



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ

CENTRO DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS

CURSO DE ENGENHARIA METALÚRGICA

**CARACTERIZAÇÃO DO PÓ DE ACIARIA ELÉTRICA E ESTUDO DA
VIABILIDADE DE PROCESSOS DE APROVEITAMENTO**

Rodrigo Alves Ramos

Fortaleza - CE

Dezembro - 2013

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA METALÚRGICA

**CARACTERIZAÇÃO DO PÓ DE ACIARIA ELÉTRICA E ESTUDO DA
VIABILIDADE DE PROCESSOS DE APROVEITAMENTO**

Rodrigo Alves Ramos

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Ceará como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Metalúrgico.

Orientador: Prof. Dr.-Ing. Jeferson Leandro Klug

Fortaleza – CE

Dezembro – 2013

RODRIGO ALVES RAMOS

**CARACTERIZAÇÃO DO PÓ DE ACIARIA ELÉTRICA E ESTUDO DA VIABILIDADE DE
PROCESSOS DE APROVEITAMENTO**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Ceará como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Metalúrgico.

Orientador: Prof. Dr.-Ing. Jeferson Leandro Klug

Aprovada em ___/___/_____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr.-Ing. Jeferson Leandro Klug (Orientador)
Universidade Federal do Ceará

Prof. Dr. Ricardo Emílio F. Quevedo Nogueira
Universidade Federal do Ceará

Prof. Dr. Marcelo José Gomes da Silva
Universidade Federal do Ceará

À minha mãe, ao meu pai e à minha família.

Aos queridíssimos amigos, que também
contribuíram e fazem parte dessa conquista.

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo dom da vida e pelas oportunidades que me foram apresentadas ao longo da mesma.

Ao meu professor orientador Dr.-Ing. Jeferson Klug pelo apoio, pelo direcionamento dado a esse trabalho e pelo conhecimento compartilhado junto a mim. Ao professor Dr. Sasaki e sua equipe de pós-graduandos pesquisadores, pelo apoio no trabalho e pelo compartilhamento de idéias.

Ao MSc. Engenheiro Mateus Paulino, pelo apoio e trabalho conjunto, compartilhando esforços para que esse trabalho possuísse resultados relevantes, além de sua amizade e motivação em todos momentos durante a graduação.

Aos amigos e colegas de faculdade metalurgistas e futuros metalurgistas que fiz durante o período de graduação, compartilhando idéias, projetos, angústias e momentos extraordinários, Reinaldo Azevedo, Márcio Gazelli, Lucas Lopes, Leonardo Martins, Francisco Nocy, Helilton Lima, Thiago Ivo, Fernando Emerson, Lucas Thé, Alfredo Leão, Abraão Danilo, Mozart Queiroz, Bruno Nogueira, Marcos Daniel, Nathália Escóssio, Tathiane Caminha, Yuri Maia, Renan Gurgel, Sergio Júnior, Felipe Pinheiro.

Aos amigos de longa data, desde os períodos de colégio, que ainda se fazem presentes em situações especiais, Guilherme Noronha, Felipe Guerra, Diego Adriano, Italo Bruno, Alexia Barros, Karine Moreira, Renata Meneses, e, desde a infância compartilhando a mesma vizinhança, Thiago Aquino, Augusto Holanda e Lucas Carneiro.

Aos amigos durante o intercâmbio na Europa, quais fizeram e ainda se fazem presentes em situações especiais e singulares, Danila Medeiros, Paulo Motta, Lucas Romualdo, Danielle Broda, Ítalo Engers, Luiz Gustavo Pinguim, Pedro Toledo, José Fernando, Júlia Queiroz, Marcelle Perazzy, Mellyne Nascimento, Brena Karla, Liege Martins, Adriana Marques, Bruna Klein.

Aos amigos residentes na Catalunha, companheiros de estudos na Universitat de Barcelona durante a graduação sanduíche.

Aos professores do departamento, Lindberg Gonçalves, Ricardo Emílio, Marcelo Ferreira, Cleiton Carvalho, Hélio Miranda, Hamilton Ferreira, Igor Frota, Enio Pontes, Carlos

Almir, Francisco Marcondes, Raimundo Leite, Walney Silva, Marcelo José e aos ex-professores Walmick Vieira e Alex Maia pelos ensinamentos a mim repassados.

Aos amigos e colaboradores do departamento Francisco Júnior e Camila Muniz pelo companheirismo e ajuda nos momentos em que precisei.

Ao amigo e professor Elineudo Moura, pelos conselhos a mim ofertados, pela sua dedicação a profissão e pelo apoio e disponibilidade em ajudar-me sempre.

Aos meus pais, Mara Celene e Eugênio Esmeraldo, por todos conhecimentos passados e todos os esforços feitos no sentido dessa realização, além do depósito de confiança e do apoio incondicional, mesmo em momentos difíceis.

Ao meu irmão, Lucas Ramos, pela compreensão, pelo apoio em todos os momentos e pelo ensinamento e aprendizagem diária.

A minha irmã, Mariana Ramos, aos meus avós, aos primos e primas, aos tios e tias, pela presença, torcida e carinho.

"Foi o tempo que dedicaste à tua rosa
que a fez tão importante"

Antoine Saint-Exupéry

RAMOS, R. A. “CARACTERIZAÇÃO DO PÓ DE ACIARIA ELÉTRICA E ESTUDO DA VIABILIDADE DE PROCESSOS DE APROVEITAMENTO”. Monografia. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal do Ceará, 2013.

Resumo

Na produção de aços via forno elétrico a arco (FEA) é gerado um resíduo sólido perigoso Classe I, denominado pó de aciaria elétrica (PAE), que é composto principalmente por óxidos metálicos com composição associada aos tipos de sucata utilizados e à composição do aço fabricado. O presente trabalho tem como objetivos centrais: (i) caracterizar amostras deste resíduo oriundas de uma usina siderúrgica localizada no Estado do Ceará, e (ii) avaliar a viabilidade de processos de aproveitamento do PAE. A metodologia consiste na caracterização química e estrutural do PAE por meio de análise por fluorescência de Raios-X e difração de Raios-X. Constatou-se a presença dos seguintes elementos: Zn, Fe, Cl, Pb, Ca, K, Mn, Si, Al, S, Cu, Ti e Cr, com especial destaque para o Zn (com teores superiores a 40%). As principais fases encontradas no PAE são: franklinita ($ZnFe_2O_4$), zincita (ZnO) e magnetita (Fe_3O_4). Em posse dos resultados, fixa-se no estudo de possibilidades de processos de aproveitamento do PAE. São sugeridos processos de aproveitamento de PAEs com altos teores de Zn.

Palavras-chave: PAE, poeira, pó, aciaria elétrica, aproveitamento de resíduos, Zinco

RAMOS, R. A. "CHARACTERIZATION OF ELECTRIC ARC FURNACE DUST AND STUDY OF FEASIBILITY OF REUSE'S PROCESSES". Monography. Metallurgical and Materials Engineer's Department. Universidade Federal do Ceará, 2013.

Abstract

On the production of steel by Electric Arc Furnace (EAF), is generated a hazardous waste Class I, called electric arc furnace dust (EAFD), mainly composed by metal oxides with composition associated to the manufactured steel composition and the used steel scrap. This present study has like aims (i) to characterize samples of this residue got from a steel plant located in the bazilian state of Ceará and (ii) to evaluate the feasibility of the reuse's processes of EAFD. The methodology consists in the chemical and structural characterization of the EAFD by analysis by X-ray fluorescence and X-ray diffraction. It were found a presence of the following elements: Zn, Fe, Cl, Pb, Ca, K, Mn, Si, Al, Br, S, Cu, Ti e Cr, specially Zinc (with levels exceeding 40%). The main phases found in the dust are: franklinite ($ZnFe_2O_4$), zincite (ZnO) and magnetite (Fe_3O_4). After getting the results, possibilities of reuse's processes of the EAFD were studied. Reuse's processes of EAFD with high levels of Zn were suggested.

Key-words: EAFD, dust, eletric arc furnace, reuse of waste, Zinc

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
UFC	Universidade Federal do Ceará
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
IAB	Instituto Aço Brasil
PAE	Pó/Poeira de Aciaria Elétrica
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso

Lista de Figuras

Figura 1 - Principais elementos de um forno a arco elétrico	6
Figura 2 – Visão geral de um forno arco elétrico	7
Figura 3 – Fluxograma simplificado do processo siderúrgico	8
Figura 4 – Operação de um forno arco elétrico	8
Figura 5 - Visão geral do forno elétrico e do sistema de despoejamento	11
Figura 6 – Razões de reaproveitamento de PAE no mundo	15
Figura 7 - Diversas rotas hidrometalúrgicas para tratamento do PAE	16
Figura 8 – Porcentual de técnicas de tratamento de pós de aciaria elétrica utilizadas no mundo	17
Figura 9 - Exemplos de métodos pirometalúrgicos para tratamento de PAE	17
Figura 10 – Exemplo de difratograma de amostra de PAE de usina produtora de aço no Rio Grande do Sul	20
Figura 11 - Aspecto visual do PAE	21
Figura 12 - Fluxograma do processamento da amostra.....	21
Figura 13 - Difratograma da amostra de PAE estudada, peneirada e homogeneizada... 25	
Figura 14 – Primeiro difratograma para identificação das fases ZnO, ZnFe ₂ O ₄ e Fe ₃ O ₄ presentes no PAE.....	25
Figura 15 – Segundo difratograma do PAE analisado com identificação das fases cristalinas constituintes do PAE.	26
Figura 16 - Fluxograma da produção de materiais cerâmicos.....	28
Figura 17 - Etapas da caracterização da toxicidade dos materiais de acordo com as normas brasileiras.....	30
Figura 18 - Fundição de Zinco: Produção de Ligas Zamak	31
Figura 19 - Planta Waelz	33
Figura 20 - Fluxograma do processo hidrometalúrgico via pH natural	34

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Fases nas quais os elementos se apresentam	12
Tabela 2 - Intervalo de composições químicas para alguns elementos presentes no pó de aciaria de siderúrgicas	13
Tabela 3 - Características Físicas do PAE.....	14
Tabela 4 – Referências gerais em processos utilizados em todo mundo	18
Tabela 5 – Resultado da fluorescência do pó de aciaria elétrica para os três tipos de amostras relatadas.....	23

Sumário

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS.....	3
2.1 Gerais	3
2.2 Específicos	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1 Introdução a Aciaria Elétrica	4
3.2 Tipos de fornos a arco eléctrico	4
3.3 Esquematização dos principais elementos de um forno a arco eléctrico.....	6
3.4 Processo de fabricação do aço por Aciaria eléctrica	7
3.5 Pó de Aciaria Elétrica	9
3.6 Mecanismos de formação do pó de aciaria eléctrica (PAE).....	9
3.7 Composição química e mineralógica do PAE	11
3.8 Propriedades Físicas do PAE.....	13
3.9 Aproveitamento do PAE	15
3.10 Fluorescência e Difração de Raios-X	19
3.11 Legislação: Normas brasileiras	20
4. MATERIAIS E MÉTODOS	21
4.1 Materiais	21
4.2 Métodos	21
4.2.1 Processamento do PAE.....	21
4.2.2 Procedimentos Experimentais	22
4.2.3 Levantamento de dados e de processos: Estudo da viabilização de processos de aproveitamento do PAE	22
5. RESULTADOS.....	23
5.1 Fluorescência de Raios-X do PAE.....	23
5.2 Difração de Raios-X da amostra de PAE peneirada e homogeneizada	24
5.3 Estudo da viabilização de processos de aproveitamento do PAE baseado nos resultados obtidos da caracterização	27
5.3.1 Reciclagem de PAE como matéria-prima na fabricação de materiais cerâmicos argilosos (cerâmica vermelha)	27
5.3.2 Incorporação de PAE em blocos de pavimentação	29
5.3.3 Co-processamento de PAE na fabricação de clínquer.....	30

5.3.4	Co-processamento de PAE na fabricação de ligas ZAMAK (ZAMAC)..	31
5.3.5	Retorno ao processo produtivo	32
5.3.6	Processo Waelz.....	32
5.3.7	Processos Hidrometalúrgicos	33
6.	CONCLUSÃO	35
7.	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	36
8.	BIBLIOGRAFIA.....	37

1. INTRODUÇÃO

Presente no dia-a-dia da sociedade em inúmeras aplicações, o aço é um material versátil e essencial ao desenvolvimento do país. Sua utilização é fundamental à mobilidade por ser parte dos mais diversificados meios de transporte. Passando pela indústria e pelo comércio em diferentes segmentos, até chegar às residências com seus eletrodomésticos, móveis, entre tantos outros produtos, é inegável a importância desse material, ainda que a sua presença nem sempre seja percebida pelas pessoas.

Na busca permanente de práticas mais sustentáveis nos processos produtivos é fundamental ampliar o conhecimento da sociedade sobre uma característica importante do aço: é 100% reciclável. Essa capacidade de retorno permanente à cadeia produtiva como matéria-prima, sem perder a qualidade, faz dele um dos materiais mais reciclados do mundo. Sua transformação atende a demandas em diferentes setores como automotivo, construção civil, máquinas e equipamentos, linha branca, cutelaria, entre outros. Os benefícios ambientais relacionados à reciclagem na indústria do aço são amplos, incluindo redução do uso de matérias-primas não renováveis e redução das emissões de gases de efeito estufa. Há também um impacto social positivo, devido à geração de empregos na coleta e processamento das sucatas. [1]

O setor siderúrgico, atualmente, ainda busca recuperar-se dos efeitos pós-crise e do impacto negativo dos anos recentes. A crise que se agravou na Europa e a recuperação muito lenta da economia nos Estados Unidos fizeram o setor siderúrgico mundial rever seus projetos. Isso influencia diretamente a economia brasileira tanto em função da menor produção das usinas instaladas no país quanto à queda na demanda mundial por minério de ferro, matéria-prima básica da produção de aço.

O Brasil, segundo dados de mercado consolidados do setor, possui uma capacidade instalada de 48,4 milhões de toneladas/ano de aço bruto distribuídos entre 11 grupos empresariais e 29 usinas. Em 2012, a produção de aço bruto foi de 34,5 milhões de toneladas, representando uma queda de 2% em relação ao anterior. O problema está representado pelo desempenho aquém do esperado das exportações e da demanda interna por aço. [2]

A produção de aço ocorre, normalmente, por duas rotas: a partir da transformação do minério de ferro (alto forno e forno básico de oxigênio), e a partir da reciclagem da sucata de aço (forno elétrico a arco). A produção via arco elétrico está entre 35 a 40% da produção nacional. [2]

A conscientização da população mundial quanto a importância de e resgatar e manter a qualidade de vida tem refletido na forma de pressões sobre a relevância da preservação ambiental. Exatamente por isso, crescem os estudos no setor, assim como as organizações governamentais mostram-se mais interessadas e preocupadas com o assunto.

Nesse sentido, as indústrias geradoras de resíduos, que segundo as normas brasileiras são responsáveis por seus resíduos até a comprovação de seu descarte adequado ou de sua reutilização comprovada, têm-se empenhado em pesquisas no intuito de transformá-los em subprodutos. Assim, a reciclagem ou utilização de subprodutos, além de reduzir a extração de recursos naturais, minimiza a deposição de resíduos em aterros e a quantidade de emissões que agridem o meio ambiente, como o CO₂.

O pó de aciaria elétrica (PAE), um resíduo sólido gerado na fabricação de aço via arco elétrico, representa um dos maiores problemas ocasionados nas usinas siderúrgicas *minimills*, especialmente por seu conteúdo em elementos químicos, tais como Zn, Pb, Fe, Cr, Cd, entre outros. Por esse motivo, de acordo com os critérios normativos brasileiros, o PAE é classificado como resíduos classe I – resíduo perigoso (norma NBR 10004:2004) [3], bem como em outros países como Japão, Estados Unidos, e nos países integrantes da União Europeia.

Recentemente, a alta demanda produtiva e o consequente aumento da produção de aços obviamente representa uma maior geração de resíduos. Assim, com o advento de leis socio-ambientais mais rígidas e órgãos reguladores, permitiu-se, compulsivamente, o desenvolvimento de estudos e de técnicas sobre a utilização deste resíduo. Soma-se às exigências impostas pela legislação ambiental ao presente panorama siderúrgico nacional, com extrema necessidade de redução de custos.

No Brasil, a realidade de aproveitamento desse resíduo é bem abaixo da média mundial e, na maioria das vezes, sua destinação são aterros de resíduos industriais perigosos (ARIP). A difícil generalização de uma solução contribui ativamente para esse fato.

Este estudo propõe caracterizar uma amostra de PAE de uma indústria siderúrgica produtora de aços longos localizada no estado do Ceará e analisar o panorama brasileiro e mundial quanto ao seu aproveitamento, apresentando e discutindo alternativas a destinação deste resíduo.

2. OBJETIVOS

2.1 Gerais

- Caracterizar uma amostra de pó de aciaria elétrica (PAE) proveniente de uma indústria siderúrgica do Estado do Ceará;
- Realizar uma pesquisa sobre o aproveitamento do PAE com base na literatura disponível em publicações.

2.2 Específicos

- Realizar o estudo de caracterização da amostra de PAE por meio de: fluorescência de raios-X, para identificar a composição química; e difração de raios-X, para identificar as principais fases presentes no PAE.
- Realizar uma pesquisa sobre o aproveitamento de PAE criando um banco de dados de informações baseado em teses/dissertações de pesquisadores e artigos nacionais e internacionais, enquadrando a amostra em estudo, e uma discussão sobre as possibilidades de utilização do PAE.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Introdução a Aciaria Elétrica

Nos processos de elaboração do aço denominados de aciaria elétrica, o calor necessário para aquecer e fundir o aço é gerado em sua maior parte pela energia elétrica. O pioneiro deste processo foi Wilhelm com Siemens que em 1878, fundiu o aço em um pequeno cadinho, por meio do fornecimento de calor através da geração de um arco voltaico, transformando energia elétrica em energia térmica. [4] O potencial deste processo foi vislumbrado desde então em função de suas características inerentes: possibilidade de controlar a temperatura do banho e as condições de oxidação e de redução da escória.

O impulso necessário ao desenvolvimento e emprego de fornos elétricos para fabricação de aço ocorreu com as duas guerras mundiais. Assim, a produção de aço via aciaria elétrica em maior escala iniciou-se nos anos 40 do século passado. O desenvolvimento tecnológico fez com que o forno a arco elétrico (EAF) se tornasse uma unidade de fusão em larga escala, rápida e econômica. A viabilização da utilização do EAF para produtos planos de alta qualidade, em detrimento da utilização inicialmente em produtos longos, passou pela possibilidade de substituição da carga de sucata de aço por ferro esponja ou ferro diretamente reduzido (DRI), em função das maiores exigências de composição e de qualidade requeridas para os planos..[4]

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. Outras vantagens são a facilidade de controle de temperatura e a maior flexibilidade operacional. [4]

3.2 Tipos de fornos a arco elétrico

As formas de conversão de energia elétrica em calor de interesse dos processos de elaboração dos aços são: através da transferência de calor por radiação a partir de um arco elétrico gerado pela passagem de corrente de um gás ionizado, através da resistência a passagem de uma corrente elétrica em um condutor sólido e por indução eletromagnética. O arco elétrico se caracteriza por apresentar uma grande

concentração de potência em um pequeno volume. Assim, de interesse para o atual estudo e análise, classificamos os fornos da modalidade arco elétrico nos tipos a seguir:

- **Forno a arco direto:** O arco elétrico, ou arco voltaico, é gerado pela passagem da corrente elétrica através do ar ionizado (plasma) que separa os dois pontos (um dos pontos é o eléctrodo e o segundo ponto é o material que está sendo aquecido - o qual, necessariamente, deve ser condutor elétrico) entre os quais o arco é formado. Desta forma, a transferência de calor ocorre directamente para a carga. A corrente eléctrica também flui através da carga metálica, gerando aquecimento adicional. A temperatura do arco corresponde à temperatura de ebulição do material que constitui o eléctrodo. Podemos, ainda, subdividir estes fornos em:

1. Tipo **corrente alternada**, nos quais a corrente eléctrica passa de um eléctrodo através do arco elétrico para a carga, e da carga retorna através do arco para outro eletrodo. A polaridade deste dois pontos se inverte a cada semiciclo da corrente com frequência da rede. No caso da fabricação de aços, usualmente utiliza-se a construção com três eléctrodos, instalados através da abóbada do forno (*three-phase alternating current direct-arc*).

2. Tipo **corrente contínua**, nos quais a corrente eléctrica passa de um eletrodo, através do arco elétrico, para a carga e desta para outro eletrodo instalado na soleira do forno. No caso da fabricação de aços, é usual a construção com um eletrodo na abóbada e outro na soleira (*direct current direct-arc*).

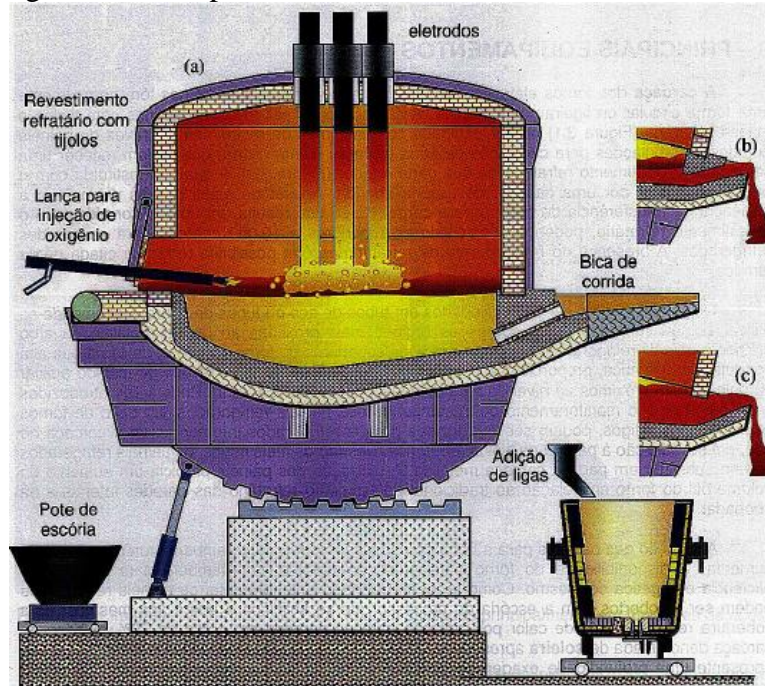
- **Forno a arco indireto:** Empregam 2 ou 3 eletrodos para formar o arco elétrico entre eles. Nesse caso, a transferência de calor ao material ocorre unicamente por radiação a partir do arco, sem mergulho de eletrodos na carga. Com consumo energético maior, este tipo de arco é somente empregado em fornos de baixa capacidade.

- **Forno de arco-resistência (ou arco submerso):** Neste caso, a própria carga aquecida funciona como elemento resistor à passagem de corrente eléctrica, ocorrendo aquecimento por efeito Joule. O eletrodo penetra na carga e o arco se forma no interior da mesma. Esse tipo de forno é utilizado para redução de minérios e comumente denominado forno elétrico de redução.

O forno elétrico a arco convencional de corrente alternada, que caracteriza-se como principal ao tratar-se de aciaria eléctrica, será a referência de forno utilizada no estudo.

3.3 Esquemática dos principais elementos de um forno a arco elétrico elétrico

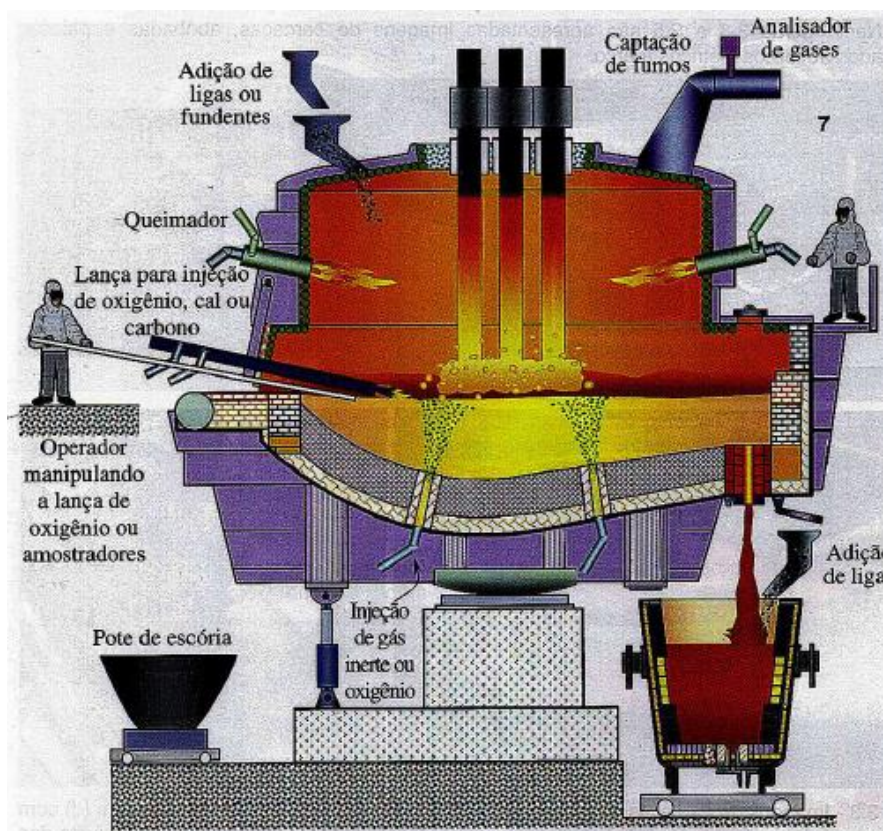
Figura 1 - Principais elementos de um forno a arco elétrico [4]



Na figura anterior pode-se observar os elementos fundamentais de um forno a arco elétrico (EAF) tradicional, onde ainda podemos destacar: *carcaça*, de forma normalmente circular ou ligeiramente elíptica; *painéis refrigeradores*, dotados de tubulações para circulação de água, podendo revestir a carcaça junto a massa refratária; *aberturas laterais*, uma para remoção de escória, inspeção do interior do forno, adição de materiais e injeção de oxigênio por lança, e a outra corresponde a *bica de corrida*.

Nos fornos mais recentes, em substituição da bica de corrida, utiliza-se um *furo de corrida* na soleira (parte inferior da carcaça) do forno em posição excêntrica (EBT), conforme mostra a figura seguinte. [4]

Figura 2 – Visão geral de um forno arco elétrico [4]



Os eletrodos de carbono amorfo são mais utilizados em forno a arco submerso. Em detrimento, o eletrodo de grafita tem maior resistência à compressão e maior condutibilidade térmica, sendo utilizado comumente em EAF de arco direto. [4]

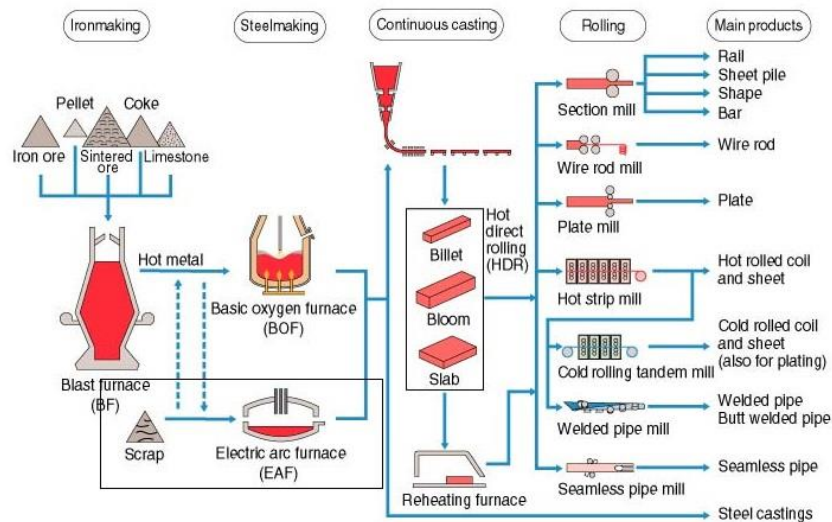
3.4 Processo de fabricação do aço por Aciaria elétrica

As aciarias elétricas têm como matéria-prima a sucata e diferenciam-se, além da rota tecnológica, pela flexibilidade a mudanças na mistura de fontes metálicas, pela escala eficiente de produção, em consequência da seleção de um mercado regional objetivado, pelo baixo capital investido em US\$/tonelada de capacidade de produção, pela maior flexibilidade de adaptação às mudanças de mercado e pela forma de gerenciamento [5].

O processo produtivo através de EAF 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. Pode-se observar na figura seguinte a inserção do EAF no fluxo siderúrgico.

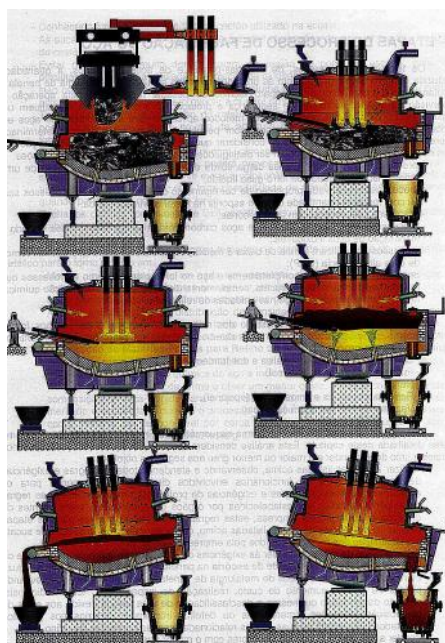
Figura 3 – Fluxograma simplificado do processo siderúrgico [6]



Em resumo, podemos representar esquematicamente as etapas do processo da elaboração de aço no forno elétrico a arco da seguinte maneira:

- a) Carregamento da carga metálica e dos fundentes;
- b) Início de fusão;
- c) Fim de fusão;
- d) Refino;
- e) Retirada de escória e amostragem;
- f) Vazamento.

Figura 4 – Operação de um forno arco elétrico [4]



3.5 Pó de Aciaria Elétrica

Nos fornos de aciaria elétrica das usinas siderúrgicas, forma-se um material complexo oriundo de uma série de fenômenos que envolve: volatilização dos metais não-ferrosos (Zn, Pb, Cd, entre outros); ejeção de gotas de aço líquido e de escória ocasionadas pela expansão de bolhas de monóxido de carbono; arraste de partículas sólidas (materiais adicionados ao forno); e, mesmo, atomização [7]. O material em questão é denominado pó de aciaria elétrica (PAE), e é considerado um resíduo da produção do aço, assim como a escória e a carepa. Devido às tais circunstâncias e a sua composição, o PAE é classificado como um resíduo sólido perigoso, Classe I (Não Inerte) de acordo com a norma NBR 10004 [3]. Assim, os órgãos ambientais legais (SEMACE, no caso do estado do Ceará) exigem uma disposição adequada em aterros de resíduos industriais perigosos (ARIPs).

Devido às diferenças de composições dos vários tipos de pós gerados, deve-se levar em consideração como variáveis o tipo de forno, o ciclo operacional do aço, o tipo de aço produzido e, em especial, a natureza e a quantidade de sucata e adições que constituem a carga do forno elétrico a arco (FEA).

Independente do processo utilizado e especialmente em processos que utilizam sucatas de aço como matéria-prima, a fabricação de aço é sempre acompanhado da emissão de grande quantidade de poeira de aciaria, a qual é carregada dos fornos por meio de sistemas exaustores e armazenada em silos (ou *bags*) adequados.

Uma série de pesquisadores no mundo têm-se proposto a relatar os índices de geração de PAE, e estudos mostram que os mesmos encontram-se na faixa de 15 - 20kg/tonelada de aço produzido [7], sendo também relatados valores inferiores (1,5 - 2kg). Tais valores demonstram que as grandes quantidades têm sido geradas e sua disposição em ARIPs, 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.

3.6 Mecanismos de formação do pó de aciaria elétrica (PAE)

Os estudos sobre a formação de pó no processo siderúrgico via arco elétrico propõem basicamente uma lista mecanismos que teoricamente são capazes de explicá-

la. Com a alta do mercado e a fomentação do carácter sustentável ambiental nas indústrias produtoras de aço, diversos estudiosos se propõem a pesquisar o tema. Por exemplo, NEIGEBAUER *et al. apud* MANTOVANI [8] estudaram os mecanismos da formação de poeira em fornos elétricos durante a injeção de oxigênio e concluíram que as partículas, em sua maioria, foram geradas pelo mecanismo de ejeção, sendo a vaporização de importância secundária.

Deste modo, os seguintes mecanismos podem contribuir para geração de pós siderúrgicos em forno elétricos (podendo também ser aplicável a conversores a oxigênio):

- i. Vaporização de metais voláteis (Zn, Pb, Cd, 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.

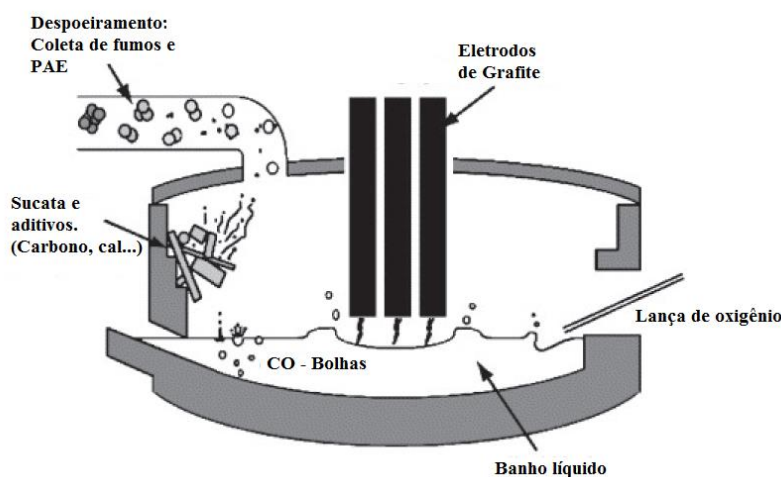
A atomização é importante durante a adição de fundentes, em especial de fina granulometria. Partículas geradas por vaporização possuem sua formação controlada pela pressão de parciais de vapor nas zonas mais quentes do forno, em contrapartida das partículas ejetadas devem ter suas composições químicas semelhantes as suas fontes. Logo, em posse de dados de pós, banho metálicos, escória, adições, pode-se, a partir de matemática, mensurar a contribuição dos diferentes mecanismos [9].

A abordagem de formação do PAE deve, também, levar em consideração o processo, que pode resumir-se em cinco etapas: **Carregamento do forno** – a sucata e aditivos (cal, grafite) são carregados no forno através dos cestões; **Fusão da sucata** – um arco elétrico é criado entre os eletrodos de grafite e a sucata, provocando temperaturas extremamente altas, o que ocasiona a fusão da sucata e a formação de um banho líquido de aço coberto por uma camada de escória. Nesse momento, metais voláteis começam a ser removidos; **Refino** – o fósforo é removido do banho por reações interfaciais entre a escória e o metal líquido. A injeção de oxigênio promove a reação de descarburização, o carbono é dissolvido e são formadas bolhas de monóxido de carbono (CO); **Escória espumante** – bolhas de CO atravessam a camada de escória formando uma espuma, que é reforçada com a adição de carbono em forma de pó de carvão;

Vazamento – após a conferência da composição e da temperatura do banho, para o controle de segurança e qualidade, o aço líquido é vazado.

Durante esse processo, os fumos são extraídos através de um equipamento de sucção projetado para a retirada de pó, gerada no forno, da aciaria. Nesse equipamento de despoeiramento, os pós e fumos são transportados para filtros manga [10, 11, 12]. A seguir, temos uma visão geral do sistema [13, 14].

Figura 5 - Visão geral do forno elétrico e do sistema de despoeiramento



3.7 Composição química e mineralógica do PAE

A composição do PAE varia amplamente, dependendo da sucata utilizada, do tipo de aço produzido, das condições de funcionamento do forno e dos procedimentos utilizados. 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 pós gerados em aciarias que produzem aço inoxidável (valor relativamente baixo de zinco e chumbo, mas são ricas em elementos de liga, como, cromo, níquel e manganês) e em aciarias que produzem aços menos nobres, como aço carbono (ricos em zinco e chumbo). Obviamente, o uso de sucata galvanizada aumenta o percentual de zinco na poeira gerada.

Comumente, no caso da aciaria elétrica, classifica-se os pós de acordo com a quantidade de zinco:

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

NYRENDA [15] relatou observações e estudos de diversos autores e apresenta uma breve visão de fases e elementos presentes nos PAEs, baseando-se na formação em atmosfera oxidante e concluindo que mais de 90% do pó é constituído por óxidos. A tabela 1 mostra-nos um abordagem simplificada desses estudos

Tabela 1 – Fases nas quais os elementos se apresentam [7]

ELEMENTOS	FASES QUE CONTÊM OS ELEMENTOS
Fe	Fe ₃ O ₄ , no qual os cátions de Fe ⁺² , podem estar substituídos por Zn, Mg, Cu, Mn, etc. Também se encontra na forma metálica e como α-Fe ₂ O ₃ e γ-Fe ₂ O ₃
Zn	50-80% como zincita (ZnO). A outra maior parte está principalmente associado ao Fe e em forma de espinélio ZnFe ₂ O ₄ . Pequenas quantidades de zinco estão na forma de silicatos, sulfatos ou aluminatos.
Cd	Distribuição não muito bem estabelecida, mas possivelmente como o zinco, considerando algumas semelhanças entre os dois elementos.
Pb	Principalmente como óxido. O PbSO ₄ e PbCl ₂ estão também presentes.
Cr, Ni	Substituindo ao Fe na Fe ₃ O ₄ , estrutura do tipo espinélio, algum Cr pode estar na forma Cr ₂ O ₃ .
Ca	Como CaO e CaCO ₃ , principalmente, pode ocorrer como fluoreto, ferrita ou silicato.
Cl, Na, F, K	Presentes como sais ou cloretos.

O ciclo operacional, o forno, a composição química do aço produzido, adições, e, em especial, a matéria-prima (natureza e quantidade de sucata) são fundamentais na composição do PAE.

Tabela 2 - Intervalo de composições químicas para alguns elementos presentes no pó de aciaria de siderúrgicas [10,15]

Elementos	PAE de aços carbono (%)	PAE de aços inoxidáveis (%)
Fe _{total}	24,9 - 46,9	22,2- 35,90
Zn	11,1 -26,9	1,77 – 6,22
Pb	1,09 -3,81	0,23 -0,78
Cd	0,03 –0,15	0,006 – 1,79
Cr	0,06 – 0,58	2,01 – 10,1
Ni	0,01 – 0,12	0,15 – 3,34
Mo	0,02 – 0,88	0,37 – 1,46
Cu	0,06 – 2,32	0,09 – 1,26
F	0,01 – 0,88	1,36 – 4,83
Cl	0,51 – 2,36	0,47 – 1,17
Si	1,35 – 2,49	1,36 – 4,83
Mn	2,46 – 4,60	2,36 – 4,59
Mg	0,77 –2,93	1,70 – 6,93
Ca	1,85 –10,0	1,76 – 6,93
K	0,06 –1,12	0,80 – 5,07
Na	0,29 – 2,31	0,47 – 4,60

3.8 Propriedades Físicas do PAE

As características físicas de maior relevância do PAE são a granulometria de partícula, a área superficial específica, a densidade e a umidade.

As partículas que compõem o PAE normalmente exibem granulometria menor que 11 μ m, com partículas na faixa de 1,0 μ m -10 μ m que facilmente sofrem aglomeração ou revestem partículas maiores. As partículas apresentam um formato esférico, o que está de acordo com o seu principal mecanismo de formação, a ejeção de partículas do banho metálico e da escória. [10]

A área superficial específica da PAE tem sido avaliada com valores entre 2,5m²/g a 4,72 m²/g utilizando-se a técnica BET e 0,7 m²/g com o aparelho de permeabilidade de ar Blaine. [7]

O pó de aciaria elétrica é caracterizado por apresentar uma densidade baixa, com valores que chegam até 4,74 g/cm³, tendo uma dependência do teor da umidade presente. [7]

A tabela seguinte apresenta o resumo de algumas propriedades físicas de pós gerados durante a produção do aço e um breve comentário sobre desvantagens de tais propriedades em relação ao manuseio, descarte e possível tratamento do PAE. [7,15]

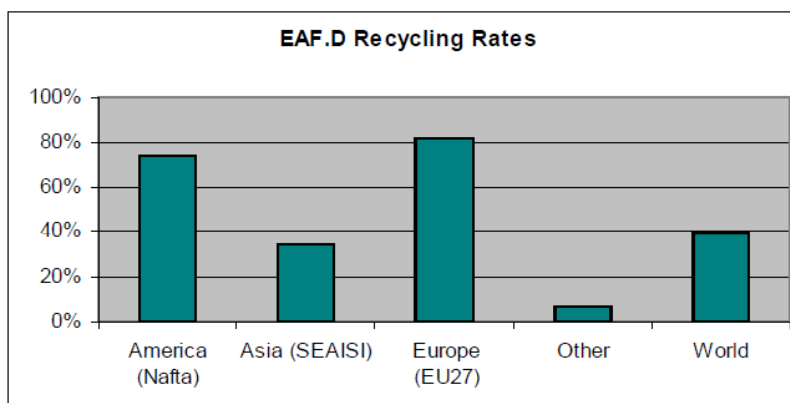
Tabela 3 - Características Físicas do PAE

Características	Intervalos normalmente relatados	Desvantagens
Granulometria	Menor que 10 µm, onde a aglomeração ocorre em grande extensão.	Após a lixiviação, apresenta dificuldade na separação sólido/líquido.
Densidade aparente	3,50 g/cm ³ – 4,74 g/cm ³	Volume considerável quando se visa o descarte ou armazenamento. Difícil de ser reintroduzido no processo de produção sem aglomeração ou técnicas de injeção.
Área Superficial Específica	0,40 m ² /g – 5,60 m ² /g, medida pelo método BET.	Devido à área superficial relativamente alta, há necessidade de grande quantidade de reagente, no caso de processo hidrometalúrgico.
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.

3.9 Aproveitamento do PAE

No mundo, desde a última década tem crescido a razão de reaproveitamento de PAE por rotas de reciclagem, em especial os Estados Unidos ($\pm 75\%$) e a União Europeia ($>80\%$), como pode-se observar nos dados sobre as razões de reciclagem na figura 6.

Figura 6 – Razões de reaproveitamento de PAE no mundo [16]



Há uma tendência mundial, especialmente em países desenvolvidos, em atrelar o reaproveitamento do PAE à recuperação de zinco (nas formas de Zn ou ZnO), uma vez que, como ficará claro durante as próximas seções, este resíduo geralmente possui quantidades significativas – ± 11 a 45% – do mesmo [45 -1]. A razão da presença considerável de Zn é justificada pela comum presença de materiais galvanizados na matéria-prima das usinas *minimills* (sucata de aço). O reaproveitamento do pó de aciaria, na verdade, representa o fechamento de um ciclo de reciclagem de aço (via siderurgia) e reciclagem de Zn, ambos utilizados no amplamente aplicado processo de galvanização [16].

O que vemos, baseado na figura 6, é uma perda significativa de potencial fonte de Zinco, em especial no Brasil, onde rotas de reciclagens são inferiores a 10%. Em nosso país, as principais propostas de reaproveitamento objetivam o retorno ao processo produtivo ou sua adição como matéria-prima em outros processos [17]. Isso representa espaço para estudo e inovação tecnológica no mercado brasileiro junto aos grandes grupos siderúrgicos, que enfrentam um cenário complicado na conjuntura atual e precisam rever custos.

É realidade que a maioria dos processos emergentes para o tratamento de poeiras encontram-se em fase de estudo, tanto a modelos laboratoriais quanto a plantas pilotos, porém é consenso que as rotas de tratamento enquadram-se nas seguintes categorias de processos [7]:

i. Processos Hidrometalúrgicos: a utilização de soluções ácidas, alcalinas e mesmo neutras como agentes lixiviantes do pó, uma vez que o zinco possui caráter anfótero [8]. Rotas hidrometalúrgicas (Figura 7) [7] normalmente possuem menor aplicação comercial. É importante ressaltar que essas rotas geram problemas quanto ao manuseio de resíduos pós-lixiviação (a solução).

ii. Processos Pirometalúrgicos: são processos de maior interesse comercial devido sua maior aplicabilidade, embora, em sua maior parte, requeiram investimentos mais volumosos. Nessa categoria, enquadra-se o processo Waelz, o mais consagrado e com patentes prescritas, onde o mesmo responde atualmente pela maior parte dos métodos de reaproveitamento (Figura 8) [16].

Figura 7 - Diversas rotas hidrometalúrgicas para tratamento do PAE [7]

Agente Lixivante	Descrição	Desvantagens
NaOH	Lixiviação de ZnO por NaOH (95°C) seguido de processo eletrolítico.	Alto consumo de reagentes. Dificuldades na eletrólise. O resíduo da lixiviação contém quantidades apreciáveis de Pb e Cd.
H ₂ SO ₄ , pH 4 - 5	Lixiviação de ZnO por H ₂ SO ₄ seguido de purificação e eletrólise.	Baixa recuperação de Zn. PbSO ₄ contido no resíduo da lixiviação o torna muito tóxico.
H ₂ SO ₄ , pH < 2	Dois estágios para lixiviação de ZnO e ZnFe ₂ O ₄ seguidos por purificação e eletrólise.	Novamente, o resíduo gerado na lixiviação contém quantidades apreciáveis de PbSO ₄ .
HCl, pH < 1	Precipitação de Fe sob a forma de óxidos. Zn é extraído por eletrólise e extração por solventes.	Manuseio de cloretos. Processos de extração por solventes/eletrólise caros e complicados para pequenas unidades siderúrgicas.
NH ₃ - (NH ₄) ₂ CO ₃	Uso de carbonato de amônia para lixiviar ZnO, seguido da precipitação de ZnCO ₃ .	Zinco presente como ferrita não é lixiviado. Pb permanece no resíduo da lixiviação.

Figura 8 – Porcentual de técnicas de tratamento de pós de aciaria elétrica utilizadas no mundo

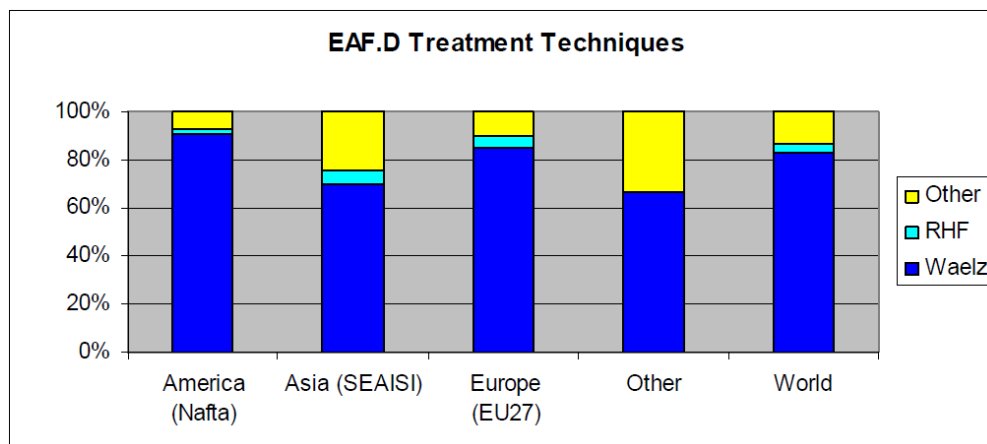


Figura 9 - Exemplos de métodos pirometalúrgicos para tratamento de PAE

[7]

Processo	Produtos obtidos
WAE LZ	ZnO, óxido de ferro, vapores de PbCl ₂ /CdCl ₂
FLAME REACTOR	ZnO, escória
HRT	Zn e Pb
LACLEDE STEEL	Zn metálico, escória
INMETCO	Zn, Pb, Fe, e Fe-Cr-Ni
SIROSMELT	ZnO
METWOOL	ZnO, ferro gusa
ENVIRONPLAS	Zn metálico ou ZnO, escória
ALLMET	Zn metálico, Fe/Fe ₃ C
AUSMET	ZnO, escória
INDUTEC	ZnO
PRIMUS	Zn, Pb, Cl, Na, K e Fe

iii. Estabilização química: Consiste na estabilização dos metais pesados presentes no PAE (Pb e Cd, principalmente), buscando a produção de um material que esteja adequado às exigências em relação ao seu descarte. Enquadram-se nesse processo, propostas como co-processamento do pó de aciaria em cimentos alternativos [7].

Tabela 4 – Referências gerais em processos utilizados em todo mundo [18]

Processo	País	Princípio	Produtos
St. JOE	EUA (comercial)	Redução seletiva dos óxidos dentro de um ciclone de fusão	Fe, Zn e Pb
Lixiviação com soda caústica para PAE	Turquia	PAE + NaOH	Zn e Pb
Enviroplas	África do Sul (comercial)	Redução seletiva dos óxidos a alta temperatura em presença de carbono	ZnO e Pb
Waelz	Desenvolvido na Alemanha (comercial)	Pó + agente redutor + fundentes	ZnO (contaminado por Pb+Halogenios +produto rico em Fe)
Processo hidrometalúrgico para produção de Zn	Singapura	PAE + água + NaOH + solução alcalina	Zn e Pb
ZIA	EUA	Forno vertical + retorta	Zn metálico
INMETCO	EUA (comercial)	PAE (aço inoxidável) + material carbonáceo	Pb, Zn, Fe e Fe-Cr-Ni
HTR	Japão (comercial)	Redução seletiva	Zn e Pb
IMS	Japão (comercial)	Redução em fornos elétricos dos óxidos dos pós	Fe e Zn
RHYOHO	Japão (comercial)	Processo eletroquímico	Concentrado de Zn
Redução do PAE por plasma	Canadá	PAE + Redutor (CO ₂) + plasma (24KVA)	Zn, Pb, Cd e escória
EZINEXX	Itália (comercial)	PAE + eletrolito fraco + agente redutor (carvão mineral) + carepa de laminação	Zn, Fe, Pb e metais alcalinos
Processo Fusão redução	Japão	PAE + Agente redutor (coque)	Zn e Fe
PRIMUS	Luxemburgo (planta piloto)	Minério de ferro + carepa de laminação+PAE+Lama BF/BOF+lama oleosa+carvão	Zn, Pb, Cl, Na, K e Fe

3.10 Fluorescência e Difração de Raios-X

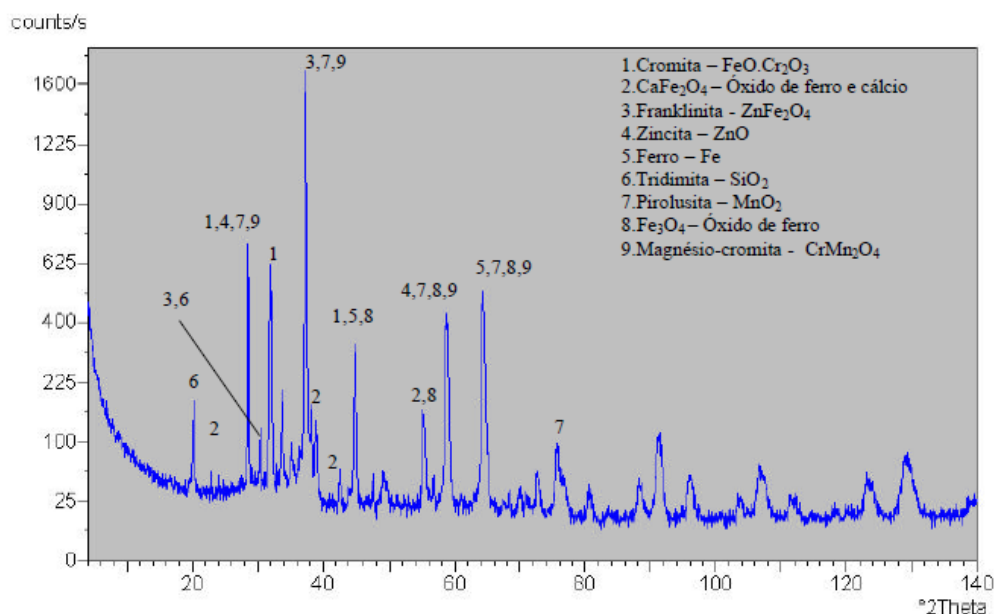
A fluorescência de Raios-X é uma poderosa técnica não destrutiva que permite não só uma análise qualitativa (identificação dos elementos presentes numa amostra) mas também quantitativa, permitindo estabelecer a proporção em que cada elemento se encontra presente.

Na fluorescência de Raios-X usa-se uma fonte de radiação (gama ou X de elevada energia) para provocar a excitação dos átomos da substância que pretendemos analisar. Os fótons emitidos pela fonte são absorvidos pelos átomos da substância através de efeito fotoelétrico, deixando esses átomos em estados excitados. Com elevada probabilidade, os elétrons arrancados ao átomo por efeito fotoelétrico situam-se nos níveis K ou L. Quando o átomo se desexcita, podemos observar fótons correspondentes às transições electrónicas $L \rightarrow K$, $M \rightarrow K$ ou $M \rightarrow L$. O espectro de energia correspondente a estas transições é único para cada tipo de elemento, permitindo fazer a sua identificação.

A difratometria de Raios-X corresponde a uma das principais técnicas de caracterização microestrutural de materiais cristalinos, encontrando aplicações em diversos campos do conhecimento, mais particularmente na engenharia e ciências de materiais, engenharias metalúrgica, química e de minas, além de geociências, dentre outros. Os Raios-X ao atingirem um material podem ser espalhados elasticamente, sem perda de energia pelos elétrons de um átomo (dispersão ou espalhamento coerente). O fóton de Raios-X após a colisão com o elétron muda sua trajetória, mantendo, porém, a mesma fase e energia do fóton incidente. Sob o ponto de vista da física ondulatória, pode-se dizer que a onda eletromagnética é instantaneamente absorvida pelo elétron e reemitida; cada elétron atua, portanto, como centro de emissão de Raios-X. O feixe difratado é produzido por espalhamento, apresentando máximos quando algumas condições geométricas, expressas pela Lei de Bragg, são satisfeitas.

Muito da nossa compreensão em relação aos arranjos atômicos moleculares nos sólidos resultou de investigações da difração de Raios-X. Além disso, os Raios-X ainda são muito importantes no desenvolvimento de novos materiais [19].

Figura 10 – Exemplo de difratograma de amostra de PAE de usina produtora de aço inox no Rio Grande do Sul [20]



3.11 Legislação: Normas brasileiras

A classificação dos resíduos sólidos brasileira é regida pela norma da Associação Brasileira de Normas Técnica (ABNT) NBR 10004/2004. Esta norma classifica os resíduos quanto a sua potencialidade de causarem riscos ao meio ambiente e à saúde pública. Os resíduos são classificados em perigosos ou não perigosos [3]:

i. **Resíduos classe I – Perigosos:** São aqueles que em função de suas propriedades químicas, físicas ou infectocontagiosas apresentam alguma periculosidade [3].

ii. **Resíduos Classe II – Não-Perigosos:** Esta classe subdivide-se em: **Resíduos Classe II A-Inertes:** Quaisquer resíduos que, quando amostrados segundo a norma NBR 10007 [21] e submetidos a um contato estático ou dinâmico com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, conforme NBR 10006 [22], não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de nível de água potável, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor[3]; e **Resíduos Classe II B- Não Inertes:** Aqueles que não se enquadram nas classificações de resíduos classe I-Perigosos ou de resíduos classe II A-Inertes. Os resíduos classe II B podem ter propriedades, tais como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água[7].

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais

No presente estudo, o material utilizado foi uma amostra de pó de aciaria elétrica cedida por uma usina siderúrgica localizada no estado do Ceará, recolhida de acordo com os requisitos exigidos segundo a norma NBR-10007 da ABNT [21]. A referida norma estabelece uma amostra representativa – parcela do resíduo a ser estudada, obtida através de um processo de amostragem, e que, quando analisada, apresenta as mesmas características e propriedades da massa total do resíduo [21].

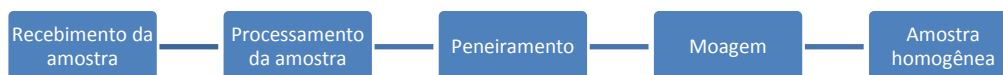
Figura 11 - Aspecto visual do PAE



4.2 Métodos

4.2.1 Processamento do PAE

Figura 12 - Fluxograma do processamento da amostra



A amostra de pó de aciaria elétrica (PAE), da forma como recebida pela empresa produtora, foi submetida a procedimentos (conforme observado na figura anterior – figura 4) que visam garantir que amostra representativa seja homogênea.

Inicialmente, o PAE passou por uma etapa de peneiramento objetivando separar granulometricamente eventuais impurezas que possam ter sido adicionadas durante o manuseio, transporte e tempo de permanência no depósito de estocagem da empresa. Utilizou-se, para tal, uma peneira de granulometria de 170 mesh (88 μ m) de aço inoxidável e um agitador de peneira. O PAE, então granulometricamente definido, é encaminhado para moagem, em moinho de bolas e com tempo de operação de seis horas. Considerando que a amostra de PAE em questão é pontual em relação à empresa produtora, podendo apresentar variações quanto à composição química e as fases presentes, a homogeneização é fundamental para garantia de resultados representativos.

4.2.2 Procedimentos Experimentais

Caracterização do PAE: Difração de Raios-X e fluorescência de Raios-X

As medidas de difração de Raios-X foram realizadas no Laboratório de Raios-X do Departamento de Física da UFC. O equipamento utilizado foi o difratômetro para amostras policristalinas modelo DMAXB – Rigaku gerador de Raios-X de 2kW, com radiação de tubo de Cobalto (Cu), CuK α 1 e CuK α 2, operando a 40kV e 30mA. Os padrões de difração foram obtidos no intervalo $2\theta = 5^\circ$ - 120° e passo de $0,02^\circ$ (2θ). A identificação das fases cristalinas presentes ocorreu mediante o uso do catálogo International Centre for Diffraction Data (ICDD) e do programa X'Pert High Score Plus. As medidas de fluorescência de Raios-X foram realizadas no equipamento Rigaku, modelo ZSX mini II, também pertencente ao laboratório de Raios-X do Departamento de Física da UFC.

4.2.3 Levantamento de dados e de processos: Estudo da viabilização de processos de aproveitamento do PAE

Foram utilizados teses de pesquisadores, artigos de periódicos internacionais, dados obtidos da literatura e conhecimentos obtidos junto ao estudo do processo com o intuito de considerar diversas possibilidades de reaproveitamento do PAE e poder sugerir rotas que sejam de interesse para a indústria. Realizou-se um banco de dados e de processos de reaproveitamento de diferentes categorias e buscou-se adaptar a caracterização do PAE em questão, realizando uma discussão sobre possibilidades, pontos favoráveis e desfavoráveis e viabilidade.

5. RESULTADOS

5.1 Fluorescência de Raios-X do PAE

A tabela a seguir apresenta os resultados de fluorescência para as seguintes amostras de PAE: (1) a amostra enviada pela empresa sem qualquer tipo de tratamento, (2) a amostra após peneiramento e homogeneização e (3) amostra retida na peneira.

Tabela 5 – Resultado da fluorescência do pó de aciaria elétrica para os três tipos de amostras relatadas

Elementos	PAE – empresa (%)	PAE peneirado e homogeneizado (%)	PAE retido na peneira (%)
Zn	45.515	44.358	38.996
Fe	33.308	34.557	37.046
Cl	6.2333	6.135	5.987
Pb	3.7340	3.704	2.806
Ca	3.4708	3.442	3.966
K	2.5898	2.574	2.114
Mn	1.4102	1.454	1.217
Si	1.3921	1.418	1.769
Al	0.5775	0.631	0.450
Br	0.5254	0.604	0.479
S	0.5254	0.472	0.426
Cu	0.4307	0.298	0.284
Ti	0.1480	0.178	0.211
Cr	0.2064	0.169	0.229
P	0.1579	-	0.132
Na	-	-	3.883

Os resultados de fluorescência apresentam a composição química elementar do resíduo, confirmando o zinco e o ferro como os principais elementos componentes da amostra de PAE.

O resíduo analisado apresenta uma composição consistente com os resíduos gerados na produção de aços carbono, com especial destaque aos teores de Zn superiores aos mais comumente encontrados. Destaca-se, também, a presença do Pb, confirmando a periculosidade do resíduo, ainda que o percentual em massa desse elemento esteja dentro da faixa média para a PAE.

Um dado relevante sobre as amostras está no teor de Zn presente. A elevada concentração desse elemento, aproximadamente 30% superior ao conteúdo de ferro, evidencia o aumento no uso de sucata galvanizada pela empresa geradora do resíduo. Além disso, a porcentagem de ferro, ainda que dentro dos valores encontrados para esse tipo de resíduo, sugere uma perda potencial do elemento que é o constituinte principal do produto final da empresa, aço.

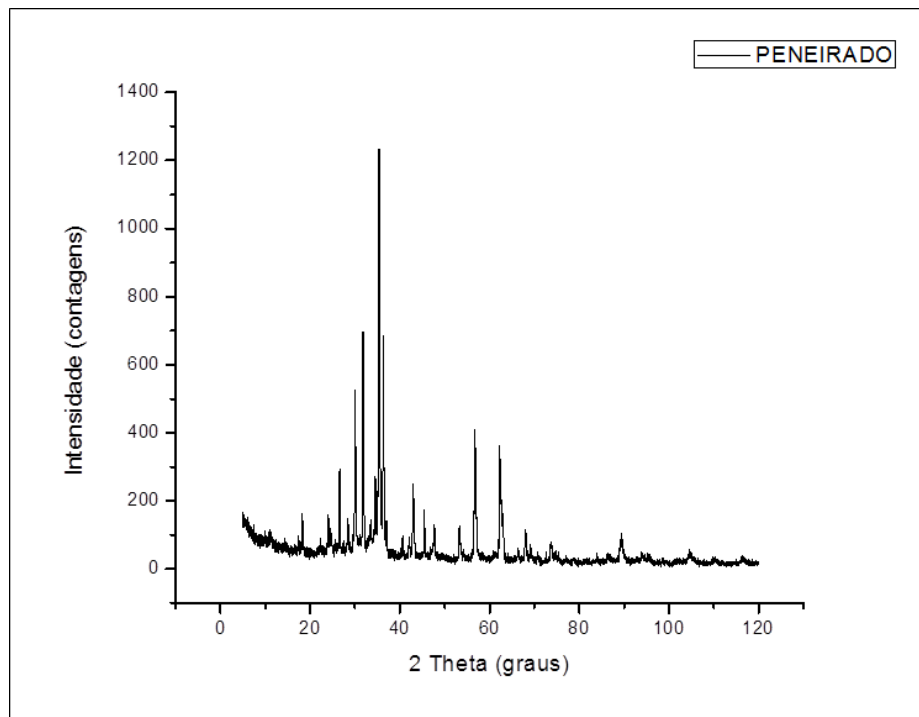
A amostra após peneiramento e homogeneização demonstra que o tratamento da amostra agiu de forma positiva, diminuindo a concentração de parte dos elementos considerados traço (chegando ao ponto do elemento P não ser detectado na amostra peneirada). O aumento na concentração do ferro e outros elementos estão associados à diminuição da massa dos outros componentes do resíduo, uma vez que a fluorescência trabalha com a concentração em massa dos elementos analisados.

No caso da amostra retida na peneira, destaca-se a presença do elemento Na, normalmente presente na PAE, porém que não havia sido detectado nas duas amostras anteriores. Provavelmente esse elemento encontrava-se muito disperso na amostra oriunda da empresa, estando abaixo do limite de detecção do equipamento de fluorescência. O ato de peneirar pode ter concentrado esse elemento na amostra de material retida na peneira, uma vez que o volume da amostra retida é consideravelmente inferior.

5.2 Difração de Raios-X da amostra de PAE peneirada e homogeneizada

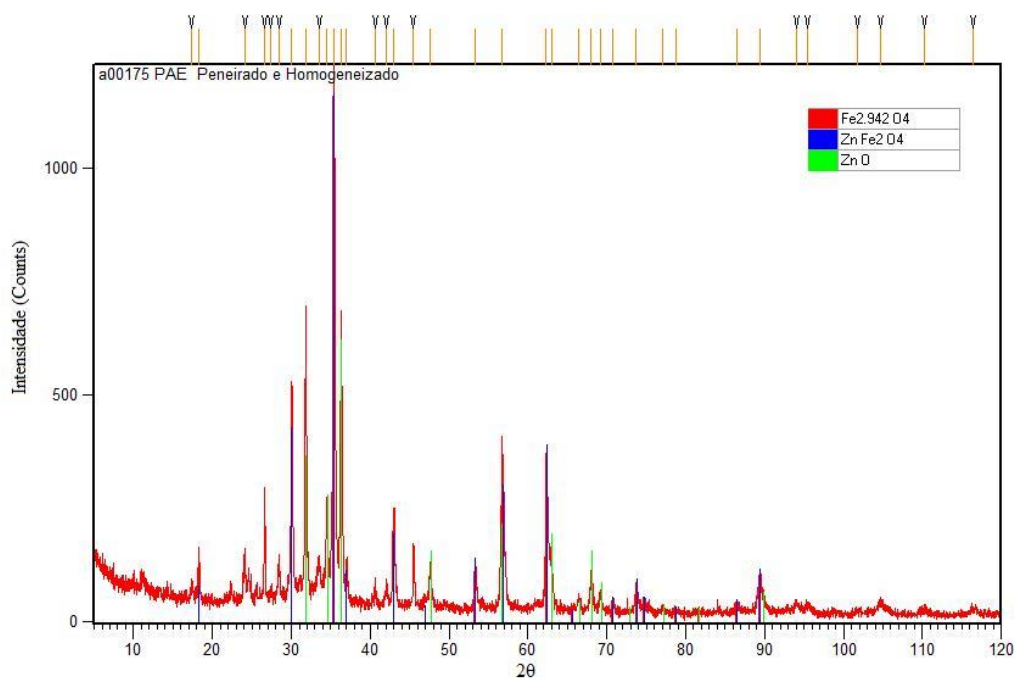
O difratograma da figura 13 apresenta o resultado da medida de difração de Raios-X para a amostra de PAE peneirada e homogeneizada, mostrado na Figura 5.

Figura 13 - Difratoograma da amostra de PAE estudada, peneirada e homogeneizada.



A Figura 14 e a Figura 15 mostram os difratogramas obtidos após a análise com o programa X'Pert High Score Plus, utilizado para a identificação de fases no PAE estudado.

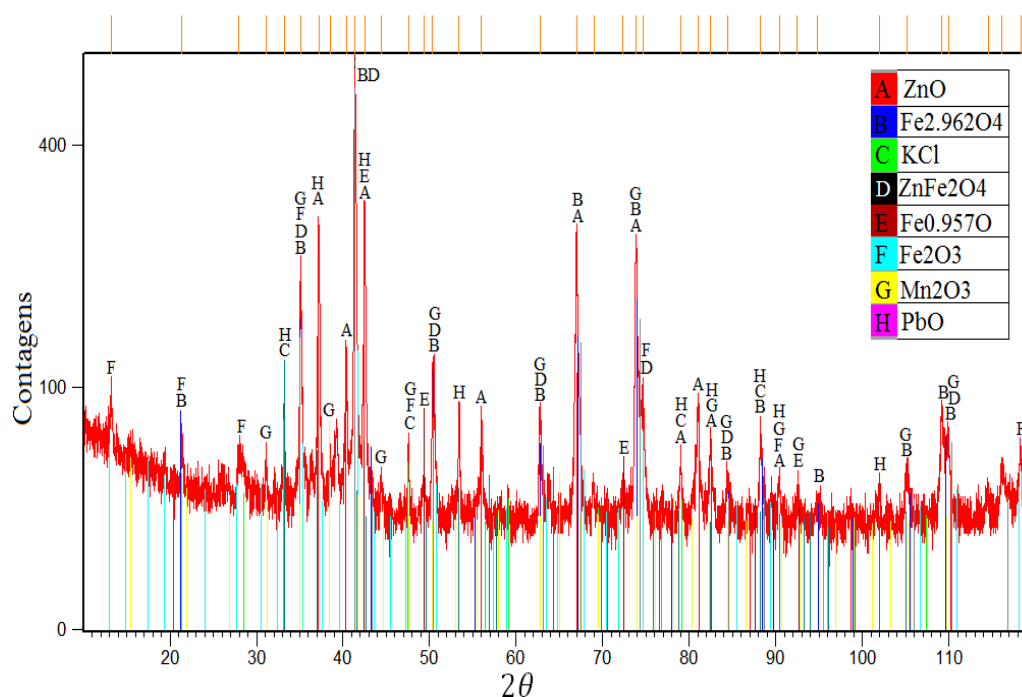
Figura 14 – Primeiro difratograma para identificação das fases ZnO, ZnFe₂O₄ e Fe₃O₄ presentes no PAE



A identificação de fases indicou que o zinco presente na amostra encontra-se distribuído, provavelmente nas fases de Zincita (ZnO) e ferrita de zinco (ZnFe_2O_4). O ferro contido encontra-se identificado nas fases de ferrita de zinco (ZnFe_2O_4) e magnetita (Fe_3O_4) em caráter não estequiométrico.

Os picos que se encontram acima de 90° correspondem às três fases identificadas neste difratograma. Entretanto, os padrões de referência utilizados para fazer a identificação das fases possuem medida de difração limitada até o ângulo 90° , o que justifica a sua não identificação. Os picos não desmarcados entre os ângulos de 17° e 46° são referentes a outras fases presentes no resíduo que não foram identificadas neste momento.

Figura 15 – Segundo difratograma do PAE analisado com identificação das fases cristalinas constituintes do PAE.



Acima, a figura representa um difratograma obtido recentemente com identificação de várias outras fases, além das já citadas anteriormente no difratograma da Figura 14 (ZnO, ZnFe_2O_4 e Fe_3O_4), onde pode-se notar a presença de mais fases cristalinas: PbO, KCl, FeO, Fe_2O_3 e Mn_2O_3 . Aliás, a identificação das fases contendo chumbo e a presença de cloretos são fundamentais para a discussão dos processos de aproveitamento, nos quais o PAE em estudo pode enquadrar-se com êxito econômico e de acordo com as exigências dos códigos e leis ambientais.

5.3 Estudo da viabilização de processos de aproveitamento do PAE baseado nos resultados obtidos da caracterização

O estudo buscou em uma série de bancos de dados e processos contendo importantes publicações – revistas internacionais, dissertações de mestrado, teses de doutorado – e, aqui, concentra as discussões levando a amostra caracterizada em consideração.

A condução do processo de maneira ineficaz pode resultar em problemas ainda maiores. Assim, o desenvolvimento de um material utilizando resíduos como matérias-primas passa pelo estudo de vários aspectos, tais como:

- i) O processo de geração do resíduo;
- ii) Composição do resíduo;
- iii) Caracterização do resíduo: composição completa (incluindo traços de espécies ambientalmente relevantes), análise microestrutural (incluindo determinação de fases mineralógicas), características físicas (densidade, granulometria e umidade);
- iv) Seleção das possíveis aplicações;
- v) Desenvolvimento do produto;
- vi) Avaliação do desempenho do produto (inclui-se a aceitação e a compatibilidade do mercado);
- vii) Avaliação de compatibilidade ambiental no processo global.

O presente estudo encontra-se na fase (iv) e em processo de desenvolvimento. Ressalta-se a impossibilidade de generalização de processos para esse resíduo, uma vez que a composição variável e a presença de espécies ambientalmente importantes (como Pb, por exemplo) podem dificultar o enquadramento do mesmo em alguma rota utilizada em outra situação.

5.3.1 Reciclagem de PAE como matéria-prima na fabricação de materiais cerâmicos argilosos (cerâmica vermelha)

O processo em questão foi adotado laboratorialmente por uma equipe da UFRGS que utilizava-se de uma amostra de uma produtora local de aços e estudado durante uma tese de doutorado [7]. Nesse trabalho, voltou-se a atenção para o Zinco e a

sua imobilização nas massas cerâmicas – a amostra em questão possuía concentração de Zinco da ordem de 13%, bem inferior ao do presente trabalho ($\approx 45\%$). Sendo um metal volátil, com ponto de vaporização da ordem de 907°C , a concentração deste resíduo pode gerar emissões atmosféricas durante a queima de formulações cerâmicas.

A obtenção de produtos de cerâmica vermelha ocorre por meio de etapas sequenciais que são apresentadas no fluxo esquemático a seguir.

Figura 16 - Fluxograma da produção de materiais cerâmicos



Após as atividades de produção de corpo-de-prova testes com formulações em peso variando de 0% (amostra base) a 30% de PAE (mistura realizada em moinho de bolas), conformação em prensas hidráulicas, secagem livre ao ar (24h), seguida por uma secagem em estufa (110°C , 24h) e a queima – sinterização a 850°C , 950°C e 1050°C em um patamar de queima de 2h, e realização de ensaios de acordo com normas técnicas e procedimentos laboratoriais para determinação das propriedades tecnológicas e observação da imobilização do zinco (emissão de voláteis).

A análise da resistência mecânica e da absorção de água, como principais propriedades tecnológicas, demonstrou efeito positivo dos aditivos de PAE, com valores obtidos adequados à norma regulamentadora da ABNT [23]. A análise da imobilização do Zinco, por meio de testes de lixiviação (NBR 10005 [22]) e de solubilização (NBR 10006 [24]), mostrou resultados dentro dos limites estabelecidos pela norma NBR 10004 [3]. Concluiu-se que o PAE adicionado à argila vermelha, de acordo com as normas brasileiras, pôde ser enquadrado como resíduo classe II A (inerte). Quanto às emissões atmosféricas, a análise durante a queima em forno mufla por uma técnica desenvolvida laboratorialmente pela equipe que conduziu a pesquisa, mostrou que os valores do ensaio encontram-se abaixo do estabelecido pelas resoluções do CONAMA, especialmente a Resolução n.316 [25].

A simplicidade e praticidade do método sugere a idéia de um processo ideal, mas os principais problemas quanto a adequação direta desse meio estudado ao PAE em questão encontram-se:

i) Nas composições distintas, fazendo com que seja necessário uma avaliação específica do PAE e da argila, além de se fazer necessário um estudo para emissões de outros metais, em especial o Pb – metal pesado com fator ambiental fundamental;

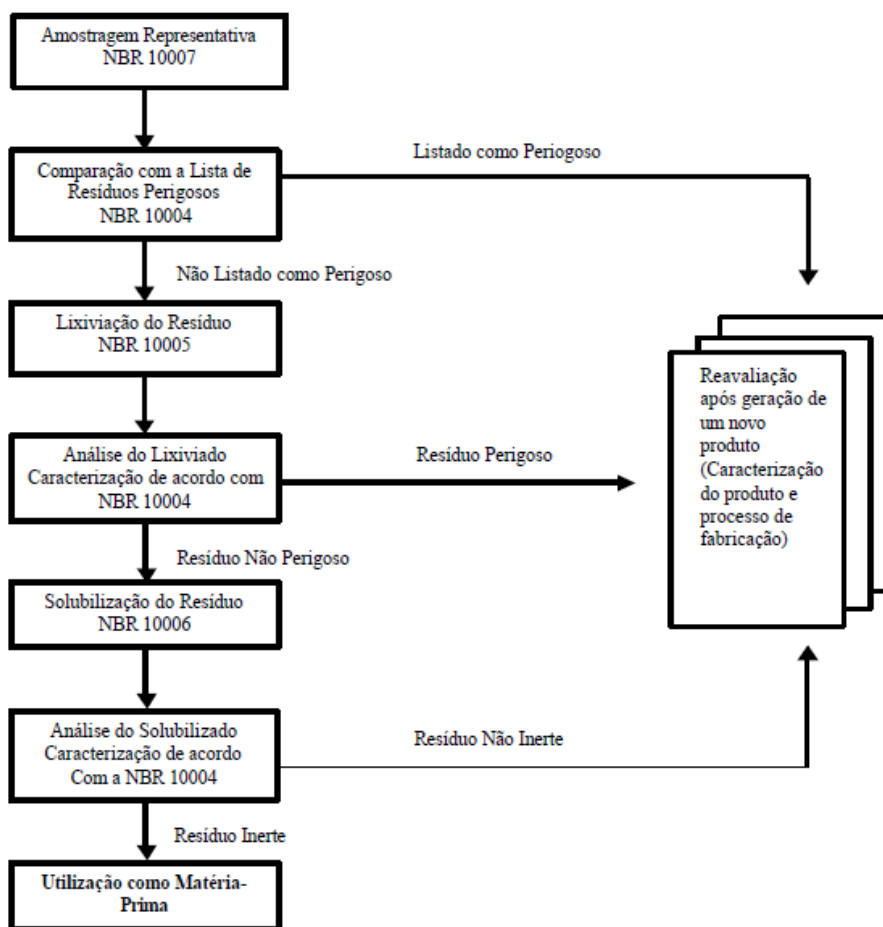
ii) No fato de as empresas produtoras necessitarem adequar-se para o armazenamento dessa matéria-prima que é um resíduo industrial perigoso, necessitando de investimentos, muitos dos quais não estão nos patamares desses produtores. Além disso, é necessário acompanhamento tecnológico das emissões atmosféricas e da imobilização dos metais que garanta que índices de acordo com a legislação ambiental nacional e regional sejam obtidos.

É importante ressaltar que a usina fornecedora do material utilizado neste estudo já adotou essa solução e esbarrou, exatamente, nas questões citadas acima no item ii).

5.3.2 Incorporação de PAE em blocos de pavimentação

Dentre as variadas possibilidades de aplicação de resíduos na construção civil, as mais frequentes são como agregado e como adição ao concreto. Comumente a lógica de adição de PAE ao concreto não é frequente no mundo, uma vez que este resíduo em países mais industrializados é submetido a processos com o objetivo de obter os metais de sua composição. A incorporação de PAE em blocos de pavimentação, a exemplo do processo anterior, foi estudada nos laboratórios da UFRGS e tema de dissertação de mestrado[20]. O processo, conduzido de maneira semelhante ao anterior, apresentou resultados positivos nas propriedades dos blocos, ainda que haja registro de aumento de tempo de pega para teores maiores que 1% de PAE. O grande problema desse método consistiu na incoerência com o padrão estabelecido pela norma NBR 10006 [24] – ensaio de solubilização – e os valores estabelecidos pela norma NBR 10004 [3], adequando o material como classe II B (não inerte), o que pode significar a não-imobilização completa do resíduos e de seus elementos mais danosos ao ambiente. A figura 17 apresenta as etapas para caracterizar a toxicidade dos materiais.

Figura 17 - Etapas da caracterização da toxicidade dos materiais de acordo com as normas brasileiras



Ambas atividades de incorporação descritas apresentam problemáticas quanto a dificuldade de generalização, uma vez da variabilidade comprovada de PAEs. Outro problema é acordar com uma empresa, que possua a licença ambiental requerida pelos órgãos reguladores, capaz de responsabilizar-se pela totalidade do resíduo.

5.3.3 Co-processamento de PAE na fabricação de clínquer

Segue a mesma linha dos processos já citados e representa um co-processamento comum às escórias na indústria siderúrgica: a fabricação de clínquer. O clínquer é a matéria-prima do cimento Portland, utilizado na construção civil. Sendo estudado em uma tese de doutorado [18] que propôs-se a determinar o efeito positivo do ZnO – zínica, principal fase encontrada no PAE – nas propriedades finais do clínquer. Destaca-se que o PAE acaba atuando como um retardador de pega do cimento, sendo proposto um modelo próprio de hidratação das pastas de cimento. Há um problema

sobre a presença de cloretos no PAE, que acaba por aumentar o gasto energético e prejudica o processo de hidratação se comparados a cimentos sem adições. Isso inclui a necessidade de um pré-processamento do PAE, com especial atenção a cloretos e metais pesados (Pb).

5.3.4 Co-processamento de PAE na fabricação de ligas ZAMAK (ZAMAC)

Nesse processo, o PAE é matéria-prima da produção de Ligas ZAMAK, denominação genérica de diversas ligas metálicas com ponto de fusão entre 385 °C e 485 °C de ligas de zinco que possuem outros três elementos metálicos principais: Alumínio, Magnésio e Cobre. O nome vem de *Zink-Aluminium-Magnesium-Kupfer* (zinco, alumínio, magnésio e cobre, em alemão, respectivamente) [26]. Esse insumo é comumente empregado na fabricação de fivelas de cintos e de calçados. Entretanto, o uso de PAE no processamento de ligas ZAMAK, ainda que seja adotado como prática, levanta dúvidas sobre sua viabilidade. Normas europeias, por exemplo, colocam como exigências uma composição com presença de Pb < 0,005% em massa, enquanto o material em estudo possui mais de 3,5% em massa de Pb. A questão do manuseio adequado de um resíduo classe I (perigoso) e a presença de metais pesados em produtos de uso doméstico são provavelmente a resposta para as incertezas relacionadas com essa prática.

Figura 18 - Fundição de Zinco: Produção de Ligas Zamak [27]



5.3.5 Retorno ao processo produtivo

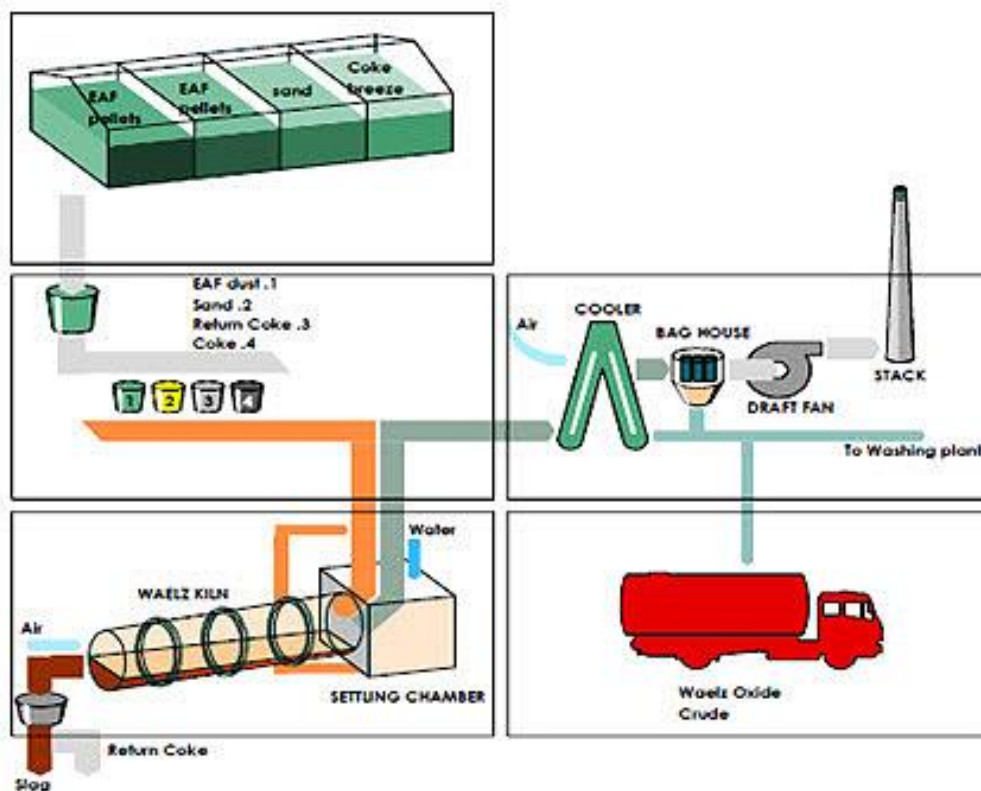
O retorno ao processo produtivo na forma de briquetes compósitos com carepa e redutores é uma técnica bastante comum para PAEs com baixos teores de Zn. Esta permite a recirculação do PAE e o acúmulo e enriquecimento do mesmo em Zinco, possibilitando sua utilização em processos de extração/obtenção do mesmo. Logo, nota-se que o acúmulo/enriquecimento também ocorrerá para outros elementos, em especial o Cl e o Pb. Esse fato último inviabiliza o processo para a amostra em estudo, tendo em consideração que os teores desses elementos são elevados, além de que o teor de Zn (principal objetivo desse processo) já é elevado e adequado a processos de aproveitamento.

5.3.6 Processo Waelz

Consagrado e com patentes prescritas, é a tecnologia mais utilizada dos processos pirometalúrgicos de recuperação de poeiras siderúrgicas, em especial do PAE [28]. Possui diversas versões comerciais que objetivam a reciclagem na cadeia produtiva do zinco. O processo pirometalúrgico em questão consiste na volatilização de metais não ferrosos (Zn, Pb, Cd etc.) a partir de uma mistura sólida de óxidos reduzidos por um agente redutor (coque, carvão vegetal, etc.) em um forno rotativo, obtendo-se óxido de zinco, precipitados de chumbo ($PbSO_4$), sais mistos de cloretos e uma escória Waelz (com conteúdo de ferro e que pode ser aplicada em cimento e em pavimentação). A planta Waelz consiste normalmente em duas, algumas vezes três, partes: (i) a preparação da matéria-prima – garantir homogeneização e estabilidade do material de alimentação; (ii) a unidade Waelz – que transforma a matéria-prima em uma escória Waelz e um óxido Waelz por meio de um forno rotativo, que é carregado com gás; (iii) e uma eventual lavagem da poeira de ZnO bruto para de-halogenização – que visa a adequação do óxido Waelz diretamente a fundições de Zinco ou usos químicos. [28]

A figura 19 apresenta um modelo simples de uma planta de processos Waelz.

Figura 19 - Planta Waelz [28]



Sendo, naturalmente, um elo estratégico entre as indústrias do aço e do zinco, o processo, que visa recuperação de ZnO, é uma rota interessante, já que o PAE em estudo possui cerca de 45% de Zn ($\approx 53\%$ ZnO, se considerado que cerca de 95% do Zn está na forma de zincita).

As problemáticas estão por conta do alto teor de cloretos, conforme análise, que demanda maior número de etapas para adequação do resíduo (etapa para de-halogenização posterior), além de possível maior consumo energético; e por conta do alto investimento necessário para montar-se uma planta para o processo. A alternativa de utilizar a planta já existente no Brasil, localizada em Juiz de Fora (MG), é inviável pela logística de transporte necessária devido à grande distância entre a fornecedora de PAE (CE) e a planta (MG).

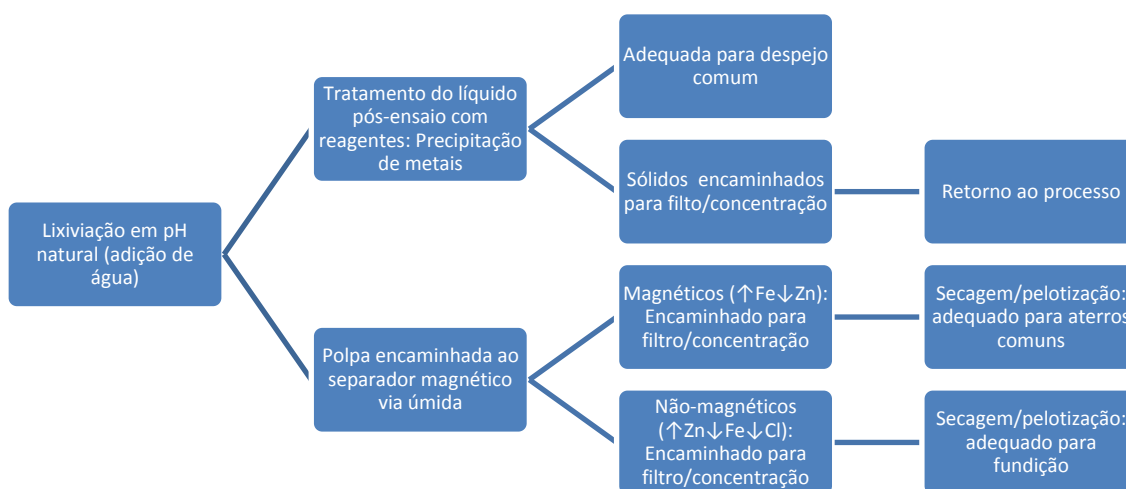
5.3.7 Processos Hidrometalúrgicos

Há uma série extensa de soluções e pHs utilizados em processos hidrometalúrgicos com o objetivo de tratar a poeira de aciaria elétrica e fazer uma lixiviação específica. O motivo do extenso uso e estudo desses processos encontram-se

na sua simplicidade de implementação em pequenas escalas e no seu baixo custo se comparado a processos pirometalúrgicos.

No presente estudo, destaca-se um processo utilizado em uma planta australiana, publicado em um periódico internacional [29]. Na publicação em questão, o processo é esquematizado conforme o fluxograma da figura 20.

Figura 20 - Fluxograma do processo hidrometalúrgico via pH natural [29]



Esse processo permite a redução de até 99,9% do teor de cloretos no resíduo e tem por objetivo obter: i) um composto com altos teores de Zn e baixos de Fe e Cl (não-magnético), adequado para tratamento em fundições Zn-Pb; ii) um composto de altos teores de Fe e baixos de Zn adequados para aterros; e iii) águas residuais tratadas para descarte em esgostos. [29]

As grandes problemáticas desse processo são comuns em todos os processos hidrometalúrgicos: a baixa granulometria do PAE e a necessidade de grandes quantidades de soluções reagentes são consideravelmente pontos negativos. A baixa granulometria pode fazer com que o material se compacte e dificulte o processo. Especificamente para o PAE em questão, a grande quantidade de cloretos impurifica rapidamente as soluções de tratamento, aumentando os gastos com a planta. O processo também gera um resíduo líquido que deve ser adequado ao descarte, o que caracteriza um problema.

6. CONCLUSÃO

Nesse trabalho, ainda em desenvolvimento, pode-se concluir que as oportunidades para aproveitamento do PAE são importantes para a sustentabilidade na indústria produtora de aço, especialmente nas que possuem aciarias elétricas. O estudo da amostra permitiu iniciar a análise dos processos existentes e ponderar informações válidas. Constata-se a inviabilidade de uma generalização dos métodos, uma vez que a composição mostrou-se função das particularidades de cada indústria (como matéria-prima, forno, tipo de aço produzido...), que nos leva a concluir que o presente estudo da amostra trará resultados específicos para PAEs na mesma faixa de composição com uma certa extrapolação. Pela análise de caracterização por Raios-X, o alto percentual de zinco é claramente detectado, assim como o percentual de ferro, de chumbo e de cloro, que nos leva a pensar no grande potencial do resíduo como fonte de zinco, bem como a necessidade de seu tratamento e beneficiamento diante da presença de metais pesados e de cloretos.

Baseado na conclusão de que o PAE em estudo é uma potencial fonte de zinco, o estudo dos processos de aproveitamento fixa-se nos que recuperam este elemento e que agregam valor ao resíduo. A primeira sugestão, obviamente, é a utilização do processo pirometalúrgico de maior sucesso para PAEs com alto teor e Zinco, o processo Waelz. O que nos leva a questionar essa possibilidade são: 1. o custo que envolve a implantação de uma planta diante de uma das menores unidades produtoras de aços longos do Brasil que é a fornecedora da amostra; 2. a logística para transportar a geração mensal dessa usina (cerca de 230t/mês) para a única unidade existente em território nacional, localizada em Minas Gerais, acarretaria em custos que desqualificariam a atividade como ideal para a empresa. Outra sugestão que parece mais compatível com a atual situação de mercado é o co-processamento dessa amostra na forma de adições em argilas vermelhas, porém é necessário estudar e garantir que há imobilização e inertização de metais pesados durante todo processo.

Diante do aparato bibliográfico, das experiências já conhecidas e do conhecimento adquirido durante a elaboração deste trabalho, conclui-se que somente a experimentação e o desenvolvimento das práticas das possibilidades poderão fornecer conclusões precisas.

7. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Para prosseguimento dos estudos realizados, sugere-se como oportunidades os seguintes trabalhos:

1. Realização de um Refino Rietveld para a difração de Raios-X obtida.
2. Estudar simulações de uma planta pirometalúrgica laboratorial de processos de recuperação de zinco, baseada na planta Waelz.
3. Analisar a emissão de metais pesados, especialmente o Pb, durante a etapa de queima do processo de fabricação de cerâmicas vermelhas com aditivo de PAE.
4. Realizar laboratorialmente ensaios de lixiviação de PAE baseado nos métodos hidrometalúrgicos descritos nesse trabalho.
5. Estudo da viabilidade económica: estudar o mercado local de zinco e dimensionar o lucro na forma de um projeto para garantir sucesso na destinação de zinco obtido.
6. Estudar e levantar mais dados sobre processos não especificados nesse trabalho.
7. Coletar outras amostras de PAE da usina siderúrgica cearense, visto que pode haver variabilidade na composição do mesmo.

8. BIBLIOGRAFIA

[1] INSTITUTO AÇO BRASIL. **Relatório de Sustentabilidade**, 2012.

Disponível em:

<http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/sustentabilidade/downloads/relatorio_sustentabilidade_2013v3.pdf>. Acesso em: 9 dez. 2013.

[2] INSTITUTO AÇO BRASIL. **Dados do Mercado**, 2012. Disponível em:

<<http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/numeros/numeros--mercado.asp>>. Acesso em: 09 dez. 2013.

[3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT:

NBR 10.004, Resíduos Sólidos: Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

[4] 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.

[5] FERREIRA, E. G.; CALAES, G. D.; AMARAL, J. A. G.; KRUGER, P.

V.. **“A industria Brasileira de Gusa de Mercado”**. CETEM/MCT, 2006

[6] **An Introduction to iron and steel processing**. Tokyo: JFE 21st Century

Foundation, 2003. Cap 2. Disponível em: < http://www.jfe-21st-cf.or.jp/chapter_2/2a_1_img.html>. Acesso em 02 dez. 2013.

[7] SILVA, M. C. da; **Reciclagem do pó de aciaria elétrica como matéria-**

prima na fabricação de materiais cerâmicos argilosos: controle das emissões atmosféricas de zinco. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

[8] MANTOVANI, M. C.; **Caracterização de poeiras geradas em forno**

elétricos a arco e seu estudo quando aglomeradas na forma de pelotas auto-redutoras. 1998. 165 p. Tese (Doutorado em Engenharia). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1998.

[9] DELHAES, C.; HAUCK, A.; NEUSCHUTZ D.; **Mechanism of dust**

generation in a stainless steelmaking converter. Steel Research, v. 64, n.1, 1993.

[10] TELLES, V. B.; “**Reciclagem da poeira de aciaria elétrica na sinterização de minério de ferro visando a eliminação de zinco**”. 2010. 91 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010

[11] GUÉZENNEC, A. G., HUBER, J. C., PATISON, F., SESSIECQ, P., BIRAT, J. P., ABLITZER, D. **Dust formation in electric arc furnace: Birth of the particles**. Powder Technology, 157, 1-3, 2-11, 2005.

[12] MMA – Ministério do Meio Ambiente, **Apresentação do Instituto Aço Brasil** <
http://www.mma.gov.br/port/conama/processos/BC1C2A2A/Pres_IABr_11GTFontesFixas.pdf> Acesso em 20 nov. 2013.

[13] STEFANOVA, A.; AROMAA, J. “**Alkaline leaching of iron and steelmaking dust**”. Finland, 2012.

[14] RIZESCU, C. Z., BACINSCHI, Z., STOIAN, E. V., POINESCU, A. A.; **Characterization of steel mill electric-arc furnace dust**. 2010, ADVANCES in WASTE MANAGEMENT, 139-144, 2010.

[15] NYIRENDA, R.L.; **The processing of steelmaking flue-dust: A review**. Mineral Engineering 4, 1991, 7-11, pp. 1003-1025.

[16] RÜTTEN, J.; **Application of the Waelz Technology on Resource Recycling of Steel Mill Dust**. ValoRes GmbH, Düsseldorf, 2006.

[17] MORAES, C. A. M.; BREHM, F.; GRAFFITTI, D.; VILELA, A. C. F.; **Estado da arte da reciclagem e reutilização de resíduos sólidos de aciaria elétrica – Uma ou várias linhas de ação?** 57º Congresso Internacional da ABM, São Paulo, 2002.

[18] BREHM, F. A.; **Adição de óxido de zinco (ZnO) em pastas de cimento visando viabilizar a reciclagem de pós de aciaria elétrica (PAE) na construção civil**. 2004. 90 p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

[19] CALLISTER, W. D. **Introdução a Ciência e Engenharia dos Materiais**. 7ª Edição. John Wiley e Sons, Inc., 2007.

[20] VARGAS, A. S. de; **Estudo da viabilidade do uso do pó de aciaria elétrica a arco na confecção de blocos de concreto para pavimentação**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

[21] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT: **NBR 10007, Amostragem de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro, 2004.

[22] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT: **NBR 10005, Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólido**. Rio de Janeiro, 2004.

[23] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS: ABNT 18810 – **Valores limites característicos de produtos cerâmicos estruturais**.

[24] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT: **NBR 10006, Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro, 2004.

[25] Resolução CONAMA n. 316, de 29 de outubro de 2002: **Dispõe sobre procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos**.

[26] **Zinc Die Casting Alloys**. Overview. Disponível em: <<http://www.eazall.com/diecastalloys.aspx>> Acesso em: 14 dez 2013.

[27] **MES – Supply Chain Management Low Cost Country Sourcing**. Precision Zinc Castings. Disponível em: < <http://mesinc.net/zinc-castings>> Acesso em: 14 dez 2013.

[28] RÜTTEN, J.; **Application of pyro-metallurgical processes on resource recycling of steel mill dust**. ValoRes GmbH, Dusseldorf. 2006.

[29] BRUCKARD, W.J.; DAVEY, K.J.; RODOPOULOS, T.; WOODCOCKA, J.T; ITALIANO, J. **Water leaching and magnetic separation for decreasing the chloride level and upgrading the zinc content of EAF steelmaking baghouse dusts.** International journal of mineral processing 75, 2005, 1 -20.