



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE MARABÁ
FACULDADE DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**

ANDRÉIA ROCHA DA SILVA

INCORPORAÇÃO DE PÓ DE DESPOEIRAMENTO EM CERÂMICA VERMELHA

**MARABÁ
2013**

ANDRÉIA ROCHA DA SILVA

INCORPORAÇÃO DE PÓ DE DESPOEIRAMENTO EM CERÂMICA VERMELHA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Materiais, Campus Universitário de Marabá, Universidade Federal do Pará. Orientador: Prof. Dr. Adriano Alves Rabelo.

MARABÁ
2013

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
(Biblioteca Josineide Tavares, Marabá-PA)

Silva, Andréia Rocha da.

Incorporação de pó de despoeiramento em cerâmica vermelha / Andréia Rocha da Silva; Orientador, Adriano Alves Rebelo – 2013.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) Universidade Federal do Pará, Faculdade de Engenharia de Materiais, 2013.

1. Engenharia de Materiais. 2. Reaproveitamento – sobras, refugos, etc. 3. Cerâmica vermelha. I. Título.

CDD - 22 ed.: 570.11

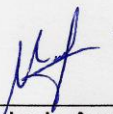
ANDRÉIA ROCHA DA SILVA

INCORPORAÇÃO DE PÓ DE DESPOEIRAMENTO EM CERÂMICA VERMELHA

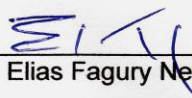
Trabalho de Conclusão de Curso apresentado para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Materiais, Campus Universitário de Marabá, Universidade Federal do Pará. Orientador: Prof. Dr. Adriano Alves Rabelo.

Data de aprovação: 19 de agosto de 2013

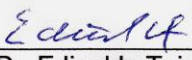
Banca examinadora:



Prof. Márcio Paulo de Araújo Mafra – UFPA - Membro interno



Prof. Dr. Elias Fagury Neto – UFPA - Membro interno



Prof. Dr. Edinaldo Teixeira – UFPA - Membro interno



Prof. Dr. Adriano Alves Rabelo – UFPA - Orientador

Ao Criador!

AGRADECIMENTOS

À Deus que me sustenta.

À minha família pelo amor, pelas oportunidades dadas e pelos esforços feitos para que os estudos fossem sempre priorizados.

Aos professores, em especial, ao orientador Adriano Alves Rabelo.

A Técnica do laboratório Tatiane, sempre disposta a ajudar quando foi preciso;

Aos técnicos da secretaria da faculdade, Julia Rodrigues, Marcell e a bibliotecária;

Aos os meus colegas de curso, pelo enorme companheirismo ao longo de todo o trajeto.

E finalmente agradeço a todos que de certa forma se envolveram e involuntariamente contribuíram na realização deste trabalho e na minha formação acadêmica e profissional.

RESUMO

O pó de despoeiramento é um dos resíduos sólidos gerados pela indústria durante a produção de aço em forno elétrico a arco. Este resíduo possui elevado teor de ferro e zinco, o que o habilita a ser utilizado como material secundário em formulações de cerâmica vermelha. Neste trabalho, foram elaboradas formulações cerâmicas com adição de 10 a 40%p. do pó de despoeiramento, que depois de prensados foram sinterizados em temperaturas de 850 a 1000 °C em forno elétrico. Verificou-se que a incorporação do rejeito siderúrgico pó de despoeiramento à massa cerâmica proporcionou melhorias consideráveis nas características físicas e mecânicas avaliadas através de ensaios tecnológicos. Os melhores resultados foram para a formulação com 30% de pó de despoeiramento na temperatura de 1000 °C, mas foi possível obter boas propriedades em temperaturas abaixo de 1000 °C como a absorção de água e a resistência mecânica, com isso torna-se possível utilizar temperaturas de queima menores.

Palavras-chave: Pó de despoeiramento, reaproveitamento, cerâmica vermelha.

ABSTRACT

The dusting removal powder is a solid waste generated by the industry for the production of steel in electric arc furnaces. This waste has a high content of iron and zinc, which enables it to be used as secondary material in the formulation of red ceramics. In this work, ceramic formulations were prepared by adding 10 - 40 wt% dusting powder, that after pressed were sintered at temperatures 850 - 1000 °C in an electric furnace. It has been found that the incorporation of waste steel powder for the ceramic dedusting provided significant improvements in physical and mechanical characteristics evaluated by testing technology. The best results was the formulation of 30% dusting powder at a temperature of 1000 °C, but it was possible to obtain good properties at temperatures below 1000 ° C as water absorption and mechanical strength, it is possible to use smaller firing temperatures.

Keywords: Powder dust removal, recycling, red ceramic.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1. OBJETIVOS	15
1.1.1. Objetivos Gerais	15
1.1.2. Objetivos Específicos	15
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1. PO DE DESPOEIRAMENTO	16
2.1.1. Mecanismos de Formação de Pó de Despoeiramento	18
2.1.2. Propriedades Físicas de Pós de Despoeiramento	18
2.1.3. Composição Química e Mineralógica de Pó de Despoeiramento	21
2.1.4. Reaproveitamento do Zinco	23
2.1.5. Preparação das Matéria-Primas Cerâmicas	24
2.1.5.1. Conformação	25
2.1.5.2. Compactabilidade	25
2.1.5.3. Queima/Sinterização	29
2.2. UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS COMO MATÉRIA-PRIMA	32
2.2.1. Critérios para utilização de resíduos como matéria-prima	33
2.3. POSSÍVEIS EMISSÕES GASOSAS GERADAS NO PROCESSAMENTO CERÂMICO	35
3. MATERIAIS E MÉTODOS	36
3.1. METODOLOGIA PARA CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	38
3.1.1. Formulação	38
3.1.2. Conformação	39
3.1.3. Secagem	39
3.1.4. Queima	39
3.2. CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA APÓS QUEIMA	40
3.2.1. Absorção de Água	40
3.2.2. Porosidade Aparente	41
3.2.3. Densidade Aparente	41
3.2.4. Retração Linear	42
3.2.5. Resistência à Flexão	42
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	43
4.1. ANÁLISE QUÍMICA	43
4.2. ANÁLISE MORFOLÓGICA	46
4.3. ANÁLISE TÉRMICA	47
4.4. CARACTERIZAÇÃO DO CORPO DE PROVA QUEIMA	47
4.4.1. Absorção de Água	48
4.4.2. Porosidade Aparente	49
4.4.3. Densidade Aparente	50
4.4.4. Retração Linear	51
4.4.5. Resistência à Flexão	52
5. AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS	52
6. CONCLUSÕES	55
7. REFERÊNCIAS	56

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Fluxo de produção de um aço englobando vários processos utilizados em diferentes siderúrgicas.	16
Figura 2 - Emissão de fumos durante o vazamento de aço em forno elétrico.	17
Figura 3 - Representação esquemática do empacotamento de esferas de diferentes tamanhos.	27
Figura 4 - Variação da compactabilidade de misturas de esferas de dois tamanhos em função da proporção de esferas grandes.	28
Figura 5 - Variação da compactabilidade de misturas de esferas de dois tamanhos em função da proporção de esferas grandes e da relação de diâmetros.	29
Figura 6 - Redução da concentração dos poros devido à variação no tamanho de grãos.	31
Figura 7 - Análise térmica diferencial (DTA) e termogravimétrica (TG) da argila	37
Figura 8 - Fluxograma dos ensaios realizados no programa experimental.	45
Figura 9 – (a) Imagem de pó de despoeiramento obtidas em MEV.	46
Figura 9 – (b) Imagem de partículas de pó de despoeiramento obtidas em MEV, com detalhe para os aglomerados.	47
Figura 10 - Análise térmica diferencial (DTA) e termogravimétrica (TG) do pó de despoeiramento.	47
Figura 11 - Variação da absorção de água em função da porcentagem em peso de pó de despoeiramento em argila vermelha e da temperatura de queima.	48
Figura 12 - Variação da porosidade em função da porcentagem em peso de pó de despoeiramento em argila vermelha e da temperatura de queima.	49

Figura 13 - Variação da densidade aparente em função da porcentagem em peso de pó de despoejamento em argila e da temperatura de queima. 50

Figura 14 - Variação da retração linear em função da porcentagem em peso de pó de despoejamento e da temperatura de queima. 51

Figura 15 - Variação da resistência mecânica em função da porcentagem em peso de pó de despoejamento em argila e da temperatura de queima. 52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Propriedade física de pós de despoejamento e seus respectivos problemas associados ao seu manuseio, descarte e tratamento.	21
Tabela 2- Fases mineralógicas dos principais elementos presentes em pós de fornos elétricos e conversores.	23
Tabela 3- Identificação das formulações das massas cerâmicas estudadas.	38
Tabela 4- Identificação das formulações das massas cerâmicas estudadas.	44
Tabela 5- Valores limites para produtos cerâmicos estruturais.	53

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas

CONAMA - Conselho Nacional de Meio Ambiente

DRX - Difração de Raios X

DTA - Análise Térmica Diferencial

FRX - Fluorescência de Raios X

MEV - Microscopia Eletrônica de Varredura

FTIR - Infravermelho com Transformada de Fourier

SEMA - Secretaria Estadual de Meio Ambiente

1. INTRODUÇÃO

O 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 despoejamento, gerado em forno elétrico à 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 à fabricação do aço.

O pó de despoejamento é classificado como resíduo perigoso tanto no Brasil, pela norma NBR 10.004 [1], quanto em outros países produtores de aço, como EUA [2], Japão e Alemanha [3], e sua composição depende do tipo de aço produzido [4-7]. Sob esta classificação, os pós gerados em forno elétrico à 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.

A produção brasileira de aço bruto encontra-se atualmente em torno de 132 milhões de toneladas. A produção mundial está em crescimento, assim como a produção nacional [8]. Com o aumento destas, cresce também a quantidade de resíduos gerada no processo. Em torno de 15 a 20 Kg de pó são gerados por toneladas de aço produzido em indústrias siderúrgicas.

Atualmente, no Brasil, não existe um método ou processo tecnicamente viável que possa utilizar este resíduo no processo ou tratá-lo para uma deposição adequada, evitando-se impactos ao meio ambiente. Como solução para este problema, estudos de reciclagem deste material têm sido realizados, tanto para a reciclagem de metais de interesse ao próprio processo de fabricação, quanto como matéria-prima para outras indústrias, como por exemplo, as de materiais de construção civil.

A indústria cerâmica apresenta um grande potencial para absorção de resíduos sólidos, devido, principalmente, à heterogeneidade das matérias-primas utilizadas, normalmente argilosas. Já existem diversos estudos que avaliam as propriedades de materiais cerâmicos pela incorporação de resíduos [9, 10]. O

aproveitamento de resíduos contribuiria para uma menor utilização de matéria-prima argilosa, possibilitando assim, uma economia de recursos naturais de boa qualidade que se apresentam seriamente comprometidas em certas áreas. A incorporação de resíduos industriais em materiais cerâmicos é uma prática ambientalmente correta e que resulta, em alguns casos, na melhoria do processamento e da qualidade dos produtos cerâmicos. Por outro lado a reciclagem implicaria na redução dos custos energéticos provenientes da extração e beneficiamento de argilas bem como na diversificação da oferta de matéria primas para a indústria cerâmica.

A incorporação de resíduos em materiais cerâmicos deve avaliar o impacto ambiental associado às novas matérias primas.

A amostra do pó de despoeiramento em estudo contém muito óxido de zinco, da ordem de 28%.

Zinco é um metal volátil, evapora 907 °C. A concentração deste elemento no pó de despoeiramento, quando este resíduo é utilizado como matéria-prima secundária na fabricação de materiais cerâmicos, pode gerar emissões atmosféricas contendo Zn durante a queima de formulações cerâmicas.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivos Gerais

Este trabalho tem por objetivo investigar a reciclagem de pó de despoeiramento, como matéria-prima secundária na fabricação de materiais cerâmicos argilosos, com ênfase nas conseqüentes alterações nas propriedades mecânicas

1.1.2. Objetivos Específicos

O desenvolvimento do trabalho experimental envolveu os seguintes objetivos específicos:

1. Caracterização do pó de despoeiramento através de análises químicas e morfológicas;
2. Processamento cerâmico de formulações de argila com pó de

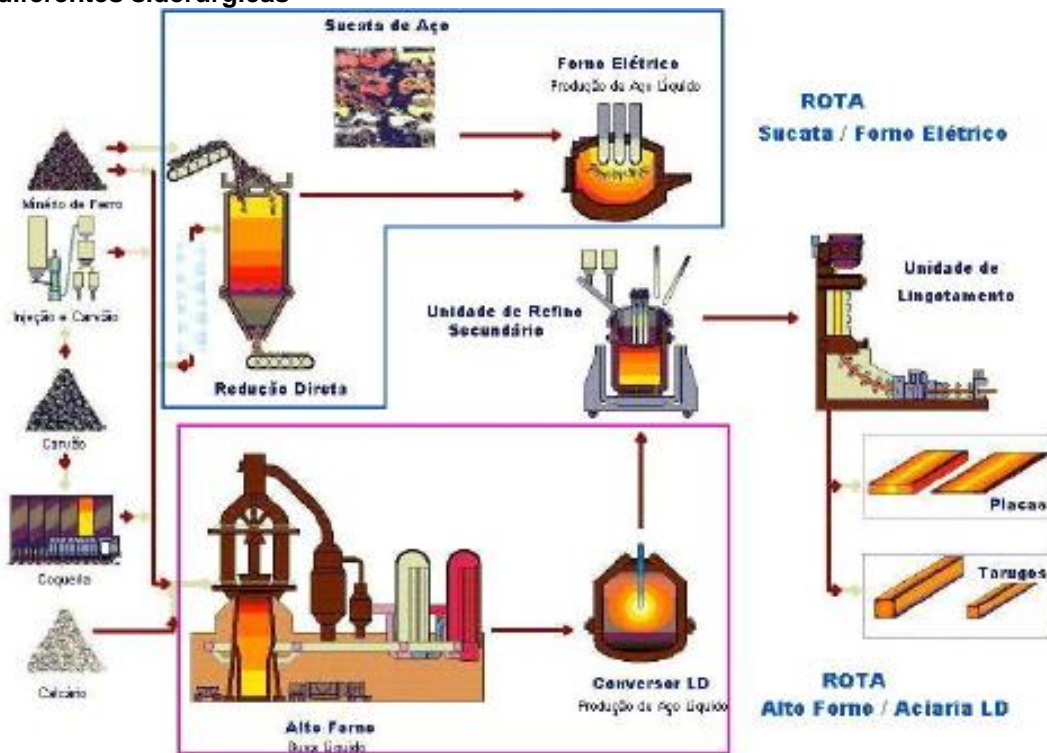
despoeiramento, bem como caracterização física e propriedades tecnológicas das massas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PÓ DE DESPOEIRAMENTO

O aço pode ser obtido de várias rotas de processo. As duas mais utilizadas são o alto forno associado a um conversor a oxigênio e o forno elétrico à arco [11]. A Figura 1 apresenta o fluxograma de produção mostrando a sequência de várias operações realizadas na produção do aço.

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



Fonte: [8].

Independentemente do tipo de forno e do processo utilizado, a fabricação de aço é sempre acompanhada pela emissão de uma grande quantidade de pó, o qual é carregado pelos gases de exaustão, principalmente em processos que utilizam sucata de aço como matéria-prima.

O pó de despoeiramento é classificado, de acordo com a norma NBR

10004[1], 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.

No processo de fabricação de aço via forno elétrico à arco, a sucata de aço é fundida via ação de arco voltaico, energia proveniente de queimadores e reações químicas, principalmente as resultantes da injeção de oxigênio. Vários materiais são adicionados, onde se destaca a cal, o grafite, entre outros. A emissão de pós durante o processamento de aço em forno elétrico pode ser exemplificada através da observação da Figura 2, o qual apresenta o vazamento de uma corrida, ou seja, a transferência de aço líquido do forno à panela.

Figura 2- Emissão de fumos durante o vazamento de aço em forno elétrico.



Fonte: [11].

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. Alguns elementos são encontrados na forma de óxidos duplos do tipo espinélios de fórmula geral MFe_2O_4 , onde M é o cátion divalente. 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.

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, (vide Figura 2) devido a ignição de materiais combustíveis agregados à sucata metálica, gerada quando em contato com o aço já fundido na base do forno. Como seria antieconômico dimensionar um exaustor para aspirar no pico de emissão dos gases, porém ambientalmente correto, normalmente a coifa é projetada sobre o forno, com volume suficiente para comportar os gases até que o sistema possa extraí-lo.

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.

2.1.1. Mecanismos de Formação do Pó de Despoeiramento

O conhecimento do mecanismo de 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 [12].

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 [12]. As gotas desintegram-se produzindo gotas ainda menores [13]. A ação das bolhas de monóxido de carbono e a posterior oxidação e explosão das gotículas ejetadas também contribuem bastante para a formação do pó tanto em escala laboratorial, pois 96% do pó são gerados pela ação de bolhas, como em escala industrial [14]. 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.

A formação da poeira é devida principalmente ao seguinte mecanismo: ejeção de partículas Fe-C promovida pela ação das bolhas de monóxido de carbono e das

partículas formadas que explodem e geram partículas ainda menores [15,16]. Quando a sucata de aço é fundida em forno elétrico a arco, o zinco é facilmente vaporizado (evapora 907 °C, 1 atm) devido a sua alta pressão de vapor. Entretanto, uma parte de zinco passa para a escória na forma de zincita (ZnO). Em temperaturas altas, quando em contato tanto com hematita (Fe_2O_3) ou magnetita (Fe_2O_4) o ZnO pode formar soluções sólidas com estes óxidos, sendo, no entanto, imiscível com a wustita (FeO). Por outro lado, MnO é miscível com óxidos de ferro (Fe_2O_3 , Fe_2O_4 , e FeO), formando facilmente soluções sólidas, tais como (Mn,Fe). Fe_2O_4 . Pela ação das bolhas de CO geradas no interior do metal líquido, estes óxidos podem ser atomizados e originar partículas de espinélios, como por exemplo, (Mn, Zn, Fe). Fe_2O_4 [12].

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 zinco é afetada pela pressão parcial de oxigênio presente em tubulações condutoras de gases, sendo que a condensação de zinco 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.

As partículas são, em sua maioria, produzidas pela injeção de oxigênio, sendo o mecanismo de vaporização de importância secundária.

Deste modo, os seguintes mecanismos podem contribuir para a geração de pós tanto em fornos elétricos a arco como em conversores:

- I. vaporização de metais não ferrosos (Zn, Cd, Pb, entre outros);
- II. ejeção de gotas de aço líquido;
- III. ejeção de partículas oriundas da escória;
- IV. arraste de materiais adicionados ao forno;
- V. atomização.

Este último mecanismo pode ser importante nos períodos onde os fundentes estão sendo adicionados no topo do forno, principalmente quando estes aditivos apresentarem uma fina granulometria. Por outro lado, partículas geradas pelo mecanismo de vaporização teriam sua formação controlada em função de pressões parciais de vapor em zonas mais quentes do forno, ao passo que partículas ejetadas deveriam ter mais ou menos a composição química de suas referidas fontes. Logo,

comparando todas estas análises de pós, banhos metálicos, escória e adições realizadas no forno, as contribuições dos diferentes mecanismos em relação à geração dos pós podem ser quantitativamente determinadas.

2.1.2. Propriedades Físicas do Pó de Despoeiramento

A Tabela 1 apresenta um resumo de algumas propriedades físicas de pós gerados durante a produção de aço e um breve comentário sobre as desvantagens de tais propriedades em relação ao manuseio, descarte e possível tratamento do pó de despoeiramento. Resultados de análises de massa específica para pó de despoeiramento mostram um valor de $4,44 \text{ g/cm}^3$, e em relação à granulometria, o resíduo apresentou diâmetro médio de $0,83 \mu\text{m}$ [17, 18].

Como mostra a Tabela 1, o pó de despoeiramento é caracterizado por possuir densidade baixa, ou seja, $3,5 \text{ g/cm}^3$ e $4,74 \text{ g/cm}^3$, e devido a isto é muito volumoso. A área superficial específica do pó de despoeiramento possui um valor igual a $4,72 \text{ m}^2/\text{g}$. E que 50% das partículas do resíduo estão abaixo de $0,66 \mu\text{m}$. Já as medidas de área superficial para o pó de despoeiramento são consideradas elevadas no intervalo entre $0,40 \text{ m}^2/\text{g}$ e $5,60 \text{ m}^2/\text{g}$ [16].

O pó de despoeiramento, devido as suas características, principalmente a baixa granulometria, pode ser facilmente transportado pelo vento. Além disso, a separação sólido/líquido é dificultada quando se pretende lixiviá-lo. O armazenamento é dificultado pelas razões acima e pelo grande volume gerado. Para a reutilização no processo siderúrgico, processos de aglomeração deveriam ser empregados, porém, pelas características de fina granulometria e alta área superficial, grandes quantidades de reagentes teriam que ser utilizados, encarecendo fortemente o processo. O valor da densidade do pó de despoeiramento é intensamente dependente da umidade do mesmo, a qual pode variar na faixa de quase zero a 50%.

Tabela 1- Propriedade física do pó de despoejamento e seus respectivos problemas associados ao seu manuseio, descarte e tratamento.

Propriedades	Intervalos normalmente relatados	Desvantagens
Granulometria	Maiorias das partículas são menores que 10 μm , onde a aglomeração de partículas ocorre em grande extensão	Após a lixiviação, apresenta dificuldade na separação sólido/líquido.
Densidade Aparente	3,50 – 4,74 g/cm^3	Volume considerável quando se visa o descarte ou armazenamento. Difícil de ser reintroduzido no processo de produção de aço sem aglomeração prévia ou técnicas de injeção.
Área superficial específica	0,40 e 5,60 m^2/g , medida pelo método BET	Devido à área superficial relativamente alta, há necessidade de grande quantidade de reagentes, no caso de processos hidrometalúrgicos.
Umidade	0,1- 0,3% de umidade para sistemas de captação a seco. Em sistemas de captação a úmido, o pó pode apresentar até 50% de umidade.	Pós úmidos apresentam aglomeração e pós secos ficam em suspensão, sendo difícil sua retirada dos depósitos.

Fonte: PUREZA [11].

2.1.3. Composição Química e Mineralógica do Pó de Despoejamento

Devido às diferenças nas composições dos vários tipos de pós gerados em aciarias elétricas ou a oxigênio, qualquer processamento ou estratégia de reciclagem deve distinguir os pós gerados em aciarias que produzem aços inoxidáveis e aços menos nobres, como o aço carbono. No caso do processo de produção de aço em aciaria elétrica, os pós podem ser classificados de duas formas, de acordo com a quantidade de zinco:

- i) pós com altos teores de zinco: acima de 15% de zinco;
- ii) pós com baixos teores de zinco: abaixo de 15% de zinco.

Em fornos elétricos a arco e em conversores, a composição química do pó produzido é bastante variável, não somente no dia a dia, de forno para forno, mas também durante o próprio ciclo operacional de produção de aço. Sabe-se que a

composição química da poeira gerada depende principalmente do tipo de aço a ser produzida, natureza e a quantidade de sucata e adições que constituem parte da carga de fornos produtores de aço.

A composição química para alguns elementos presentes em típico pó gerado em forno elétrico a arco é apresentada na Tabela 2. Esta tabela também apresenta um fato bem conhecido de que pós oriundos de aciarias produtoras de aço carbono tendem a ser mais ricos em Zn e Pb, ao passo que as siderúrgicas que produzem aço inoxidável, geram pós com um teores menores destes dois metais, porém mais rico em Cr e Ni entre outros.

Tabela 2- 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, principalmente, e o restante pode estar presente como fluoretos, ferritas ou silicatos.
Mn	Principalmente como espinélios (Zn, Fe, Mn) Fe ₃ O ₄
Na, K	Presentes como cloretos e preenchem em muitos casos, os vazios de outras partículas.

Fonte: [11].

2.1.4. Reaproveitamento do Zinco

Zinco ocorre no meio ambiente principalmente no estado de oxidação +2, tanto como íon de zinco livre (hidratado), ou como complexos e compostos dissolvidos e insolúveis. Em solos, ele freqüentemente permanece fortemente sorvido, e no ambiente aquático ele se prende predominantemente ao material suspenso antes de se acumular no sedimento. No entanto, a re-solubilização em fase aquosa, mais biodisponível, é possível, sob certas condições físico-químicas, como na presença de ânions solúveis, na ausência de matéria orgânica, minerais da argila e óxidos hidratados de ferro e manganês, baixo pH e salinidade aumentada. O zinco é a forma solúvel (como sulfato ou cloreto, presente em cinza de incinerador ou em resíduos de minas) tem uma chance ainda maior de migrar como precipitado insolúvel ou como em borra de esgoto, por exemplo.

O zinco caracteriza-se por sua propriedade eletroquímica protetora contra a corrosão, sendo deste modo muito utilizado para revestimento de metais, principalmente o aço.

Trata-se de um metal maleável sendo que suas propriedades físicas lhe

conferem facilidades de moldagem e de trabalho mecânico.

O principal uso do zinco metálico é a galvanização, tanto na produção de chapas zincadas pelas siderúrgicas, como em galvanoplastia para acabamento e proteção anticorrosiva de peças metálicas. Este uso responde por 47% da produção mundial.

Além destes, o zinco é matéria-prima para ligas metálicas como latão e bronze, que respondem por 20% do consumo, além de ser utilizado em pigmentos, pilhas secas, produtos farmacêuticos e cosméticos, micronutrientes para o homem, animais e plantas, material de construção, entre outros.

Quanto à utilização de chapas galvanizadas no mercado automobilístico brasileiro, a tendência é que cresça ainda mais, seguindo os padrões internacionais da indústria, pois o desenvolvimento tecnológico possibilitou a pintura de chapas galvanizadas de boa qualidade e que oferecem vantagem em relação a custos e qualidade. O aumento da garantia contra a corrosão dos veículos tem obrigado as montadoras a substituir as chapas laminadas a frio e galvanizadas pelo processo eletrolítico por chapas galvanizadas pelo processo de galvanização a quente, o qual oferece uma maior proteção, empregando quatro vezes mais zinco que o processo eletrolítico. A consequência desta substituição acarreta no aumento da quantidade de zinco na sucata que alimenta o forno elétrico, o que leva a uma concentração do metal na poeira formada durante a produção do aço.

2.1.5. Preparação das Matéria-Primas Cerâmicas

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.

2.1.5.1. Conformação

A conformação de peças na indústria cerâmica pode ocorrer através de distintos processos, tais como prensagem, extrusão, colagem, moldagem por injeção, entre outros. A escolha do processo de conformação mais adequado para cada produto está relacionada com as propriedades finais do mesmo, e também pelas características das matérias-primas empregadas. Quanto à conformação por prensagem, esta pode ser definida como uma compactação de pós confinados a uma matriz de prensagem, onde pequenas quantidades de água e/ou aditivos auxiliam na sua densificação. No processo de conformação, além da friabilidade do material, o tamanho das partículas, a taxa de aplicação de carga, a forma e a distribuição do tamanho das partículas também influenciam os mecanismos de densificação.

2.1.5.2. Compactabilidade

A compactabilidade é uma das propriedades mais importantes da massa cerâmica, pois determina seu comportamento durante a conformação, exercendo uma grande influência, tanto sobre as propriedades da peça a verde (resistência mecânica, permeabilidade), como sobre as propriedades do produto sinterizado (tamanho da peça, absorção de água, resistência mecânica).

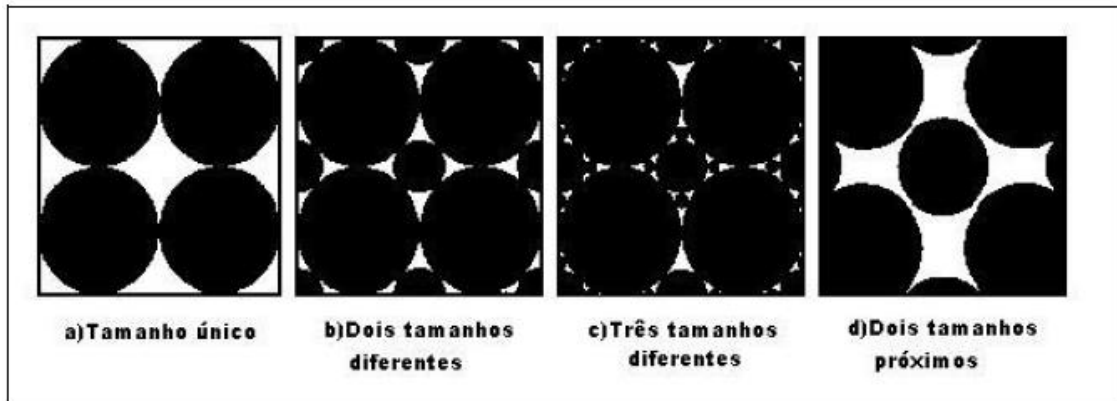
A densificação da massa cerâmica depende da compactabilidade a verde e dos subsequentes passos do processamento cerâmico, especialmente na queima. Desta forma, ressalta-se que a microestrutura a verde deveria ser bastante uniforme,

não só localmente, mas no produto como um todo, pois algumas homogeneidades podem apresentar efeitos adversos no produto sinterizado final. Assim, um aumento da compactabilidade da peça conduz à obtenção de uma maior resistência mecânica, diminuindo os riscos de problemas durante todas as etapas prévias à queima, nas quais as peças são manipuladas ou se encontram submetidas a tensões.

A eficiência de secagem diminui à medida que aumenta a compactabilidade, já que o coeficiente de difusão efetivo decresce com a redução da porosidade. Além disso, para determinadas condições de queima, a contração linear e a absorção de água diminuem com a compactabilidade da peça prensada, sendo esta uma relação linear. Experimentalmente, comprova-se que a partir de modificações na distribuição de tamanhos de partículas de uma determinada matéria-prima é possível obter-se diferentes compactações nas peças conformadas.

O valor de compactabilidade pode ser aumentado mediante a adição de esferas de distintos tamanhos. A Figura 3 mostra esquematicamente como, mediante a mistura de esferas de diferentes tamanhos Figuras 3 (c) e Figura 3 (d), é possível aumentar a compactabilidade da mesma em relação à quantidade proporcional de esferas de um único tamanho, Figura 3 (a). Da mesma forma, pode-se comprovar a importância de selecionar adequadamente o diâmetro das esferas de menor tamanho, afim de que estas possam ocupar os espaços existentes entre as esferas maiores. Caso contrário, se o diâmetro das esferas for muito grande, Figura 3 (d) ainda existe um aumento da compactabilidade. Porém, este não é efetivo devido às modificações na ordenação original nas esferas de tamanhos maiores. Assim um dos parâmetros mais importantes para obter-se misturas que geram uma alta compactabilidade é a relação de tamanhos entre as diferentes esferas [19,20].

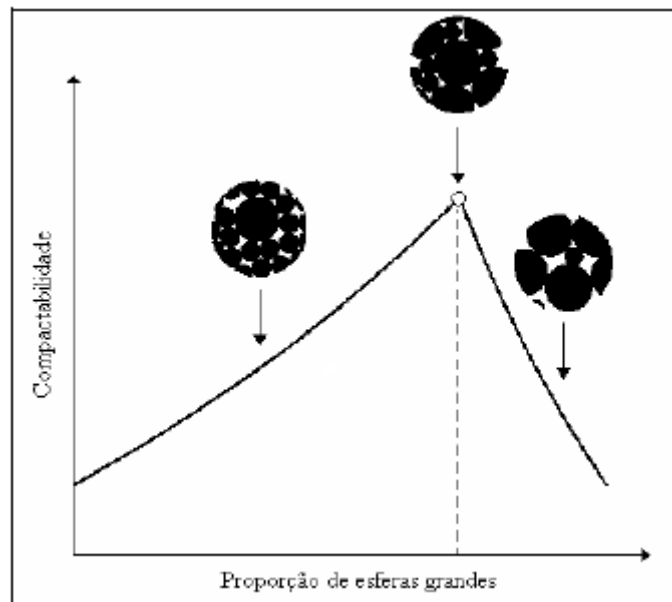
Figura 3-Representação esquemática do empacotamento de esferas de diferentes tamanhos.



Fonte: [20].

Logicamente, além da relação de tamanhos entre as diferentes esferas, a proporção relativa em que estas se encontram na mistura será o segundo fator que influirá notavelmente na compactabilidade. A Figura 4 apresenta, de forma qualitativa, a variação da compactabilidade de uma mistura de esferas de dois tamanhos, quando se modifica a proporção de esferas grandes. Observa-se que existe uma porcentagem ótima de partículas grandes, para a qual é alcançada a máxima compactabilidade, como consequência de que as esferas menores ocupam todos os espaços existentes entre o maior tamanho. Deste modo, existindo uma menor quantidade de esferas pequenas na mistura (zona direita do gráfico), existirão vazios sem serem ocupados, enquanto que, se existe um excesso, haverá uma diminuição da compactabilidade da mistura.

Figura 4-Varição da compactabilidade de misturas de esferas de dois tamanhos em função da proporção de esferas grandes.



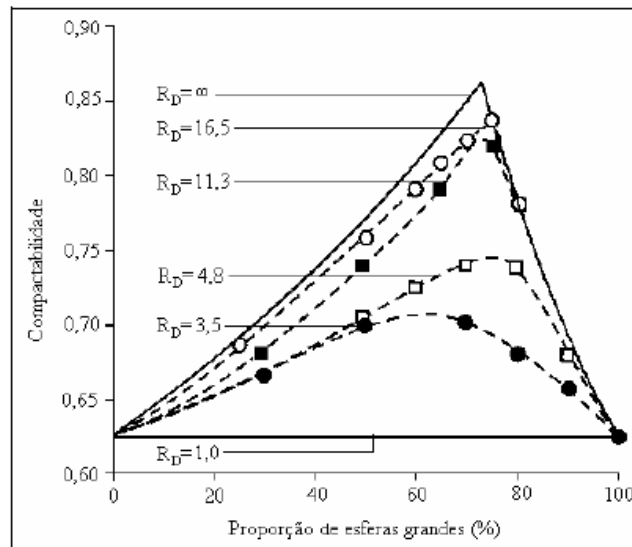
Fonte: [20].

Portanto, o conhecimento do tamanho e da distribuição das partículas na massa define, a partir da maior ou menor compactabilidade, a densidade a verde do corpo cerâmico conformado.

Quanto à compactabilidade de argilas, pode-se afirmar que é função da distribuição de tamanhos de partículas, constituída de distribuições correspondentes dos distintos minerais que a compõem.

A distribuição de tamanhos maiores corresponde aos materiais não plásticos, enquanto que se tamanhos menores se atribui ao material argiloso. Representando-se cada uma destas distribuições por seu diâmetro característico ou diâmetro médio, é possível estimar de forma qualitativa a compactabilidade que proporcionam estas matérias-primas, empregando os modelos de misturas de esferas de dois tamanhos. Nestes modelos, as esferas de maior tamanho representam as partículas dos minerais (não plásticos) e as de menor diâmetro, aos minerais argilosos.

Figura 5-Variação da compactabilidade de misturas de esferas de dois tamanhos em função da proporção de esferas grandes e da relação de diâmetros.



Fonte: [20].

2.1.5.3. Queima/Sinterização

A razão de ser da cerâmica, bem como sua importância econômica, se baseia no fato, de que a queima de massas cerâmicas, previamente moldadas, provoca uma modificação completa de suas propriedades.

A queima é um processo que envolve o aquecimento do material em altas temperaturas, de forma a promover a vitrificação ou mesmo a sinterização de partículas. Após a secagem o corpo cerâmico é queimado a temperaturas variadas, que dependem da composição das matérias-primas e das propriedades desejadas ao produto final [21]. Durante a operação de queima, a densidade do produto é aumentada, enquanto que a porosidade é diminuída e as propriedades mecânicas apresentam uma melhora significativa. A obtenção de tais características tem uma estreita relação com as complexas transformações físicas e químicas que ocorrem durante o processo de queima, e que podem assim ser resumidas:

- até 200 °C: eliminação da água higroscópica ou residual;
- de 350 a 650 °C: combustão das substâncias orgânicas e dissociação dos sulfetos com liberação de CO₂ e SO₂.
- de 600 a 800 °C: colapso do retículo dos argilominerais com liberação da água de constituição;

- de 800 a 950 °C: decomposição dos carbonatos com liberação de CO₂;
- de 900 a 1000 °C: reações da sílica e da alumina com outros elementos, e formação de complexos silicoaluminatos que conferem ao corpo cerâmico as propriedades físico-mecânicas características;
- acima de 1000 °C: amolecimento e fusão dos silicoaluminatos com formação de uma fase vítrea que, englobando as partículas menos fundíveis, confere ao corpo cerâmico, dureza, compactação, impermeabilidade e resistência mecânica características.

Desta forma, o comportamento das diferentes argilas durante a queima define, em muitos casos, o tipo de produto a ser fabricado, suas características técnicas e as variáveis de queima a empregar-se (temperatura máxima e duração do ciclo de queima), bem como a microestrutura do produto final.

Quanto à taxa de aquecimento, deve ser lenta, para evitar o surgimento de trincas provocadas pela brusca alteração de volume. Importante salientar que tanto a vitrificação quanto a sinterização são processos espontâneos, onde se observa uma diminuição da energia livre da amostra em função da redução da área superficial total das partículas. A força motriz mais importante é exatamente a redução da área superficial, crescendo as partículas grandes a expensas das menores, ressaltando-se aqui a importância do conhecimento das variáveis granulométricas. A microestrutura resultante é composta de grãos individuais, separados pelos contornos de grãos e, frequentemente por uma porosidade residual.

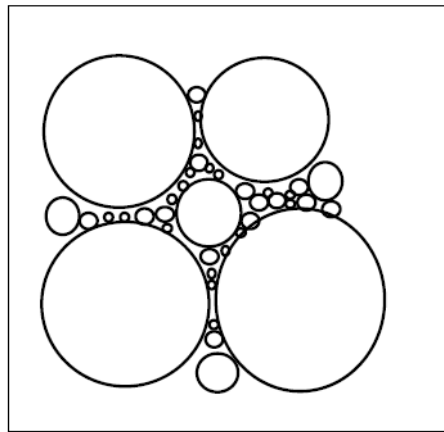
A sinterização é um processo onde as forças de compactação são fortalecidas em altas temperaturas. O processo envolve a redução da área superficial e do volume, densificação e aumento da resistência mecânica [12].

Ainda que a sinterização de sistemas multicomponentes possa envolver concomitantemente alterações químicas, a sinterização é um processo físico e não propriamente um processo que envolve reações químicas. Variáveis como o uso de aditivos, o tamanho de partículas, a pressão de conformação, a curva de aquecimento e o patamar de queimas são fundamentais no resultado da sinterização [12]. O uso de aditivos permite a formação de uma fase líquida, a formação de fases secundárias que suprimam o crescimento de grãos, a segregação no contorno do grão, assim como transferem o raio da energia do contorno de grão para a energia

superficial.

As características dos pós cerâmicos, no que diz respeito ao tamanho de partículas, distribuição de tamanho, condições dos aglomerados e homogeneidade química, são fundamentais na busca da alta densidade. Em geral, partículas de pequenos tamanhos, conseqüentemente com maior energia superficial, favorecem as forças que regem a sinterização, mas as peças cerâmicas pré-conformadas normalmente necessitam de uma não-homogeneidade para conseguir uma melhor compactação, eliminando também um maior número de poros, como mostra a Figura 6.

Figura 6- Redução da concentração dos poros devido à variação no tamanho de grãos.



Fonte: [14].

Um ponto importante na preparação de pós muito finos é que estes necessitam de rigoroso controle e podem tornar-se extremamente caros. Um pó de alta sinterabilidade chega a tornar-se cem vezes mais caro que um de sinterabilidade padrão.

O normal de uma curva de queima envolve uma constante taxa de aquecimento até a temperatura máxima e o tempo de permanência neste estágio, para que todas as reações necessárias se processem, a fim de se obter as propriedades desejadas no produto cerâmico. A atmosfera de sinterização pode afetar a densificação e o desenvolvimento microestrutural. Se um pó compactado é sinterizado em uma atmosfera gasosa que é insolúvel no material, o gás será aprisionado e impedirá a densificação final. A atmosfera de sinterização possui influência nos estados de oxidação. As alterações nas pressões parciais de oxigênio poderão afetar a composição química final do material.

2.2. UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS COMO MATÉRIA- PRIMA

A geração de resíduos tornou-se um grande problema e ocorre inevitavelmente. Com o aumento da quantidade de resíduos gerados dia a dia, torna-se obrigatório a criação de condições limitantes para o descarte dos resíduos a fim de manter-se a qualidade de vida.

Atualmente a tendência é estabelecer políticas que levem à prevenção e redução do volume dos resíduos desde o início do processo produtivo, como também em todas as etapas seguintes.

A resolução CONAMA N° 006 DE 1988 [15] foi criada com o objetivo de elaborar diretrizes nacionais, visando o controle dos resíduos gerados no parque industrial brasileiro. Para isto consta da resolução um inventário com informações a respeito da geração, características e destino final de resíduos prejudiciais à saúde humana e ao meio ambiente.

No Estado do Pará, a lei estadual n° 5.887 dispõe sobre a gestão dos resíduos sólidos. Cabe a Secretaria Estadual de Meio Ambiente (SEMA) licenciar projetos de gerenciamento de resíduos sólidos de qualquer natureza.

A reutilização de resíduos como matéria-prima para a confecção de outro material é governado por legislação específica de cada país. Estes materiais necessitam, primeiramente, ser caracterizados para posterior reutilização. Uma caracterização de resíduos consiste de várias etapas e tem como objetivo principal a determinação das propriedades físico-químicas do material, estabelecendo-se as características deste como matéria-prima para diferentes indústrias. Para avaliação da compatibilidade ambiental de resíduos que serão utilizados como matéria-prima ou dispostos em aterros, diversas características devem ser avaliadas.

No Brasil, esta avaliação é realizada de acordo com as normas NBR 10004 [1], NBR 10005 [16] e NBR 10006 [17].

Os resíduos sólidos são classificados em duas classes: Classe I (Perigosos) e Classe II (Não-Perigosos), sendo esta última classe subdividida em resíduos Classe II A (Não Inertes) e resíduos Classe II B (Inertes).

São classificados como perigosos os resíduos que apresentam periculosidade ou uma das características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade, ou constem nos anexos A ou B da norma NBR 10004 [1].

O ensaio de lixiviação baseia-se no princípio de que não existe material completamente insolúvel, ou seja, quando se coloca um material sólido em contato com um líquido, alguns constituintes se dissolvem e permanecerão assim no lixiviado. A concentração deste constituinte no lixiviado é usada para classificar o resíduo como perigoso ou não.

A caracterização dos resíduos utilizados como matéria-prima e dos produtos resultantes dos processos de reciclagem deverá incluir também uma avaliação ambiental das técnicas de reciclagem a serem empregadas. Assim, no caso do uso de resíduos e subprodutos da indústria como matéria-prima, devem-se avaliar também os efeitos da utilização destas matérias-primas.

2.2.1. Critérios para utilização de resíduos como matéria-prima

A reciclagem de resíduos como matéria-prima para outros processos é uma importante ferramenta no gerenciamento ambiental, porém a reciclagem de resíduos, se não conduzida de maneira eficaz, pode resultar em problemas mais graves que o próprio resíduo.

O desenvolvimento de um material ou componente utilizando resíduos como matéria-prima é uma tarefa complexa. Vários aspectos devem ser observados, tais como:

- i) o processo de geração de resíduos: um estudo cuidadoso do processo de geração do resíduo normalmente proporciona significantes informações sobre suas características, incluindo sua provável composição química e possível presença de contaminantes, como metais pesados;
- ii) composição do resíduo: a grande maioria das indústrias têm pouca informação sobre seus resíduos, exceto as informações legalmente requeridas por órgãos de proteção ambiental, como por exemplo, a classificação do resíduo de acordo com a NBR 10004 [1]. Portanto, na maioria das vezes, as informações existentes serão úteis somente como um ponto de partida para um estudo mais aprofundado;
- iii) caracterização do resíduo: a caracterização do resíduo deve ser a mais

completa. As informações obtidas no item anterior são fundamentais para a escolha dos aspectos mais importantes da caracterização. Esta fase deve incluir:

- a) determinação da completa composição química, incluindo traços de espécies ambientalmente relevantes, teor de umidade e voláteis;
- b) análise da microestrutura: incluindo composição mineralógica, como existência de fases amorfas, porosidade e morfologia;
- c) determinação das características físicas como densidade, granulometria e viscosidade;
- d) caracterização quanto aos riscos ambientais, incluindo toxicidade, corrosividade, reatividade, bem como patogenicidade, através de métodos apropriados como, por exemplo, testes de lixiviação e solubilização;
- iv) seleção das possíveis aplicações: o objetivo desta etapa é de selecionar a melhor aplicação possível para a reciclagem do resíduo. Via de regra, a escolha da melhor aplicação do resíduo será aquela que usa as características e propriedades intrínsecas do mesmo na melhoria das propriedades do produto e minimize os riscos ambientais;
- v) desenvolvimento de produto; o desenvolvimento de um produto deve levar em conta simultaneamente a tecnologia de produção disponível, o desempenho do produto e o impacto ambiental de sua produção;
- vi) avaliação do desempenho do produto: depois do desenvolvimento do produto utilizando resíduos em sua formulação, a avaliação de seu desempenho é necessária. Esta avaliação permite demonstrar se o produto serve para ser aplicado de acordo com a proposta inicial de utilização e quais suas características em relação aos produtos existentes no mercado;
- vii) avaliação da compatibilidade ambiental: esta etapa tem como objetivo avaliar o impacto ambiental global do processo. A avaliação dos riscos de contaminação ambiental através de testes de lixiviação dos componentes perigosos é importante, mas não suficiente. Outros impactos ambientais como emissões gasosas, consumo de energia, entre outros, também são importantes. Uma tecnologia eficiente de reciclagem permite uma redução significativa destes impactos.

2.3. POSSÍVEIS EMISSÕES GASOSAS GERADAS NO PROCESSAMENTO CERÂMICO

A problemática ambiental das contaminações atmosféricas decorrentes do processo de fabricação de produtos cerâmicos tem sido exaustivamente estudada. Na Europa devido à presença de contaminantes atmosféricos tais como emissões de fluoretos, cloretos, óxidos de enxofre, de nitrogênio e de carbono, causadores de efeitos deletérios ao meio ambiente, como chuvas ácidas e aumento do efeito estufa, e sua principal origem está nas matérias-primas naturais [18].

Diversos estudos sobre a origem de tais poluentes, particularmente Cl, F e S, e seus mecanismos de emissões durante o processo de queima de produtos cerâmicos estão sendo realizados por vários pesquisadores [19-20].

As emissões de fluoretos e cloretos resultam do aquecimento de matérias-primas cerâmicas. Os fluoretos derivam da decomposição de filossilicatos (micas e esmectitas), fluorita e fluorapatita; e os cloretos de micas e halitas. As emissões de enxofre resultam de impurezas contidas nas matérias-primas [19].

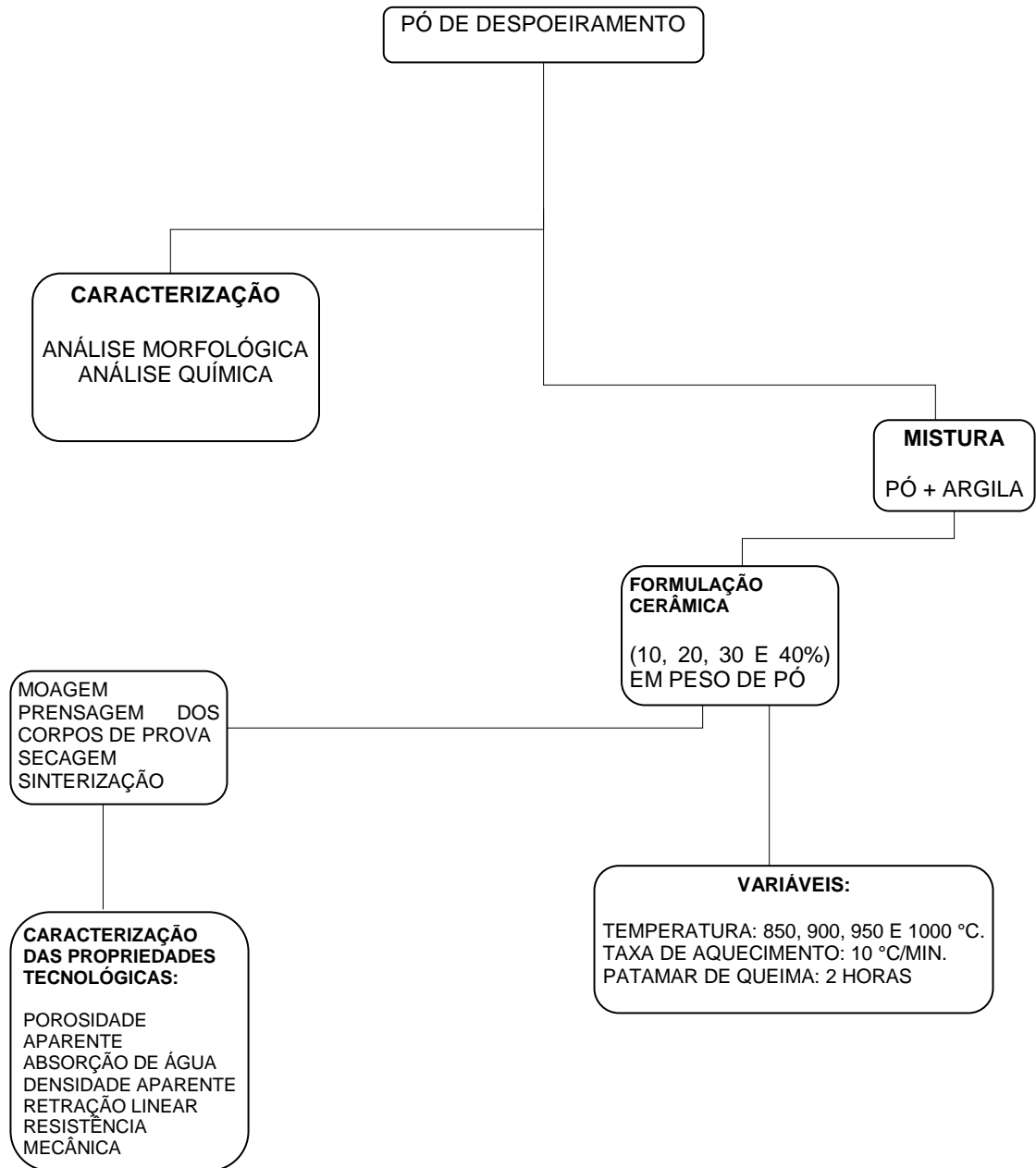
As matérias-primas cerâmicas possuem diferentes fases minerais com teores variáveis de F⁻ e Cl⁻ por exemplo, filossilicatos, fluorapatita e halita, os quais podem ser emitidos durante o processo de queima [19]. A emissão depende do conteúdo de elementos contaminantes das matérias-primas, da porcentagem de calcita, da distribuição do tamanho de partículas, do processo de moldagem (extrusão ou prensagem), da temperatura e do tempo de patamar do processo de queima. Para uma determinada argila, a quantidade de cloretos e fluoretos emitida, é, em geral, diretamente proporcional à temperatura de queima e ao tempo de resistência no forno [11, 12].

As diversas emissões gasosas do processo cerâmico são influenciadas por vários fatores como: tipo de combustível, matérias-primas utilizadas (com suas impurezas) e o modo de operação dos equipamentos, sendo que as emissões são constituídas basicamente de partículas sólidas, monóxido de carbono, dióxido de carbono, dióxidos de enxofre, óxidos de enxofre, fluoretos e metais pesados [12].

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Esta pesquisa tem por objetivo obter uma formulação de cerâmica vermelha com adição de pó de despoejamento e uma temperatura que possua propriedades mecânicas que a torne possível empregar como material de construção. Para tanto, foram preparados corpos cerâmicos contendo 10, 20, 30 e 40% em peso de pó de despoejamento com argila, como material plástico. Os corpos de prova medindo cerca de 20 x 60 x 8 mm³ foram prensados e queimados em forno elétrico. As temperaturas de queima foram de 850, 900, 950 e 1000 °C, com taxa de aquecimento de 10 °C/min. em patamar de queima de 2 horas. A Figura 7 apresenta o fluxograma das atividades e dos ensaios adotados nesta pesquisa.

Figura 7- Fluxograma dos ensaios realizados no programa experimental.



3.1. METODOLOGIA PARA CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

De posse das matérias-primas preparadas, procedeu-se às etapas de formulação, prensagem, secagem, queima e caracterização das diferentes formulações de resíduo em argila vermelha.

3.1.1. Formulação

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. Na preparação das amostras cerâmicas o resíduo foi adicionado à formulação em diferentes proporções de 10, 20, 30 e 40% em peso. A mistura foi realizada em moinhos de bolas com adição de água o suficiente para formar uma pasta, durante 30 minutos, a fim de obter uma massa homogênea. A Tabela 3 apresenta a identificação das formulações cerâmicas estudadas.

Tabela 3-Identificação das formulações das massas cerâmicas estudadas.

Formulação (% em peso)	A	B	C	D
Pó de despoeiramento	10	20	30	40
Argila vermelha	90	80	70	60

Fonte: Autor.

As misturas, antes da prensagem, foram inicialmente aditivadas com água (8% em peso) como objetivo de proporcionar uma maior plasticidade. A umidificação da massa cerâmica foi realizada pulverizando-se a quantidade definida de água e misturando-se manualmente. Conforme citado, as massas utilizadas na indústria cerâmica tradicional são de natureza heterogênea, geralmente constituída de material plástico e não plástico, com um vasto espectro de composições. Por este motivo, permitem a presença de materiais residuais de vários tipos, mesmo em porcentagens significantes. Por isso, neste trabalho, estudou-se a adição de pó de despoeiramento em argila até 40% em peso deste resíduo.

3.1.2. Conformação

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 8 mm³. A pressão de compactação utilizada para os corpos de prova foi de 25 MPa.

3.1.3. Secagem

A secagem dos corpos de prova prensados foi efetuada de duas formas distintas e consecutivas: secagem livre ao ar e secagem em estufa. A secagem livre foi realizada pela exposição das peças conformadas ao ar, sem o controle da umidade relativa do ambiente, apenas para que a umidade excessiva do corpo cerâmico evaporasse. Realizou-se este tipo de secagem nos corpos de prova por no mínimo 24 horas. A secagem em estufa foi realizada na temperatura de 110 °C, por no mínimo 24 horas, a fim de que a água utilizada na conformação, ainda presente, fosse eliminada dos materiais cerâmicos.

3.1.4. Queima

Os corpos de prova contendo resíduo adicionado em argila foram sinterizados em forno elétrico, nas temperaturas de 850, 900, 950 e 1000 °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.

3.2. CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA APÓS QUEIMA

As caracterizações físicas e mecânicas das massas aditivadas com pó de despoeiramento foram realizadas a partir de ensaios de acordo com normas técnicas e procedimentos laboratoriais. Foram preparados vinte e quatro corpos de prova para cada formulação, para analisar cada propriedade tecnológica, onde o resultado final foi a média dos valores obtidos. Após a queima, caracterizou-se a absorção de água, porosidade aparente, densidade aparente, retração linear e resistência mecânica (flexão a três pontos).

3.2.1. Absorção de Água

Através da absorção de água é possível calcular a porosidade dos corpos cerâmicos tanto em relação ao número de poros como no tipo de porosidade (aberta ou fechada). Alta absorção de água indica uma estrutura porosa, enquanto baixos valores deste parâmetro (para limites tendendo a zero) indicam estruturas cada vez mais compactas. 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. Já estruturas vitrificadas apresentam baixa absorção de água.

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.

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

3.2.2. 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), conforme a norma ASTM C-133/94 [13]. 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.

$$P_{ap} = \frac{P_u - P_s}{P_u - P_i} \times 100 \quad \text{Equação 2}$$

3.2.3. 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 determinação da densidade aparente (D_{ap}) foi realizada através do método hidrostático. Os corpos de prova foram mantidos em estufa na temperatura de 110°C por 24 horas. Após este período, determinou-se sua massa, denominada de massa seca (M_s). Posteriormente, foram deixados imersos na água por 24 horas, a fim de que todos os seus poros fossem preenchidos pela água. Depois desta etapa, a massa das amostras imersas em água, massa imersa (M_i) e massa úmida (M_u), foram determinadas. As pesagens foram realizadas em uma balança semi-analítica digital, com precisão de duas casas decimais. As massas imersas foram obtidas com o auxílio de uma haste metálica que fornecia sustentação às peças imersas em água. Já as massas úmidas foram obtidas após a retirada do excesso de água na superfície dos corpos de prova, com o auxílio de um pano úmido. A densidade aparente foi calculada através da equação 3.

$$D_{ap} = \frac{M_s \times d_a}{M_u - M_i} \quad \text{Equação 3}$$

onde: D_{ap} = densidade aparente; M_s = massa seca; M_u = massa úmida; d_a = densidade da água e M_i = massa imersa.

3.2.4. Retração Linear

Para a determinação da retração linear foi tomada a medida do comprimento do corpo de prova, utilizando um paquímetro, após a secagem em estufa e após a queima em diferentes temperaturas, de acordo com a norma ASTM C- 210/95. 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) e L_q = comprimento após a queima (mm).

3.2.5. Resistência à Flexão

O módulo de ruptura é a propriedade dos materiais que corresponde à tração mecânica por unidade de área que um corpo de prova pode resistir sem romper, quando estiver sujeito a um decréscimo de carga.

A determinação da resistência mecânica de acordo com a norma ASTM C- 773/88 [14]. Os corpos de prova foram submetidos a um carregamento em três pontos. A equação 5 apresenta a fórmula utilizada para o cálculo da resistência mecânica à flexão (σ) dos corpos de prova :

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

onde: σ = tensão máxima de ruptura, em MPa; P = carga máxima aplicada, em N; b = base do corpo de prova, em mm; d = altura do corpo de prova, em mm; e L= distância entre os apoios inferiores, em mm.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O pó de despoejamento é gerado em forno elétrico a arco durante o

processo de fabricação do aço. A amostra deste resíduo foi obtida na empresa Sinobrás, situada no município de Marabá, Pará.

Toda siderúrgica deve possuir unidades de despoejamento, com precipitadores eletrostáticos, lavagem de gases e câmaras de filtração, para captar esse pó, visto que ele possui granulometria muito fina.

A caracterização química da amostra de pó de despoejamento está detalhada nos itens a seguir:

4.1. ANÁLISE QUÍMICA

A Tabela 4 apresenta a análise química elementar do resíduo, através das técnicas de espectroscopia de absorção atômica, fluorescência de raios X.

Os resultados da composição química mostram que os principais constituintes do pó de despoejamento em estudo são o zinco, com percentual de 28%, e ferro com 48%. Sendo que, o ferro está reportado como ferro total, pois este elemento também pode se apresentar, como Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , FeO , ZnFe_2O_4 , e até mesmo ferro metálico.

A composição de pós gerados em aciarias elétricas variam segundo o tipo de aço que é produzido, além da natureza e quantidade de sucata e adições que constituem parte da carga dos fornos, o resíduo analisado neste estudo tem a composição comum daqueles gerados na produção de aços carbonos.

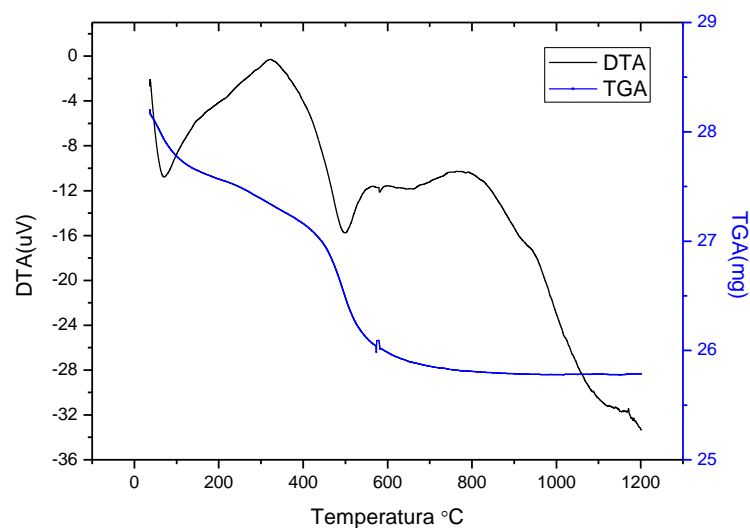
Sabe-se que o aumento da quantidade de sucata galvanizada integrada a cargas de fornos elétricos a arco acaba proporcionando altos teores de zinco no pó de aciarias elétrica. Porém, no Brasil, a utilização de sucata zincada é ainda mais baixa que o resto do mundo.

Tabela 4- Composição química elementar do pó de despoejamento estudado.

Óxidos	%
Alumínio	0,48
Silício	5,02
Cálcio	6,14
Enxofre	3,73
Manganês	2,11
Ferro	48,9
Zinco	28,1

Fonte: Autor.

A presença de Si, evidenciada mais adiante como SiO_2 , provavelmente deve-se ao arraste de componentes escorificantes e/ou refratários, utilizados na fusão do aço. A grande maioria dos elementos químicos que compõem o pó de despoejamento estudado pode ser provavelmente da sucata, da injeção de finos de carvão (C), de escorificante (Ca) ou CaCO_3 , de ferro-gusa (Fe-C), ferro ligas (Fe-Cr e Fe-Si) ou de refratário (Al e Mg) utilizados durante o processo de produção de aço. Para a avaliação do comportamento da adição do resíduo em massa cerâmica, foi escolhida uma argila vermelha, denominada São Brás, que é proveniente de uma jazida de Bom Jesus do Tocantins, Pará. Empregou-se como matéria-prima plástica a argila e como matéria-prima não plástica, o resíduo, pó de despoejamento, conforme descrito na revisão bibliográfica.

Figura 8: Análise térmica diferencial (DTA) e termogravimétrica (TG) da argila.

Observa-se que entre 150 °C e 200 °C ocorreu uma perda de massa, devido à evolução da água da amostra. Em 300 °C a perda de massa é devida a combustão de matéria orgânica. Uma nova perda de massa observada em 600 °C é devida, provavelmente, à desoxidrilação e perda de grupo OH⁻ da estrutura caolinítica. Entre 400°C e 600°C, verifica-se a presença de um pico endotérmico nas curvas DTA. Neste intervalo provavelmente ocorre a liberação de água estrutural do argilomineral caulinita, ocorrendo a formação da metacaulinita, produzindo um pico endotérmico em 500 °C.

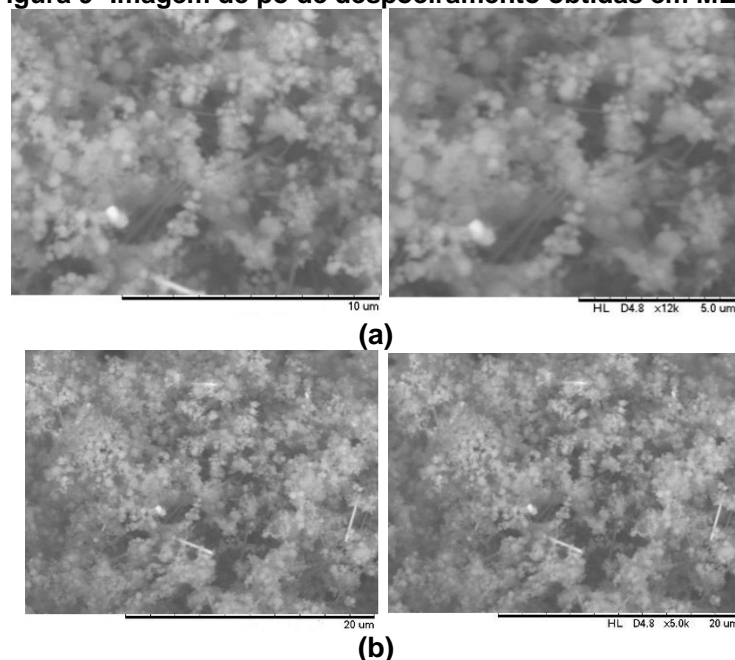
4.2. ANÁLISE MORFOLÓGICA

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi utilizada para análise da morfologia e estrutura das partículas de pó, no Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura e Microanálise, da FEMAT/UFPA. Uma pequena amostra de pó foi colocada sobre uma fita de carbono dupla-face e montada sob suporte adequado, seguindo para análise morfológica.

Com o objetivo de se fazer uma análise semi-quantitativa dos elementos presentes na amostra, foi realizada a análise de energia dispersiva de raios X (EDS) em aparelho da marca Oxford Inst., modelo SwiftED, acoplado ao microscópio eletrônico de varredura da marca Hitachi, modelo TM 3000.

De acordo com a Figura 9 (a), nota-se que a forma predominante das partículas de pó de despoejamento é esférica, morfologia esta condizente com o principal mecanismo de formação deste material particulado, que ocorre pela ejeção de partículas tanto da escória com do metal líquido.

Figura 9- Imagem de pó de despoejamento obtidas em MEV.



Fonte: Autor.

Uma morfologia aglomerada, como mostra a Figura 9 (b), também é predominante, com finas partículas formando agregados ou recobrimdo outras

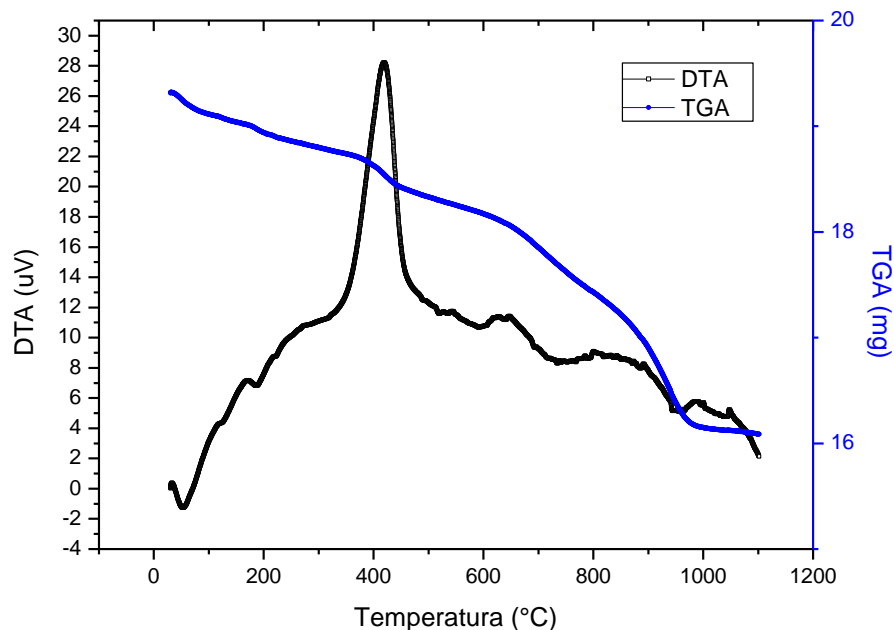
partículas.

Pode-se observar a presença de partículas com formato irregular, pontiagudas. Estas estruturas estão relacionadas com a velocidade de resfriamento que as partículas sofrem desde que são ejetadas do metal líquido.

4.3. ANÁLISE TÉRMICA DIFERENCIAL E TERMOGRAVIMÉTRICA DO PÓ DE DESPOEIRAMENTO

A Figura 10 apresenta o resultado da análise térmica para o pó de despoeiramento.

Figura 10: Análise térmica diferencial (DTA) e termogravimétrica (TG) do pó de despoeiramento.



Fonte: Autor.

Entre 400 e 700 °C ocorreu uma perda de massa, devido à oxidação do ferro. Acima de 700 °C observa-se novas perdas de massa que pode ser devido a decomposição de carbonatos presente no resíduo ou a volatilização do material condensado da amostra. Foi constatada a volatilização do zinco, que ocorre a partir de 907 °C.

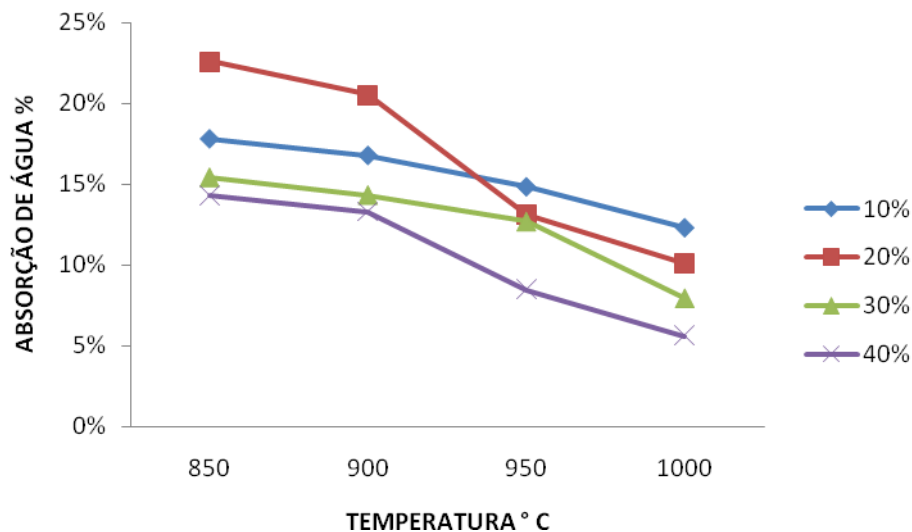
4.4. CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS CORPOS DE PROVA APÓS QUEIMA

Os resultados obtidos nos ensaios para caracterização das propriedades dos corpos cerâmicos queimados nas temperaturas de 850, 900, 950 e 1000 °C, patamar de queima de 2 horas e taxa de aquecimento de 10 °C/min, formulados com argila e incorporados com 10, 20, 30 e 40% em peso de pó de despoejamento, são apresentados a seguir.

4.4.1. Absorção de Água

A Figura 11 apresenta os resultados obtidos para absorção de água, para as amostras ensaiadas nas diferentes formulações, em função da temperatura de queima.

Figura 11-Varição da absorção de água em função da porcentagem em peso de pó de despoejamento em argila vermelha e da temperatura de queima.

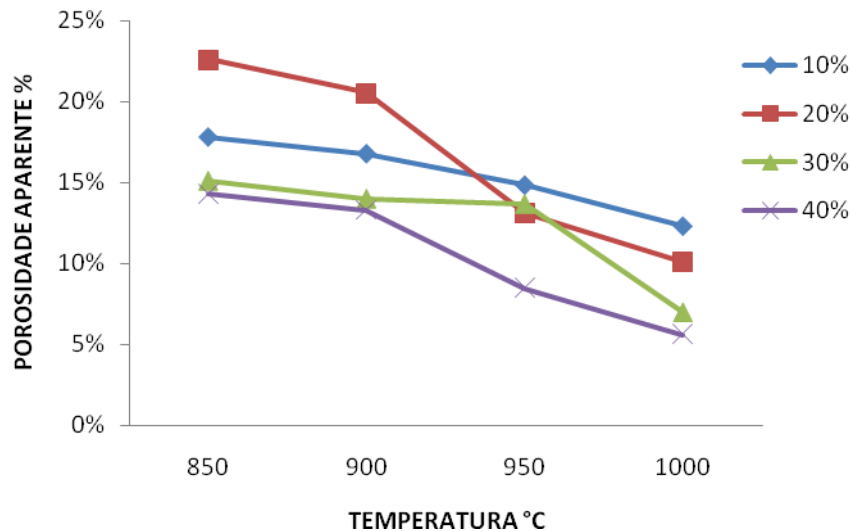


Observa-se uma diminuição da absorção de água com o aumento da temperatura de queima. A incorporação do resíduo provocou uma maior densificação nos corpos cerâmicos. O decréscimo de absorção de água é mais acentuado na temperatura de 1000 °C. À medida que aumenta o teor de resíduo em argila, ocorre uma diminuição nos valores de absorção.

4.4.2. Porosidade Aparente

A Figura 12 mostra a porosidade das amostras em função da temperatura e da quantidade de resíduo.

Figura 12- Variação da porosidade em função da porcentagem em peso de pó de despoeiramento em argila vermelha e da temperatura de queima.

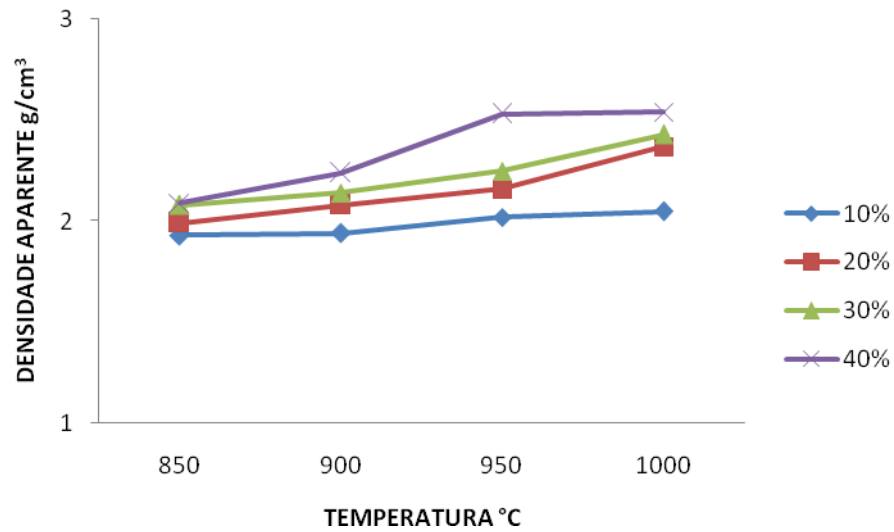


Os resultados mostram uma relação direta da diminuição da porosidade e absorção de água para temperaturas crescentes de queima do material, o que ocorre naturalmente para produtos fabricados a partir de materiais argilosos. Este comportamento é devido ao aumento da temperatura, o qual permite maiores transformações físico-químicas, influenciando no comportamento do material quanto a estas propriedades, como também na sua densificação, como resultado de uma melhor sinterização/vitrificação. A maior densificação, neste caso, também se deve à maior densidade da massa cerâmica, pois a densidade do pó é maior em relação à argila vermelha.

4.4.3. Densidade Aparente

Os resultados obtidos para a densidade aparente dos corpos de prova prensados e queimados em várias temperaturas podem ser observados na Figura 13.

Figura 13 - Variação da densidade aparente em função da porcentagem em peso de pó de despoejamento em argila e da temperatura de queima.



À medida que aumenta o teor de resíduo na argila ocorre um aumento nos valores de densidade aparente, para todas as temperaturas de queima estudadas. A adição de pó de despoejamento em argila pode ter sido responsável pelo aumento da densidade em todas as formulações estudadas, pois o tamanho da partícula influencia na densificação do material. E também, devido a maior densidade do pó em relação a argila. Quanto menor a granulometria, maior a área superficial e maior a probabilidade que ocorram reações entre o resíduo e a massa cerâmica. E esta tendência permanece até se atingir um máximo de densificação.

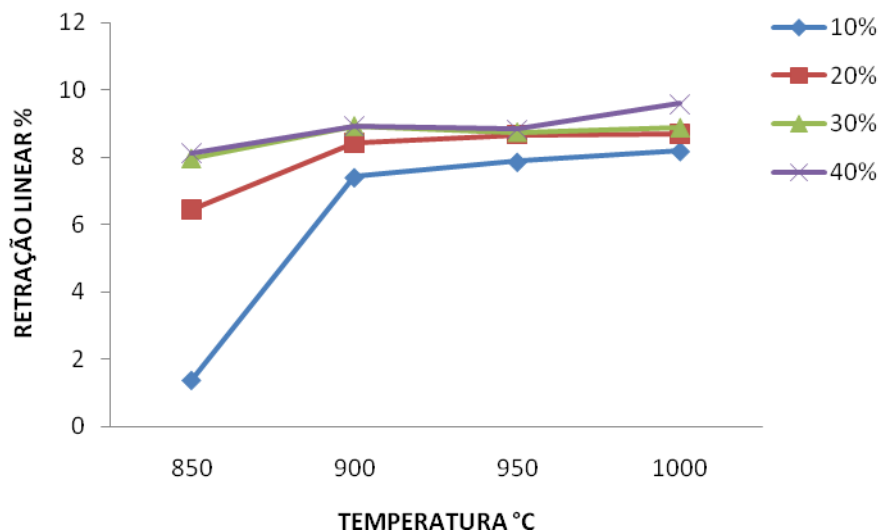
4.4.4. Retração Linear

Os valores médios obtidos para a retração linear dos corpos de prova prensados e queimados em várias temperaturas podem ser observados na Figura 14.

Os resultados de retração linear estão associados à densificação das amostras, com a densificação crescente, em função da queima.

A retração linear aumenta conforme a temperatura do material é queimado. Pelos resultados obtidos, verifica-se uma maior retração linear na queima em temperatura de 950 °C. A adição de resíduo às formulações propicia a densificação, verificada por uma maior retração linear. A explicação para este fato, pode estar na granulometria do resíduo, que por apresentar partículas menores que a argila, são mais reativas e distribuídas mais uniformemente nos interstícios formados pelas demais partículas da massa cerâmica. A maior área superficial, associada à granulometria, propicia esta sinterização mais efetiva, pois esta tem como força motriz a redução da área superficial. A ocupação dos interstícios por partículas menores provoca um maior empacotamento do corpo a verde.

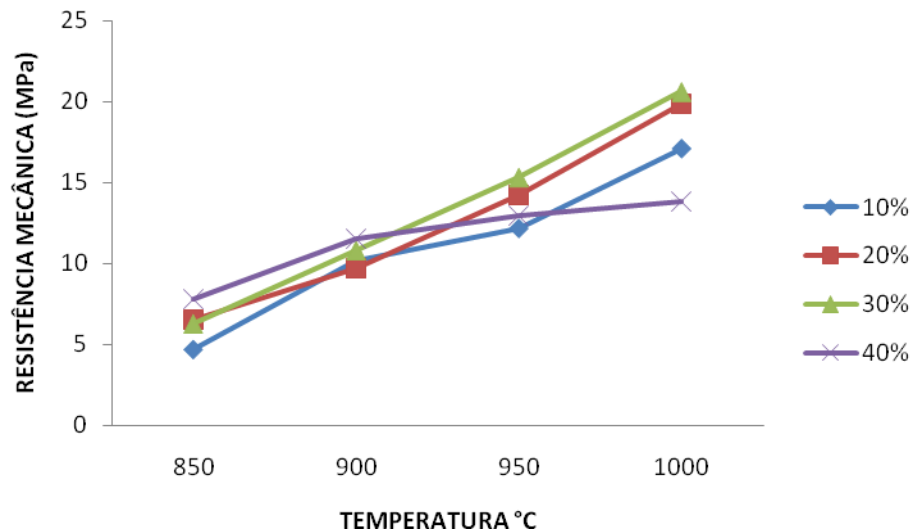
Figura 14 - Variação da retração linear em função da porcentagem em peso de pó de despoeiramento e da temperatura de queima.



4.4.5. Resistência à Flexão

A Figura 15 apresenta os resultados médios obtidos para a resistência à flexão dos corpos de prova prensados em função da temperatura de queima, para as amostras ensaiadas em diferentes formulações.

Figura 15- Variação da resistência mecânica em função da porcentagem em peso de pó de despoejamento em argila e da temperatura de queima.



Observa-se que o aumento da temperatura de queima ocasiona no aumento da resistência mecânica, para todas as formulações estudadas. Este comportamento também pode ser explicado pelo aumento da densidade da massa cerâmica, que provocou uma diminuição na sua porosidade aparente.

Observa-se também, pela Figura 15, que as massas cerâmicas aditivadas com 30% de resíduo apresentam maiores valores de resistência mecânica.

5. AVALIAÇÃO GERAL DAS PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS

Observa-se que existe uma correlação entre o comportamento da variação da resistência mecânica em função da temperatura, com as outras curvas já analisadas: a resistência mecânica aumenta, a retração linear aumenta, a porosidade diminui, e por consequência têm-se uma menor absorção de água. O fenômeno responsável por isso é a sinterização. Uma menor porosidade equivale a uma melhor densificação do corpo cerâmico, resultando em uma maior resistência

mecânica. A variação da resistência mecânica obtida para as diferentes formulações pode ser explicada em função da porosidade, pois a quantidade de poros deixa vazios suscetíveis à fratura.

Em relação as propriedades tecnológicas, absorção de água e resistência mecânica, são utilizadas para classificação de materiais à base de argilas para fabricação de produtos estruturais, para uso na construção civil.

Os valores destas propriedades para cerâmica estrutural (tijolos maciços, tijolos vazados e telhas), estão apresentados na Tabela 5, para fins de comparação com os resultados obtidos nesse estudo.

Tabela 5-Valores limites para produtos cerâmicos estruturais.

Propriedade	Tijolo maciço	Tijolos furados	Telhas
Tensão de ruptura à flexão após secagem a 110° C (valor mínimo MPa)	1,53	2,55	3,05
Tensão de ruptura à flexão após a queima (valor mínimo MPa)	2,04	5,60	6,62
Absorção de água após queima (valor máximo, %)	25,0	25,0	20,0

Fonte: [18].

As formulações estudadas são adequadas para a obtenção de tijolos maciços e telhas para construção civil, pois as especificações foram atingidas em todas as temperaturas de queima testadas. Logo, a utilização de pó de despoejamento potencializa o uso da massa aditivada como matéria-prima secundária na fabricação de tijolos maciços e telhas.

Também, de acordo como estudo das propriedades tecnológicas, foi possível a obtenção de corpos cerâmicos a partir da adição de pó de despoejamento em massas cerâmicas, com teores de 10, 20, 30 e 40%, em peso.

Neste trabalho, foram consideradas as propriedades de uma amostra com as dimensões de 60 x 20 x 7 mm³ e os resultados se mostraram satisfatórios, mas as dimensões reais de um tijolo estrutural são de 190 x 90 x 57 mm³, logo as propriedades podem ser diferentes, visto que se tem um maior volume. A absorção de água pode ter valores modificados quando se compara dimensões muito diferentes em virtude de uma maior área de contato, assim como na determinação da porosidade aparente pelo método de Arquimedes, porém estas comparações são

bastante satisfatórias, uma vez que a saturação da amostra com água é dada pela porosidade aberta. Entretanto, para a avaliação da resistência mecânica o volume da peça é crítico, uma vez que uma peça com um volume maior implica em um maior número de defeitos, e a resistência à flexão terá maior probabilidade de encontrar um defeito crítico dentro da região de tensão no ensaio.

A densidade aparente é uma propriedade importante, pois permite avaliar o peso, a carga em uma edificação. Um tijolo comum deve pesar entre 1100 g a 2000 g. Nos ensaios de densidade aparente pode-se observar que não houve muita variação, à medida que se adiciona o resíduo, logo a adição do resíduo em tijolos não acarreta um aumento considerável no peso de uma edificação.

Considerando que todos os resultados de resistência mecânica são muito superiores aos exigidos por norma para as peças de dimensões comerciais, e diante dos resultados de absorção de água, onde apenas as adições de 20% nas temperaturas de 850 e 900 °C excederam o valor máximo recomendado por norma para esta propriedade, verifica-se a possibilidade do reaproveitamento do resíduo pó de despoeiramento das aciarias em quantidades de 30 a 40% nestas temperaturas, típicas para a produção de cerâmica vermelha.

6. CONCLUSÕES

O pó de despoeiramento, é classificado como resíduo classe II A (não inerte), pode ter propriedades tais como biodegradabilidade, combustibilidade e solubilidade em água. As emissões gasosas estão dentro dos limites toleráveis pelas normas regulamentadoras.

Com os resultados obtidos neste trabalho pode-se fazer as seguintes conclusões:

A incorporação do resíduo em argila vermelha, promoveu uma maior densificação, levando a uma redução na absorção de água e da porosidade e um aumento na retração linear e da resistência mecânica para todas as formulações cerâmicas estudadas, com exceção da adição de 20%. Mesmo em temperaturas mais baixas os resultados para resistência mecânica estão acima dos valores normatizados, logo pode-se utilizar temperaturas de queima menores. Isso torna possível a utilização do resíduo como matéria-prima secundária na formulação da massa cerâmica.

7. REFERÊNCIAS

- [1] Associação Brasileira de Normas Técnicas: NBR 10.004. Resíduos Sólidos- Classificação. Segunda Edição. 2004.
- [2] Sobrinho, P.J.N.; Espinosa, D.C.R; Tenório J.A.S.: Caracterização da Poeira Gerada na Fabricação de Aço Inoxidável Visando a sua Reciclagem. *Metalurgia & Materiais.*: 257-263, 2000.
- [3] Hagni, A. M.; Hagni, R.D.; Demars, C.A.M.; Massuero, A.; Molin,D.;Vilela, A.C.F.; Bernardes, A.M.; Mafaldo, I.: Characterizacion and Use of EAF Dust in Construction.In: *Industries, 2001,São Paulo.Third Japan-Brazil Symposium on Dust Processing-Energy- Environment in Metallurgical Industries.* São Paulo: Tohoku Univesity/USP, 173-180, 2001.
- [4] Instituto Brasileiro de Siderurgia-IBS. Acesso em 03/08/2013, em www.ibs.org.br
- [5] Resolução CONAMA nº316 de 26 de outubro de 2002. "Dispõe de Normas para o Licenciamento Ambiental de Sistemas de Tratamento Térmico de Resíduos.
- [6] Mantovani, M.C.; Takano,C.; Cavallane,F.: Caracterização de Três Tipos de Poeira em Fornos Elétricos a arco.53º Congresso da ABM,Belo Horizonte, 1329-1343,1998.
- [7] Pureza,J.C.C.: Utilização de Resíduos Industriais de Baixa Granulometria em Massas Cerâmicas de Argila Vermelha- Aspectos Tecnológicos e Ambientais. Porto Alegre, 133 p. 2004. Dissertação de Mestrado- Escola de Engenharia, Programa de Pos-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e Materiais ,UFRGS.
- [8] Environmental Protection Agency. USA. 40CFR. Chapter I. Part 261- Identification and Listing of Hazardous Waste. App VIII. 1998.
- [9] Brehm, F.; Vargas, A.; Moraes, C. A. M.; Masuero, A.; Molin, D.; Vilela, A. C. F.; Bernardes, A. M.; Mafaldo I.: Characterization and Use of EAF Dust in Construction. In: *Third Japan-Brazil Symposium on Dust Processing-Energy-Environment in Metallurgical Industries. Ironmaking and Steelmaking*, v.3, n.1, 11-17, 2003.
- [10] Modesto, C.; Bristot, V.; Menegali, G.; De Brida, M.; Mazzucco, M.; Mazon, A.; Borba, G.; Virtuoso, J.; Gastaldon, M.; Oliveira, A. P. N.: Obtenção e Caracterização de Materiais Cerâmicos a Partir de Resíduos Sólidos Industriais. *Cerâmica Industrial*, 14-18, 2003.
- [11] Nyrenda, R.: The Processing of Steelmaking Flue-Dust : A Reviw. *Minerals Engineering*, v. 4, ns. 7-11, p. 1003-1025,1991.
- [12] Brehm, F. A.: Adição de Óxido de Zinco (ZnO) em Pasta de Cimento Portland Vizando Viabilizar a Reciclagem de Pós de Despoeiramento Elétrica (PAE) na

construção civil. Porto Alegre, 105 p, 2004. Tese de Doutorado – Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. UFRGS.

[13] Moraes, C. A. M.; Brehm, F.; Graffitti, D.; Vilela, A. C. F.: Estado da Arte da Reciclagem e Reutilização de Resíduos Sólidos de Despoeiramento Elétrica – Uma ou Várias Linhas de Aço ? 57º Congresso Internacional da ABM. São Paulo, Julho, 2002.

[14] Jacomino, V. M. F.; Castro, L. F. A.; Ribeiro, E. D. L.; Leão, M. M. D.; Souza, C. M.; Gomes, A. M.; Almeida, M. L. B.; Lopes, L. E. F.: Controle Ambiental das Indústrias de Produção de Ferro – Gusa em Altos - Fornos a Carvão Vegetal – Projeto Minas Ambiente. Ed. Segrac. Belo Horizonte, 302 p.,2002.

[15] Resolução CONAMA n.006, de 15 de junho de 1988. "Dispõe sobre o Licenciamento de Obras de Resíduos Industriais Perigosos".

[16] Associação Brasileira de Normas Técnicas : NBR 10.005. Procedimento para Obtenção de Extrato Lixiviado de Resíduos Sólidos. Segunda Edição, 31/05/2004. Válida a partir de 30/11/2004. 2004.

[17] Associação Brasileira de Normas Técnicas : NBR 10.006. Procedimento para Obtenção de Extrato Solubilizado de Resíduos Sólidos. Segunda Edição, 31/05/2004. Válida a partir de 30/11/2004. 2004.

[18] Soares, J. M. D.; Reichert, M.; Tomazetti, R. R.; Tavares, I. S.: Adição de Resíduo de Couro na Massa para Produção de Cerâmica Vermelha. Anais do 45º Congresso Brasileiro de Cerâmica, Santa Catarina, 2001.

[19] Souto, K. M.; Neves, G. A.; Ferreira, H. C.; Silva, M. C.: Aproveitamento de Resíduos da Serragem de Granitos para Confecção de tijolos e Telhas Cerâmicas. Anais do 45º Congresso Brasileiro de Cerâmica, Santa Catarina, 2001.

[20] Andrade, P. M.; Vieira, C. M. F.; Monteiro, S. N.; Jr, F. V.: Caracterização de Lama Fina de Despoeiramento. Anais do 49º Congresso Brasileiro de Cerâmica, São Pedro-SP, 2005.

[21] Júnior, E. L. S.; Intorne, S. C.; Dias, D. P.; Vieira, C. M. F.; Monteiro, S. N.: Incorporação de Escória de Despoeiramento Elétrica em Cerâmica Vermelha. Anais do 49º Congresso Brasileiro de Cerâmica, São Pedro-SP, 2005.