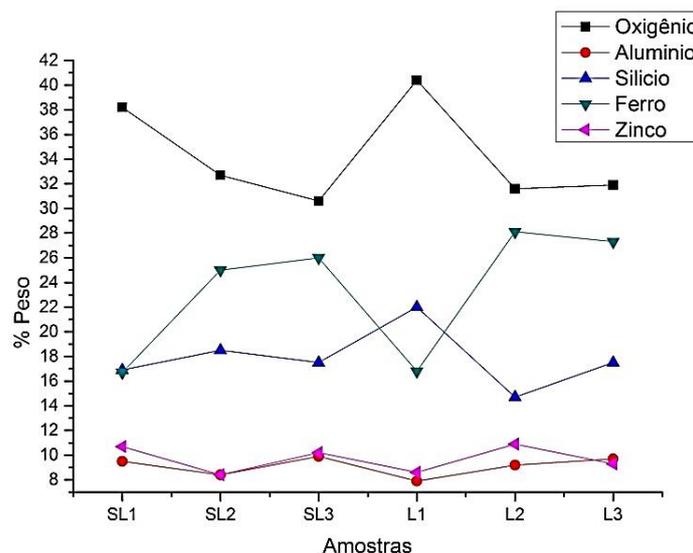
O zinco também é encontrado, porém em baixa quantidade. Possivelmente também há a presença deste elemento encontrado no composto sulfato de zinco, que pode também formar eflorescência e possui um alto valor de solubilidade correspondente a 86,5 G/100 ml de água fria e 740°C de temperatura de decomposição.

A área de desgaste em questão corresponde ao corpo de prova sinterizado a 1000 °C e sem o processo de lavagem do resíduo. Constatou-se que os elementos presentes na eflorescência são sempre os mesmos, variando apenas a área que ocupam cada formulação, apresentando-se em maior ou menor quantidade dependendo da composição como ilustrado na Tabela 5.

A Figura 28 apresenta a porcentagem dos elementos principais e com maior incidência

Figura 58 - Porcentagem em peso de O, Al, Si, Fe e Zn identificados nos corpos de prova

detectada por EI



3).

Através da relação entre % de peso dos elementos e amostras, observa-se que não há uma relação definida dos elementos em questão nas amostras e o comportamento da formação de eflorescência nesses corpos de prova. O teor de zinco sofreu pequenas variações entre os corpos de prova variando entre um valor de 9 e 13%. Por outro lado, uma variação visível foi no teor de silício, que apresentou o menor valor para a amostra L3.

5.6 ANÁLISE QUÍMICA POR FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X (FRX)

5.6.1 Argila e pó de despoiramento antes e após lavagem

Os resultados da argila, pó de despoiramento não lavado e lavado foram obtidos na

Elementos % em peso	Amostras		
	Argila	PDNL	PDL
SO ₃	-	2,08	0
ZnO	-	31,97	34,47
Cl	-	4,74	0,30
Al ₂ O ₃	20,17	0,06	0,06
CaO	-	4,92	3,98
Fe ₂ O ₃	5,96	44,25	48,82
K ₂ O	1,61	2,19	0,16
MgO	0,53	1,29	1,69
Na ₂ O	0,33	-	-
P ₂ O ₅	0,12	0,07	0,09
SiO ₂	61,63	2,08	3,80

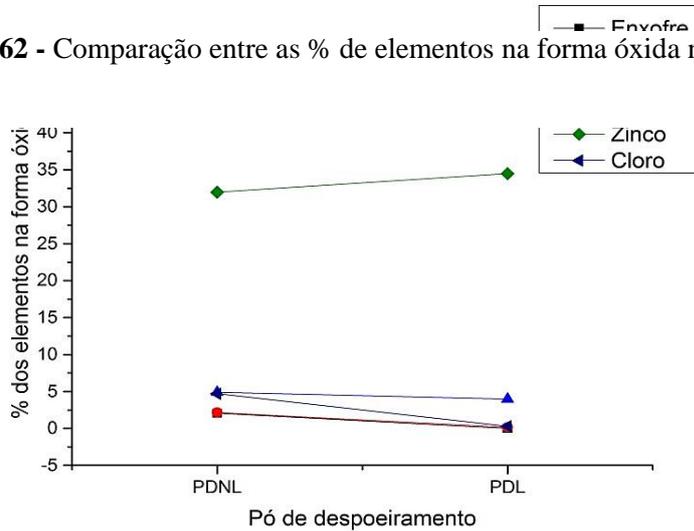
fluorescência de Raios X são apresentados em percentagem em massa dos óxidos na Tabela 10.

Tabela 10 – Análise química das matérias primas

Fonte: Autor, (2017).

A argila não apresentou teores de SO₃, ZnO, Cl e CaO, que são um dos principais elementos responsáveis pela formação da eflorescência em materiais cerâmicos. Por outro lado, identificou-se esses elementos no PDNL bem como no PDL, porém em menores teores neste último. A Figura 29 apresenta uma comparação entre o PDNL e PDL quanto aos elementos principais causadores da eflorescência e os de maior presença comuns ao rejeito.

Figura 62 - Comparação entre as % de elementos na forma óxida no PDNL e PDL



Fonte: Autor, (2017).

Destaca-se a solubilização do cloro que passou de um teor de 4,74% para 0,30% após o processo de lavagem. O cálcio apresentou uma redução de 4,92% para 3,98% de elementos em peso, não manifestando uma alta solubilidade, o que possivelmente deve-se ao fato de que este elemento quando na forma de sulfato, apresenta baixa solubilidade em água. No PDL não foi identificada a presença do enxofre, diferentemente da amostra de PDNL que apresentou um teor de 2,08% em peso. O potássio foi identificado nas três amostras, sendo em menor teor para o PDL, porém este elemento na forma de sulfato, conforme a Tabela 2, apresenta alta solubilidade em água e possivelmente não é responsável pela formação da eflorescência.

Outros elementos como o sulfato de Cádmio (CdSO_4), sulfato de Magnésio (MgSO_4) e cloreto de Bário (BaCl_2) que conforme a literatura (Tabela 3) se agregados à argila podem formar eflorescência, não foram identificados por nenhuma das metodologias de análise utilizada neste trabalho, indicando que possivelmente não há a presença destes compostos.

6. CONCLUSÕES

- O processo de lavagem realizado no pó de despoeiramento agregado a argila apresentou consideráveis diferenças na formação visível de eflorescência nos corpos de prova.
- Não era esperado que os corpos de prova apresentassem uma maior homogeneidade na cor com o resíduo lavado, o que se configura como um fato estético positivo, além de um menor índice de retração e porosidade.
- A quantificação da eflorescência por meio do *software Image J* possibilitou resultados mais objetivos com relação à análise apenas visual. A análise dos extratos de solubilização foi de fundamental importância para a quantificação geral dos sais solúveis presentes no pó de despoeiramento.
- O teor de cloreto quantificado nesses extratos encontra-se dentro da norma a partir do uso de 2 litros de água, porém o teor de sulfatos não apresentou valores menores do que o permitido em nenhuma das lavagens realizadas.
- Com a caracterização das fases e componentes químicos das matérias primas e corpos de prova foi possível a identificação de elementos que possivelmente podem ser responsáveis pela formação da patologia estudada, todavia, não foi possível estimar o teor destes elementos com alto grau de confiabilidade nas áreas das amostras em que não se observou a formação de eflorescência.
- A análise na área em que se apresentou a patologia em questão foi de extrema importância para este trabalho, pois através desse processo foi possível perceber a predominância dos elementos que compõe o sulfato de cálcio, sendo este apontado como um dos maiores responsáveis pela formação da eflorescência.
- O aumento de temperatura possui considerável influência na composição estudada, pois quanto maior é o valor de temperatura utilizado para sinterização, menor é a porosidade do material e conseqüentemente, menor é a formação da eflorescência.
- O processo de lavagem no pó de despoeiramento quando associado ao aumento de temperatura pode contribuir para a diminuição do transporte de sais solúveis no material

cerâmico, e conseqüentemente minimizar os efeitos causados pela degradação da eflorescência.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

1. Realizar procedimento para obtenção do extrato lixiviado do resíduo pó de despoejamento conforme norma ABNT 1005, para classificação e avaliação das mudanças que vierem a ocorrer no rejeito.
2. Avaliar a adição de carbonato de bário na formulação para avaliação de precipitação dos sais solúveis e possivelmente impedir a formação da eflorescência.
3. Avaliação dos cátions solúveis nos extratos solubilizados.
4. Realizar o teste de eflorescência em materiais cerâmicos em escala piloto.
5. Análise estatística da formação de eflorescência

REFERÊNCIAS

ABREU, Mírian A. de. **Reciclagem do resíduo de cromo da indústria do curtume como pigmentos cerâmicos**. 2006. 169 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

ALBUQUERQUE, Victor Hugo Costa de et al . **Sistema de segmentação de imagens para quantificação de microestruturas em metais utilizando redes neurais artificiais**. Matéria (Rio J.), Rio de Janeiro , v. 12, n. 2, p. 394-407, 2007

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.

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.

ANDRÉS, A., DIAZ, C., COZ, A., VIGURI, J. R. e IRABIEN, A., **Correlación entre Materias Primas, Productos y Eflorescencias en la Fabricación del Ladrillo Cerámico**. XLIII Congreso de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio. Manises, Valencia, 2003.

Associação Brasileira de Normas Técnicas: **NBR 10.004. Resíduos Sólidos- Classificação**. Segunda Edição. 2004.

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.

BREHM, F. A.: **Adição de Óxido de Zinco (ZnO) em Pasta de Cimento Portland Vizando Viabilizar a Reciclagem de Pós de Despoejamento Elétrica (PAE) na construção civil**. Porto Alegre, 105 p, 2004. Tese de Doutorado – Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgica e de Materiais. UFRGS.

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.

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

CHWAST, J., TODOROVIC, J., JANSSEN, H., ELSEEN, 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>, 08 de março de 2017 as 15:22 h

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.

DELHAES, C.; HAUCK, A.; NEUSCHUTZ D.; **Mechanism of dust generation in a stainless steelmaking converter.** *Steel Research*, v. 64, n.1, 1993.

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.

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.

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.

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

MELO, L. G. A. **Síntese e caracterização de geopolímeros contendo filitos.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica e de Materiais – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 185p, 2011.

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.

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.

NYIRENDA, R.L. **“The processing of steelmaking flue-dust: A review.”.** *Mineral Engeneering* 4, 1991, 7-11, pp. 1003-1025.

NYIRENDA, R.: **The Processing of Steelmaking Flue-Dust : A Review.** *Minerals Engineering*, v. 4, ns. 7-11, p. 1003-1025,1991.

RAMOS, R. A. **Caracterização do pó de aciaria elétrica e estudo da viabilidade de processos de aproveitamento**. 54f. Monografia de Graduação (Bacharel) – Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

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.

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, 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.

SANTOS, P. H. C. e FILHO, A. F. S. **Eflorescência: Causas e Consequências**. 2008. Disponível em: http://info.ucsal.br/banmon/Arquivos/ART_130109.pdf Acesso em: 16/11/2016 às 15h52min.

SILVA, M. C.: **Reciclagem de Pó de Aciaria Elétrica como Matéria-Prima na Fabricação de Materiais Cerâmicos Argilosos: Controle das Emissões Atmosféricas de Zinco**. Porto Alegre, 139p, 2006. Tese de Doutorado - Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais. UFRGS

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

TAKANO,C. ; MANTOVANI, M.C.; CAVALLANE, F.: **Caracterização de Três Tipos de Poeira em Fornos Elétricos a arco**.53º Congresso da ABM,Belo Horizonte, 1329-1343,1998.

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

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. Acesso em: 16 de novembro de 2016 às 15h30min.

WOOLFITT, C. **Soluble salts in masonry**. The building conservation- Roma/ Itália. Disponível em: http://www.buildingconservation.com/articles/salts/salts_masonry.htm. Acesso em: 22 de março de 2017 às 14:03

ANEXO A – TRABALHOS PUBLICADOS E DIVULGADOS EM EVENTOS

COSTA, F.G. ; CASTRO, M.A M. ; BORBA, S.C. ; FAGURY NETO, E. ; RABELO, A.A. .
Pó de despoejamento na fabricação de tijolos ecológicos. In: 21° CBECIMAT - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2014, Cuiabá. Anais do 21° CBECIMAT - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2014. p. 1632-1639.

BORBA, S.C. ; CASTRO, M.A M. ; **COSTA, F.G.** ; FAGURY NETO, E. ; RABELO, A.A. .
Avaliação das propriedades tecnológicas dos tijolos solo-cimento formulados com refugo e adições de escória de aciaria. In: 21° CBECIMAT - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2014, Cuiabá. Anais do 21° CBECIMAT - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2014. p. 1616-1623.

CASTRO, M.A M. ; **COSTA, F.G.** ; BORBA, S.C. ; FAGURY NETO, E. ; RABELO, A.A.
Reaproveitamento de tijolos ecológicos através do rejeito dos mesmos e do resíduo siderúrgico pó de balão. In: 21° CBECIMAT - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2014, Cuiabá. Anais do 21° CBECIMAT - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2014. p. 1624-163

CASTRO, M.A M. ; **COSTA, F.G.** ; TAVARES, B.A.C. ; FAGURY NETO, E. ; RABELO, A.A. .
Utilização de rejeito de minério sulfetado de cobre em cerâmica estrutural. In: 70° Congresso Anual da ABM Internacional e ao 15° ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 2015, Rio de Janeiro.

CASTRO, M.A.M. ; **COSTA, F.G.** ; BORBA, S.C. ; FAGURY NETO, E. ; RABELO, A.A. .
Avaliação das propriedades físicas e mecânicas de blocos de solo-cimento formulados com coprodutos siderúrgicos. *Matéria (UFRJ)*, v. 21, p. 666-676, 2016.

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.