



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

ANDRÉIA KAROLLINE DE ALBUQUERQUE OLIVEIRA

**CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DO PÓ DE ACIARIA ELÉTRICA
PARA INCORPORAÇÃO EM MATERIAIS CERÂMICOS COM APLICAÇÃO NA
CONSTRUÇÃO CIVIL**

Recife-PE

2022

ANDRÉIA KAROLLINE DE ALBUQUERQUE OLIVEIRA

**CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DO PÓ DE ACIARIA ELÉTRICA
PARA INCORPORAÇÃO EM MATERIAIS CERÂMICOS COM APLICAÇÃO NA
CONSTRUÇÃO CIVIL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador (a): Prof^o. Dr. Kleber Gonçalves Bezerra Alves

Recife-PE

2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Oliveira, Andréia Karolline de Albuquerque.

Caracterização microestrutural do pó de aciaria elétrica para incorporação em materiais cerâmicos com aplicação na construção civil / Andréia Karolline de Albuquerque Oliveira. - Recife, 2022.

48

Orientador(a): Kleber Gonçalves Bezerra Alves

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, , 2022.

1. Construção civil. 2. Materiais cerâmicos. 3. Pó de aciaria elétrica. 4. Resíduos industriais. I. Alves, Kleber Gonçalves Bezerra. (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

ANDRÉIA KAROLLINE DE ALBUQUERQUE OLIVEIRA

CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DO PÓ DE ACIARIA ELÉTRICA PARA
INCORPORAÇÃO EM MATERIAIS CERÂMICOS COM APLICAÇÃO NA
CONSTRUÇÃO CIVIL

Trabalho de Conclusão apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia de
Materiais da Universidade Federal de
Pernambuco, como requisito parcial para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia de Materiais.

Aprovado em: 04/11/2022.

BANCA EXAMINADORA

Profº. Dr. Kleber Gonçalves Bezerra Alves (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Profª. Dr. Patricia Maria Alves de Melo
Faculdade Unyleya/ Faculdade de Santa Catarina

Profº Dr. Ricardo Henrique de Lira Silva
Instituto Federal de Pernambuco

Dedico este trabalho à minha família, que investiu todos os recursos na construção da minha formação, e sempre me incentivou e acreditou em mim e nos meus sonhos. Essa conquista é da nossa família.

AGRADECIMENTOS

Eu não poderia começar os meus agradecimentos de forma diferente. Gratidão à Deus por ter cuidado de tudo nos mínimos detalhes. Por inúmeras vezes não ter me deixado desistir, por me manter forte e corajosa para todos os desafios, por seu amor e cuidado incondicional.

Aos meus pais, Luciano e Zoely, todo meu amor, meu respeito e minha eterna gratidão por tudo, por sempre, pela nossa família, pelo apoio incondicional, por acreditar tanto em mim, pelas incansáveis orações e renúncias.

À minha irmã, Ana Beatriz, por todo amor, pela parceria e pelo incentivo, que mesmo longe fisicamente estava sempre presente.

Aos meus amigos de graduação, que tornaram essa caminhada um pouco mais leve. Obrigada pelas madrugadas de estudos, pelos desesperos pré-prova da Área II, pelas cervejas e as tardes de dominó no CTG. Vocês estarão presentes em minhas memórias afetivas.

À todos os mestres que tive a sorte de cruzar nesse caminho da graduação, que além de educadores, se tornaram amigos e incentivadores. Um carinho e agradecimento especial à professora Magda, professora Dayane e professor Edval, por todo cuidado, preocupação, incentivo e acolhimento. Vocês são exemplos na educação.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Kleber, que aceitou me orientar nessa reta final e não menos importante do curso. Obrigada pela troca, pelo conhecimento e por todo carinho nessa trajetória.

À todas as pessoas presentes na minha vida que estavam sempre na torcida, e que não viam a hora desse momento chegar junto comigo.

À todas as pessoas que torceram e contribuíram direta e indiretamente na realização desse trabalho, muito obrigada!

RESUMO

Durante o processo de produção do aço por forno elétrico a arco (FEA), são gerados alguns resíduos, como o pó de aciaria elétrica (PAE). Esse pó é classificado como um resíduo sólido perigoso classe I, devido a sua composição, com um alto teor de zinco, chumbo e outros óxidos metálicos. As propriedades do pó variam de acordo com o tipo de sucata utilizada, condições do forno elétrico a arco e aditivos utilizados para a fabricação de ligas. O PAE utilizado no presente trabalho é proveniente de uma indústria siderúrgica localizada na cidade do Recife. O pó foi caracterizado através das técnicas de análise granulométrica por peneiramento, difratometria de raios-X, microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectrometria de energia dispersiva de raios-X (EDS). Avaliou-se a viabilidade da inserção do PAE no processo de produção de outros materiais, em específico os cerâmicos aplicados à construção civil, como tijolos cerâmicos, telhas, concreto, argamassas e asfalto. De acordo com os resultados encontrados, o pó se apresenta de forma predominante com morfologia esférica, com uma granulometria abaixo de 20 μ m, sendo composto por diversos elementos aparecendo de forma majoritária o ferro e o zinco. A adição de PAE à matriz cerâmica resulta em redução de porosidade através do preenchimento dos espaços vazios no material, estabilização dos metais pesados presente no pó, melhoria nas propriedades mecânicas e redução no impacto ambiental causado pelo descarte indevido do rejeito.

Palavras chaves: construção civil, materiais cerâmicos, pó de aciaria elétrica, resíduos industriais

ABSTRACT

During the steel production process by electric arc furnace (EAF), some residues are generated, such as electric melt shop dust (PAE). This dust is classified as a hazardous solid waste class I, due to its composition, with a high content of zinc, lead and other metallic oxides. Powder properties vary according to the type of scrap used, electric arc furnace conditions and additives used for alloy manufacturing. The PAE used in the present work comes from a steel industry located in the city of Recife. The powder was characterized through the techniques of granulometric analysis by sieving, X-ray diffraction, scanning electron microscopy and energy dispersive X-ray spectrometry (EDS). The feasibility of inserting PAE in the production process of other materials was evaluated, specifically ceramics used in civil construction, such as ceramic bricks, roof tiles, concrete, mortar and asphalt. According to the results found, the powder predominantly presents a spherical morphology, with a granulometry below 20 μ m, being composed of several elements, mostly iron and zinc. The addition of PAE to the ceramic matrix results in reduced porosity by filling empty spaces in the material, stabilizing heavy metals present in the powder, improving mechanical properties and reducing the environmental impact caused by improper disposal of waste.

Keywords: civil construction, ceramic materials, electric arc furnace dust, industrial waste

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma simplificado dos principais processos siderúrgicos.....	16
Figura 2 - Arranjo de Forno Elétrico a Arco.	18
Figura 3 - Esquema de formação do PAE.....	23
Figura 4 - Principais áreas de estudos com pó de aciaria.....	26
Figura 5 - Aspecto visual do pó de aciaria elétrica.....	30
Figura 6 - Pesagem da amostra do pó de aciaria.....	31
Figura 7 - Sequência de peneiras em peneirador vibratório.....	32
Figura 8 - Microscópio Eletrônico de Varredura.....	34
Figura 9 - Espectômetro por energia dispersiva.....	34
Figura 10 - Imagens de MEV da amostra 1 de PAE.....	36
Figura 11 - Imagens de MEV da amostra 2 de PAE.....	37
Figura 12 - Imagens de MEV da amostra 3.1 de PAE.....	37
Figura 13 - Imagens de MEV da amostra 3.2 de PAE.....	38
Figura 14 - Imagens de MEV da amostra 4 de PAE.....	38
Figura 15 - Microrregiões analisadas no EDS.....	40
Figura 16 - Difractogramas obtidos para as amostras de PAE.....	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Fases e elementos do PAE	21
Tabela 2 - Composição química do pó de aciaria elétrica em vários países.....	22
Tabela 3 - Características do pó de aciaria elétrica.....	24
Tabela 4 - Tabela de amostras para análises.....	33
Tabela 5 - Análise granulométrica por peneiramento	35
Tabela 6 - Resultado da análise de EDS por microrregião	39

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
DRX	Difração de raio-X
EDS	Espectrometria de energia dispersiva de raio-X
FEA	Forno Elétrico a Arco
INTM	Instituto Nacional de Tecnologia em União e Revestimento de Materiais
JCPDS	Joint Committee on Powder Diffraction Standards
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
PAE	Pó de Aciaria Elétrica

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1.	OBJETIVOS	14
1.1.1.	Objetivo geral	14
1.1.2.	Objetivos específicos	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1.	PROCESSO DE PRODUÇÃO DO AÇO.....	16
2.2.	ACIARIA ELÉTRICA	17
2.2.1.	Forno Elétrico a Arco (FEA)	17
2.3.	PÓ DE ACIARIA ELÉTRICA (PAE).....	20
2.4.	FORMAÇÃO DO PÓ DE ACIARIA ELÉTRICA	22
2.5.	PROPRIEDADES DO PAE	24
2.6.	ESTUDOS REALIZADOS COM PÓ DE ACIARIA	25
2.7.	MATERIAIS CERÂMICOS	27
2.8.	REUTILIZAÇÃO DO PÓ DE ACIARIA ELÉTRICA NA CONSTRUÇÃO	28
3	METODOLOGIA	30
3.1.	MATERIAIS	30
3.2.	MÉTODOS.....	31
3.2.1.	Análise granulométrica por peneiramento	31
3.2.2.	Microscopia eletrônica de varredura (MEV) Espectroscopia de energia dispersiva de raios-x (EDS)	33
3.2.3.	Difração de raios X (DRX)	34
4	RESULTADO E DISCUSSÃO	35
4.1.	ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR PERNEIRAMENTO.....	35
4.2.	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV) E ESPECTROSCOPIA DE ENERGIA DISPERSIVA DE RAIOS-X (EDS).....	35
4.3.	DIFRAÇÃO DE RAIOS X	41
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	43
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	44
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45

1 INTRODUÇÃO

Um dos indicadores utilizados para a avaliação do grau de industrialização de um país é seu consumo de aço *per capita*. A indústria do aço está ligada diretamente à história de desenvolvimento do Brasil. De acordo com o Instituto Aço Brasil, atualmente o Brasil possui o maior parque industrial de aço da América do Sul, sendo o maior produtor da América Latina e ocupando a nona posição no ranking de maiores produtores de aço no mundo (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2022).

Devido a sua alta durabilidade, versatilidade e reciclabilidade o aço é um elemento fundamental para o funcionamento da economia por meio do encadeamento de diversas cadeias produtivas, e possui uma ampla gama de aplicações como máquinas, equipamentos, utensílios domésticos, meios de comunicação, meios de transportes e principalmente na construção civil (RAMOS, 2013).

No ano de 2020 o mundo foi impactado fortemente pela pandemia da COVID-19, trazendo muitas incertezas e momentos de baixa no mercado, não só do aço, mas para toda a indústria. Mesmo diante desse cenário de crise, no ano de 2021, a produção de aço bruto cresceu 14,8%, totalizando uma produção de 36,1 milhões de toneladas. Quando o cenário internacional é analisado, o Brasil foi responsável por 1,8% da produção mundial, se mantendo na 9ª posição do ranking mundial de produtores de aço. (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2022).

Devido à recuperação dos setores consumidores mais afetados pela pandemia, com o aumento da produção e conseqüente aumento na geração de resíduos durante o processo produtivo, as indústrias do aço vêm permanentemente buscando alternativas para a construção de um processo sustentável e a otimização do consumo de matéria prima e insumos, com a finalidade de reduzir os impactos ambientais ocasionados por esses resíduos. É importante ressaltar que além de movimentar a economia, uma das grandes vantagens do aço é que ele é o material mais reciclável do mundo, conseguindo retornar a cadeia produtiva como matéria-prima, sem perder qualidade, e ainda ser reutilizado na fabricação de outros produtos.

No entanto, estima-se a geração de 2 a 4 toneladas de resíduos para cada tonelada de aço produzido, que podem ser gerados na forma de lamas, pós e escórias (DAS, et al.,2007; Elizeth, 2019). Os resíduos sólidos gerados por esses processos têm recebido cada vez mais atenção, devido a sua periculosidade ao ser humano e ao meio ambiente. O descarte puro desses resíduos vem se tornando uma prática

pouco aplicável no setor industrial, devido ao grande volume produzido e também pelas rígidas leis ambientais.

Dessa forma, os subprodutos oriundos dessas atividades industriais se tornaram objeto de estudo e pesquisa, com o a finalidade de viabilizar a reutilização dos mesmos em processos externos e/ou internos, trazendo como benefício a redução da demanda de matéria prima e redução de custo no processo produtivo do aço.

Uma das alternativas de aplicação do pó de aciaria elétrica é como reforço em matriz cerâmica para o desenvolvimento de materiais compósitos, a fim de produzir elementos cerâmicos empregados na construção civil, beneficiando-se da sua alta resistência ao impacto. Um exemplo disso é a análise dinâmica de fluência de pó de forno elétrico a arco – Modificado asfalto, constatando que com a mistura houve um aumento do módulo de resistência e rigidez de fluência e diminuição da microdeformação acumulada na maioria das operações em condições diferentes de temperatura e frequência (ALSHEYAB, KHEDAYWI, 2017).

Diante do exposto, o presente estudo busca analisar e viabilizar a utilização do pó de aciaria elétrica (PAE) como reforço no processo de fabricação de materiais cerâmicos através da caracterização do PAE e sugestão de frações ótimas do pó na composição de compósitos, possibilitando a obtenção de um material com propriedades diferenciadas às já apresentadas, reduzir o impacto ambiental que esses resíduos provocam e uma conseqüente diminuição no custo da cadeia produtiva.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo geral

O objetivo do presente trabalho é avaliar a incorporação do pó de aciaria elétrica para produção de materiais cerâmicos tradicionais.

1.1.2. Objetivos específicos

- Caracterizar as propriedades do pó de aciaria elétrica, através das técnicas de distribuição de tamanho de partícula, Microscopia eletrônica de varredura e Espectroscopia de energia dispersiva de raios-x.
- Avaliar as fases presentes no resíduo estudado, através da técnica de DRX.

- Sugerir o percentual em peso do pó de aciaria para uso no desenvolvimento e formulação de materiais cerâmicos;
- Expor alternativas de reutilização do PAE, que podem trazer uma redução de impactos ambientais oriundos do descarte do resíduo na produção de novos materiais.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. PROCESSO DE PRODUÇÃO DO AÇO

A indústria siderúrgica é considerada o principal segmento da metalurgia, que trata da fabricação e tratamento de aços e ferros fundidos. O processo de fabricação pode ser dividido basicamente em três etapas básicas: Redução, Refino e Conformação Mecânica, como mostrado na figura 1. No primeiro momento do processo, ocorre a transformação do minério de ferro em ferro metálico (gusa ou esponja). O refino é a etapa que se obtém o aço propriamente dito, onde se retira as impurezas e reduz o teor de carbono. E por fim, a conformação mecânica que o transforma em produtos finais (CARVALHO, MESQUITA, ARAÚJO, 2015).

Esse tipo de indústria utiliza como insumo o minério de ferro, o carvão, a sucata e a energia elétrica, e pode ser classificada quanto ao fator de integração, como: integrada, semi-integrada (mini-mills) ou não-integradas. A grande diferença entre elas está na quantidade de etapas executadas até a produção do aço. As integradas contemplam as três etapas básicas: redução, refino e conformação mecânica. As semi-integradas, por sua vez, atuam apenas nas etapas de refino e laminação. E as não integradas contemplam apenas uma das etapas do processo de produção, como redução ou conformação (SCHEID, 2010).

Na Figura 1 pode ser observado o esquema das etapas da produção de aço de forma simplificada, que serão detalhadas nas seções seguintes.

Figura 1 - Fluxograma simplificado dos principais processos siderúrgicos.



Fonte: A autora.

Após todo o preparo das matérias primas, elas são transportadas e carregadas no alto forno. O oxigênio que foi aquecido a uma temperatura média de 1000 °C é inserido no alto forno, através do sopro realizado pela sua parte inferior.

A fundição da carga metálica se dá devido ao calor gerado pelo contato entre o oxigênio e o carvão, dando início ao processo de redução, que transforma o minério de ferro em um metal líquido, o chamado ferro gusa. O ferro gusa é uma junção de liga de ferro e um elevado teor de carbono (SHEID, 2010).

É na etapa de refino onde se processa a produção de aço em aciarias e a solidificação. Acontece a transformação do ferro gusa líquido em aço líquido, por meio de reações químicas endotérmicas, onde são ajustados o teor de carbono e outras impurezas, para que sejam alcançadas as propriedades desejadas. Seguindo para o processo de solidificação, sendo o lingotamento contínuo o mais utilizado.

Após a etapa de conformação, os produtos finais são distribuídos nas classes de semi-acabados, não planos, planos, longos e revestidos. Dentre os processos de conformação mecânica, a laminação é o mais utilizado, e consiste na passagem dos materiais semi-acabados por equipamentos chamados laminadores. Dessa forma são transformados numa grande variedade de produtos siderúrgicos acabados, que vão variar de acordo com sua forma, aplicação e composição química.

2.2. ACIARIA ELÉTRICA

A aciaria é o setor onde acontece a conversão do ferro primário em aço líquido. Trata-se do refino secundário ou metalurgia de panela, que é utilizado quando existe a necessidade de obter propriedades mais nobres.

Existem três principais processos de produção de aço líquido, que se distinguem pelos diferentes fornos que são usados no processo de refino, e são eles: o conversor a oxigênio (LD/BOF), o forno elétrico a arco (FEA) e o forno Siemes-Martin (OH – Open Heart) (CARVALHO, MESQUITA E ARAÚJO, 2015).

2.2.1. Forno Elétrico a Arco (FEA)

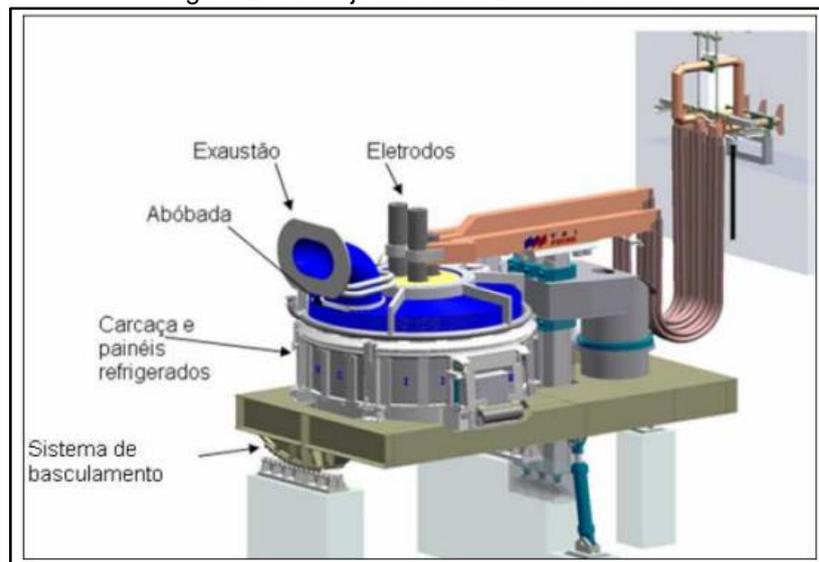
Desde o século XIX que o FEA vem sendo utilizado, primeiro por Paul Heroult, a fim de agregar valor ao processo de produção do aço, e se tornou o ponto principal

de uma aciaria elétrica. No princípio, esse equipamento era empregado na produção de aços especiais, em que era necessário altas temperaturas, fusão de ferro-ligas e tempos de refino elevados (RAMOS, 2019).

O Forno Elétrico a Arco (FEA) é um reator metalúrgico, que utiliza a eletricidade como fonte de energia e tem habilidade de transformar sucata de aço e de ferro primário em aço de alta qualidade.

Este equipamento tem uma estrutura básica composta por alguns elementos fundamentais, como a carcaça metálica, abóbada, painéis refrigeradores e material refratário, como ilustrado na figura 2. Para os fornos de corrente alternada, são utilizados também eletrodos de grafita, a fim de conduzir corrente elétrica para promover a fusão da carga (ROSSI, 2014).

Figura 2 - Arranjo de Forno Elétrico a Arco.



Fonte: Curso de Aciaria Elétrica ABM, 2007.

A produção de aço por FEA vem sendo bastante adotada em todo o mundo, devido a eficiência e a grande demanda pela reciclagem do aço e diminuição dos impactos ambientais. Para esse tipo de forno pode ser utilizado uma grande quantidade de sucata (podendo ser até 100%), que normalmente iria para descarte. Também pela facilidade de controle de temperatura, aços de alta liga e pela flexibilização operacional (NAIR *et al.*, 2022).

A fabricação por meio de arco elétrico tem início quando se estabelece um contato do eletrodo de grafite e a carga metálica, chegando a temperaturas extremamente altas a ponto de fundir o aço. Também podem receber energia através

de lanças de oxigênio, queimadores a gás e injetores de carbono. O carregamento do forno é realizado através da abertura da abóbada (SHEID, 2010).

Após esse processo de fusão podem ser adicionados ou não os elementos de liga, que tem a função de ajustar quimicamente o novo aço a ser fabricado, de acordo com as especificações desejadas e as suas aplicações. A partir daí acontece o refino primário do aço por meio de injeção de oxigênio, onde são removidos os elementos indesejados que estavam presentes na sucata, e conseqüentemente vão para escória.

Através da injeção de carbono, é realizada a desoxidação do banho e a espumação da escória, que é retirada do processo pela porta de escória. Dessa forma é possível controlar a composição química do aço que está no estado líquido. Ao final do refino, o aço segue para as etapas de refino secundário, lingotamento, reaquecimento e laminação.

Para a produção de aço por aciaria elétrica, além do forno elétrico a arco ela é composta de pátio de sucata, forno panela e o lingotamento contínuo (RAMOS, 2019).

2.2.1.1 Tipos de Forno Elétrico a Arco

O fenômeno do arco elétrico, também conhecido como arco voltaico, é caracterizado pela passagem de corrente entre os eletrodos, superior a resistência do ar, que geralmente é o meio ionizado, e age como meio condutor para a corrente elétrica (MAMEDE, 2007).

Esses fornos a arcos elétricos podem ser classificados de acordo com o arco utilizado e podem ser arco direto, arco indireto e arco submerso.

- **Forno elétrico a arco direto:** utiliza o calor desenvolvido pela descarga elétrica em forma de arco entre dois pontos, ou seja, os eletrodos e o metal. Esse tipo de arco é gerado a partir da passagem de corrente elétrica através do ar que separa os pontos entre os quais o arco é formado.
- **Forno elétrico a arco indireto:** é formado entre os eletrodos e o calor irradiado para a carga. É um forno monofásico, e tem sido pouco utilizado devido ao alto custo dos eletrodos.
- **Forno elétrico a arco submerso:** utiliza um conjunto de processos, entre eles a energia elétrica e um agente redutor, a fim de promover a fusão redutora de minérios. O arranjo mais comum desses fornos consiste em um banho circular ou retangular com três eletrodos verticais em triângulo.

2.3. PÓ DE ACIARIA ELÉTRICA (PAE)

Durante o processo de produção de aço realizado em fornos elétricos a arco, a partir do ferro gusa líquido e de sucatas, são gerados alguns resíduos, denominados de pó de aciaria elétrica (PAE), escória e carepa.

É de extrema importância conhecer e entender as propriedades químicas e físicas do PAE para poder avaliar a possível reutilização do mesmo. O pó de aciaria elétrica é um pó extremamente fino proveniente de uma série de transformações que envolve volatilização de alguns metais não ferrosos como Pb, Zn e Cd, emissão de gotas de aço líquido e de escória que é originada pela expansão de monóxido de carbono; envolve também o arraste de partículas dos materiais adicionados aos fornos e a atomização. O pó é retido no sistema de despoejamento das indústrias de aço, coletado por meio de dutos aspiradores e a cada tonelada de aço produzida retém-se de 15 a 20 kg de pó de aciaria (Nikolić *et al.*, 2020; Skaf *et al.*, 2017).

É composto basicamente por ferro, zinco, níquel, chumbo, cádmio, cromo (MANTOVANI, TAKANO E BUCHLER, 2004) e se apresenta nas fases franklinita ($ZnFe_2O_4$), magnetita (Fe_3O_4) e zincita (ZnO).

De acordo com a NBR 10004, o pó de aciaria é classificado como um resíduo sólido perigoso, Classe I (não inerte) (ABNT, 2004), devido a sua potencialidade de contaminar o meio ambiente e causar risco à saúde pública. Dessa forma, esse tipo de escória é uma preocupação para os órgãos ambientais, que por sua vez exigem deposição adequada em aterros de resíduos industriais perigosos, e também para as indústrias, porque acarretam em um alto custo de manuseio. Assim uma das alternativas de gerenciamento desse resíduo, é considerar a possibilidade de reutilização do mesmo no processo produtivo do aço ou até mesmo na incorporação em outros tipos de materiais. Uma grande aposta é a estabilização química, ou vitrificação, que se caracteriza na produção de materiais compósitos cerâmicos para a construção civil.

A composição dos pós gerados varia de acordo com alguns aspectos que devem ser considerados como, tipo de forno, o ciclo operacional do aço, o tipo do aço produzido e, principalmente, a natureza e a quantidade de sucata e adições que são utilizadas como carga no forno (SILVA, 2006).

O zinco é geralmente o elemento predominante na composição do pó de aciaria elétrica, encontrando-se numa faixa entre 4% a 50% na composição do pó, e é

classificado de acordo com o seu percentual. Quando o percentual desse elemento está abaixo de 4% em peso, ele é considerado um pó com baixo teor de zinco. Quando está na faixa de 5% a 20%, é classificado como médio teor de zinco, e acima dos 20% é categorizado como alto teor de zinco (LIN *et al.*, 2017).

NYIRENDA (1991) relatou a partir do estudo em diferentes países, as fases e elementos presentes no PAE, mais de 90% do pó é formado por óxidos como mostra o Quadro 1 as suas fases e elementos e na Tabela 1 a composição predominante em diferentes países.

Tabela 1 - Fases e elementos do PAE

Elementos	Fase	Como podem ser encontrados
Fe	Fe_3O_4	Cátions de Fe_{2+} , substituídos por Zn, Mg, Cu, Mn, outros.
Zn	50-80% como zinicita (ZnO). Associado ao Fe e em forma de espinélio ($ZnFe_2O_4$).	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	$PbSO_4$ e $PbCl_2$
Cr, Ni	Substituição de Fe na Fe_3O_4	Cr_2O_3
Ca	CaO e $CaCO_3$	Fluoreto, ferrita ou silicato
Cl, Na, F, K	Presentes como sais ou cloretos	-

Fonte: Adaptado de Nyirenda, 1991

Tabela 2 - Composição química do pó de aciaria elétrica em vários países

Oxides	Composition (%)										
	Al-Negheimish et al., (2021)	Lozano-Lunar et al., (2020)	Silva et al., (2019)	Loaiza et al., (2017)	Alizadeh and Momeni, (2016)	Alsheyab and Khedaywi, (2016)	Vieira et al., (2013)	Stathopoulos et al., (2013)	Ye et al., (2021)	Sodhi et al., (2021)	Laforest and Duchesne, (2006)
	Saudi Arabia	Spain	Brazil	Colombia	Iran	Jordan	Argentina	Greece	China	India	Canada
ZnO	15.1	34.22	26.24	50.4	9.7	18.7	12.73	28.74	4.69	32.87	6.47
SiO ₂	3.79	2.77	3.1	2.12	5.3	6.2	4.4	4.69	3.02	3.65	5.76
Al ₂ O ₃	0.81	0.98	0.61	0.77		1.52		1.85	1.27	0.36	0.74
Fe ₂ O ₃	41.56	31.83	44.6	21.54	48.5	39.3	51.00	11.88	51.5	44.54	39.56
CaO	13.01	3.06	3.62	1.2	12.2	8.96	4.61	9.54	8.96	1.79	6.59
MgO	6.64	1.74	1.95	2.55	2.0	3.22	5.04	1.9	2.48	0.57	
SO ₃	1.47	2.31	1.01	1.9	0.9	2.5			0.47	1.05	
Na ₂ O	8.56	2.7	7.82	3.38	4.3	3.87		3.78			1.01
K ₂ O	3.5	2.05	1.98	1.321	2.8	0.25	3.07	2.74		1.32	0.48
P ₂ O ₅	0.27	0.21	0.2	0.172		0.35				0.25	0.04
TiO ₂	0.1	0.07	0.1	0.035		0.34					0.16
V ₂ O ₅	0.07			0.006							
Cr ₂ O ₃	0.1	0.52	0.17	0.26				0.22	0.006		15.93
MnO	1.37	2.62	1.48		2.5	0.2		1.37	0.12		5.88
Mn ₃ O ₄				2.43							
PbO	0.63	2.32	1.4	0.025				6.04	0.008		
CdO		0.04									
F	0.34	0.45						0.08			
Cl	2.48	11.87	5.01		1.5	5.27		4.9			

Fonte: Abhilash et al., 2022

Diante da evolução dos estudos para o tratamento do pó de aciaria, tanto em aspectos laboratoriais quanto em fase de teste na indústria, foi necessário criar rotas de processos de tratamento e dividi-los em categorias: processo hidro metalúrgico, processo pirometalúrgico e estabilização química (BAKKAR, 2014).

- Processo hidrometalúrgico: se caracteriza pela extração de metais através da utilização de soluções ácidas, alcalinas e neutras que atuam como agentes lixivantes do pó. Não é um processo comercial devido aos problemas quanto ao manuseio da solução.
- Processo pirometalúrgico: esse tipo de processo também é conhecido como processo Waelz, que consiste na recuperação de zinco e outros metais de resíduos metalúrgicos, como o PEA.
- Estabilização química: acontece a partir da estabilização dos metais pesados que compõe o PAE, principalmente Pb e Cd, com a finalidade de produzir outros materiais que atenda as exigências relativas ao seu descarte.

2.4. FORMAÇÃO DO PÓ DE ACIARIA ELÉTRICA

É possível explicar a formação do pó de aciaria elétrica através de alguns mecanismos, são eles: vaporização de metais voláteis, vaporização do ferro abaixo

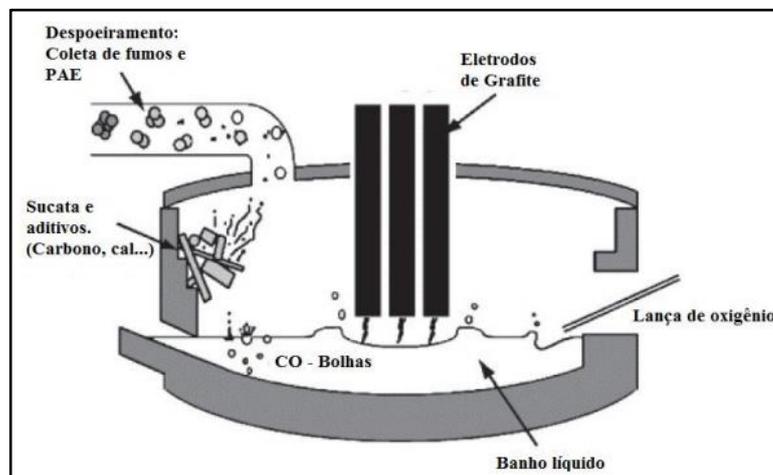
do arco, expansão de bolhas de monóxido de carbono que conseqüentemente ejetam pequenas bolhas de metais, arraste de materiais adicionados ao forno e atomização (BREHM, 2004).

A formação do pó se dá pelo mecanismo de ejeção, ficando atrás em termos de importância a vaporização. O processo de formação propriamente dito é dividido em cinco etapas principais e são ilustrados na figura 3.

- **Carregamento do forno:** onde a sucata e os demais aditivos são inseridos no forno por meio de cestões, podendo ser feito de 2 a 5 vezes.
- **Fusão da sucata:** etapa que ocorre a volatilização dos metais, devido a fusão da sucata e formação de banho líquido de aço, em função das altas temperaturas geradas pelos arcos elétricos.
- **Refino:** nessa etapa acontece a injeção de oxigênio, a fim de provocar a reação de descarburização, e então ocorre a formação das bolhas de monóxido de carbono.
- **Escória espumante:** as bolhas de monóxido de carbono (CO) formam uma espuma, após atravessar a escória. Durante essa etapa ainda recebem adição de carbono através de pó de carvão.
- **Vazamento:** após todos os processos e verificação da composição, ocorre o vazamento do aço líquido.

Para a retenção do pó gerado durante as etapas descritas acima, é utilizado um equipamento de despoeiramento que recolhe os pós e fumos, que em seguida são retidos em filtros cilíndricos do tipo manga.

Figura 3 - Esquema de formação do PAE



Fonte: GUÉZENNEC *et al.*, 2005

2.5. PROPRIEDADES DO PAE

O PAE possui algumas características que são bastante expressivas, dentre todas podemos citar a granulometria da partícula, densidade, umidade e área superficial.

Segundo estudo realizado (VARGAS *et al.*, 2004) com amostras de pó de aciaria, foi encontrado uma massa específica de 4,44 kg/dm³. E utilizando a granulometria a laser, foi obtido um valor médio de diâmetro de 0,83µm, e uma indicação de 90% das partículas apresentam granulometria abaixo de 3,60µm.

No que se refere a densidade, o pó de aciaria é considerado de baixa densidade, apresentando uma densidade numa faixa de valores que está entre 3,50g/cm³ e 4,74g/cm³, o que faz ele ser bastante volumoso (SILVA, 2006).

Outros estudiosos apontaram valores ainda menores para densidade, ficando entre 2,96g/cm³ e 3,76g/cm³, e valores para área superficial entre 0,59m²/g e 5,09m²/g.

Tabela 3 - Características do pó de aciaria elétrica.

Propriedades	Intervalos encontrados	Desvantagens
Granulometria	Maioria das partículas são menores que 10 µm, onde a aglomeração de partículas ocorre em grande extensão.	Dificuldade de segregação do sólido/líquido após a lixiviação.
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 do aço sem aglomeração prévia ou técnicas de injeção.
Área superficial específica	0,40 m ² /g – 5,60 m ² /g, medida pelo método BET.	Quando submetido a processos hidrometalúrgicos necessita de grande quantidade de reagente, devido à área superficial alta.
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.	Dificuldade de retirada dos depósitos devido a sua umidade.

Fonte: Adaptado de Nyirenda, 1991

Uma das propriedades mais importantes de amostras de particulados é o tamanho da partícula. Essa distribuição é caracterizada como uma porcentagem do número de partículas que varia dentro de uma faixa de tamanho específico, quando

comparado com a quantidade total das partículas (ACIL WEBER, 2020). De acordo com as propriedades observadas, pode-se citar como característica positiva a baixa granulometria do pó, que possibilita um maior preenchimento de espaços vazios, aumentando a densidade dos produtos (PAIVA *et. al.* 2021).

Já com base na morfologia e microestrutura, as partículas do pó podem ser categorizadas como esféricas, alongadas, partículas de grão fino, de formato irregular e partículas revestidas de escória (HUAIWEI E XIN, 2011).

Quanto a composição química do pó em questão, permite a sua aplicação no segmento dos materiais cerâmicos, inibindo o vazamento dos metais no meio ambiente, bem como na sua reutilização no processo de produção (ALVES E VASCONCELOS, 2019).

2.6. ESTUDOS REALIZADOS COM PÓ DE ACIARIA

O processo de fabricação de aço é acompanhado pela grande emissão de escórias e poeiras da aciaria, chegando a um número de 10 a 25kg de pó por tonelada de aço fabricada, que em consequência das suas características devem ser armazenados em silos adequados.

Estudos tem sido desenvolvidos em torno do reaproveitamento do PAE, devido a grande quantidade que tem sido gerada e também pelo alto valor cobrado para sua deposição correta, encarecendo consideravelmente o processo. Os órgãos responsáveis tem sido cada vez mais exigentes e criteriosos quanto a esse descarte. Dessa forma, os estudos de viabilização de alternativas para reaproveitamento do PAE se tornam indispensáveis.

Na Figura 4, pode-se verificar as principais áreas de estudos associados à reutilização do pó de aciaria elétrica, em todo o mundo.

Figura 4 - Principais áreas de estudos com pó de aciaria



Fonte: NAIR *et al.*, 2022.

No que se refere a materiais metálicos, pode ser evidenciado o “Estudo do efeito da adição de partículas de reforço de pó de aciaria elétrica em compósito de matriz metálica”, que teve como objetivo produzir um compósito de matriz metálica de alumínio AA7075 reforçado com o pó de aciaria através da metalurgia do pó convencional e sinterização a plasma pulsado (ALVES, 2019). Após realizar estudos de composição e caracterização do pó de alumínio AA7075 e o pó de aciaria, determinou em teores de peso 5% e 10% do pó de aciaria para adição ao pó de alumínio. Verificou-se um aumento de 46% no valor da dureza quando adicionado 5% para o compósito fabricado por metalurgia do pó.

Outro exemplo é o estudo do “Concreto de alto desempenho com escória de forno elétrico a arco como agregado: propriedades mecânicas e de durabilidade”, que foram feitas combinações experimentais substituindo integralmente os agregados grossos por pó de aciaria elétrica, variando dosagens de cimento e água/cimento. A partir de caracterizações, misturas e teste, obteve-se uma melhora nas propriedades mecânicas incluindo compressão, tração, e módulo de elasticidade, e durabilidade do concreto, atingindo uma classe de resistência C60/75 (FALESCHINI *et al.*, 2015).

Ainda na classe dos materiais cerâmicos e aplicações do PAE a pesquisa do “Efeito da poeira de forno a arco elétrico nas propriedades da mistura de cimento asfáltico” visa mostrar a estabilização dos metais pesados através da mistura com cimento asfáltico para aplicação em estradas. Foram utilizadas porcentagens de 0%, 5%, 10%, 15% e 20% em volume de ligantes. Foi possível constatar que com o

aumento da concentração do pó a ductilidade e penetração diminuía. No entanto, outras propriedades como ponto de fulgor, ponto de incêndio e viscosidade aumentavam. (ALSHEYAB, KHEDAYWI, 2012).

Saindo da classe dos materiais cerâmicos e entrando nos materiais poliméricos, recentemente foi possível constatar a melhoria de propriedades mecânicas de tração, impacto, flexão e dureza, através da Utilização do pó de forno elétrico a arco como carga para resina poliéster insaturada (GAMEA *et al*, 2022).

O resultado desse estudo mostrou que incorporando as partículas de pó na matriz da resina de poliéster insaturada, gerou um aumento a resistência à tração em até 42%. Já a dureza aumentou em 8,5%, considerando um valor máximo em 10% em peso do pó. Quanto a flexão e a resistência ao impacto apresentaram um valor ideal a um percentual de peso igual a 5% (GAMEA *et al*, 2022). Apresentou ainda uma melhora quanto a estabilidade térmica dos compósitos. Dessa forma, utilizar o pó de aciaria elétrica na matriz polimérica seria uma das formas de melhorar a poluição ambiental.

2.7. MATERIAIS CERÂMICOS

No âmbito da ciência dos materiais temos uma divisão das classes de materiais em quatro tipos: metais e as ligas, cerâmicos, polímeros e os compósitos.

Os materiais cerâmicos são constituídos de elementos metálicos e não metálicos que na maioria das vezes possuem ligações iônicas ou mistas (iônico-covalente). Dentro dessa classe de materiais estão os óxidos, nitretos e carbetos, e podem ser classificados como cerâmicas tradicionais, cerâmicas avançadas, vidro, abrasivo e cimento, variando de acordo com a matéria-prima, fabricação e aplicação (GARRETO, 2007).

Esse tipo de material apresenta alto ponto de fusão, alta dureza e fragilidade, estabilidade em condições ambientais severas, isolamento térmico e elétrico, embora exista cerâmicas semicondutoras e condutoras.

A indústria cerâmica atende diversos segmentos do mercado como o automobilístico, eletrônico, aeroespacial e principalmente o da construção civil, com a fabricação de pisos, tijolos, lajes, telhas e diversos outros. Dessa forma, os materiais cerâmicos se tornaram uma área de grande interesse científico tendo em vista seu aproveitamento para o desenvolvimento de materiais com propriedades inovadoras.

Diante disso estudos estão sendo desenvolvidos acerca de reaproveitamento do pó de aciaria elétrica em materiais cerâmicos, levando em consideração a sua capacidade de imobilização de alguns metais pesados na massa cerâmica e otimização de propriedades mecânicas (NAIR *et al.*, 2022).

2.8. REUTILIZAÇÃO DO PÓ DE ACIARIA ELÉTRICA NA CONSTRUÇÃO

Muito tem se pesquisado sobre a reutilização do pó de aciaria elétrica na indústria dos materiais de construção, desde elementos estruturais a peças de acabamento. Um dos métodos mais viável economicamente é através da sua estabilização ou vitrificação, o que é uma característica inerente aos materiais cerâmicos aplicados à construção civil.

Um dos grandes exemplos disso foi acerca da substituição parcial no concreto, que é amplamente utilizado no meio da construção. Os metais pesados presentes na composição do PAE são estabilizados numa matriz cerâmica, reduzindo o impacto da lixiviação, e assim tornando possível a sua aplicação para tal finalidade. Devido à baixa granulometria do pó, ele é capaz de preencher os espaços vazios deixados entre os agregados e reduzir a porosidade. Com isso, apresenta uma melhora nas propriedades como resistência à compressão, resistência à tração, trabalhabilidade, módulo de elasticidade, tornando o concreto mais durável (NAIR *et al.*, 2022).

Quando se trata de revestimento asfáltico e a utilização de PAE temos uma mistura que tem o poder de reduzir a toxicidade do pó, um melhor preenchimento, menos emissão de gases de efeito estufa e uma redução de custo de produção (SAYADI E HESAMI, 2017).

Já as cerâmicas utilizadas como louças sanitárias e até como talheres, quando incorporam quantidades substanciais do PAE, os óxidos metálicos presentes no pó tem a capacidade de substituir alguns minerais argilosos usados na produção desses materiais, não sendo interessante ter um grande teor de óxido de ferro, devido a sua influência na coloração dos produtos. Em razão as altas temperaturas em que esses materiais cerâmicos são submetidos, leva à imobilização dos componentes considerados perigosos presentes no pó. Os componentes que aparecem em maior quantidade e estão presentes em todo pó, Fe e Zn, são elementos importantes na cristalização (NAIR *et al.*, 2022).

Para os materiais argilosos uma das grandes vantagens é aumentar a trabalhabilidade, visto que a argila se usada pura tem alto poder de retração, ocasionando trincas nos produtos.

3 METODOLOGIA

Esse capítulo foi destinado a descrição dos materiais e métodos que foram utilizados para a conclusão do presente trabalho, que tem como objetivo principal a caracterização do pó de aciaria elétrica para reinserção do mesmo na produção de materiais cerâmicos.

3.1. MATERIAIS

O resíduo sólido caracterizado, pó de aciaria elétrica (Figura 5), foi cedido por uma usina siderúrgica, localizada na cidade de Recife/PE, sendo recolhido pela autora do trabalho, que no presente momento estagiava na empresa. Foi recolhida uma amostra representativa que se caracteriza por uma parcela do resíduo a ser estudado, obtida através de um processo de amostragem, que quando analisadas apresenta as mesmas características e propriedades da massa total do resíduo (ABNT, 2004).

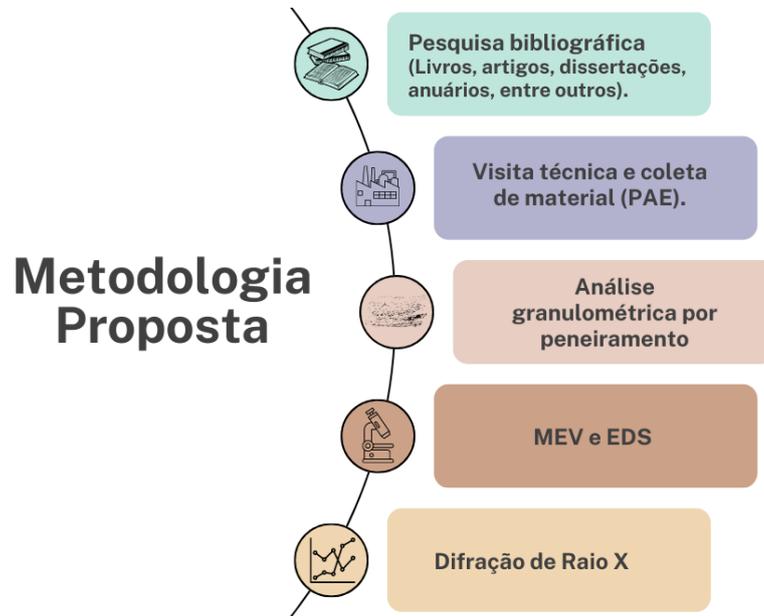
Figura 5 - Aspecto visual do pó de aciaria elétrica



Fonte: A autora, 2022.

3.2. MÉTODOS

Essa seção é reservada para a descrição dos métodos utilizados para a caracterização do pó de aciaria elétrica, seguindo a ordem de análises de acordo com o fluxograma abaixo.



3.2.1. Análise granulométrica por peneiramento

Devido a dificuldade de manuseio com o pó em seu estado seco, tornou-se mais viável realizar a análise granulométrica pelo método de peneiramento via úmido.

Dessa forma, a amostra foi pesada utilizando a Ohaus Precision Standard Balance, como mostrado na figura 6, e submetida ao peneiramento.

Figura 6 - Pesagem da amostra do pó de aciaria



Fonte: A autora, 2022.

O peneiramento via úmido utiliza o resíduo em solução, de forma que facilite a passagem dos grãos mais finos pelas telas das peneiras. Após a adição de água e obtenção da polpa, ocorre a transferência do material para uma coluna de peneiras apoiadas em um peneirador vibratório. A sequência de peneiras em série Tyler utilizadas foi 100, 150, 200, 270, 325, 400 e 635 mesh, como representado na figura 7.

Figura 7 - Sequência de peneiras em peneirador vibratório



Fonte: A autora, 2022.

Após finalização do peneiramento, as partes retidas nas peneiras foram depositadas em recipientes metálicos e levadas à estufa a uma temperatura de 150°C, para que as amostras fossem totalmente secas. Todo esse procedimento de peneiramento, foi realizado no Laboratório de Tecnologia Mineral (LTM), pertencente ao Departamento de Engenharia de Minas (DEMINAS – UFPE).

Com as amostras secas pode-se realizar a pesagem de cada uma, para que através da equação demonstrada abaixo, fosse realizada a distribuição granulométrica, de acordo com a NBR 7181 (ABNT, 2016).

$$Q_g = \frac{(M_S - M_i)}{M_S} \times 100$$

Onde:

Q_g – porcentagem do material passante em casa peneira;

M_s – massa total de amostra seca;

M_i – massa do material retido acumulado em cada peneira;

3.2.2. Microscopia eletrônica de varredura (MEV) Espectroscopia de energia dispersiva de raios-x (EDS)

As técnicas de MEV por emissão de elétrons retroespalhados foram utilizadas para a caracterização morfológica das partículas, e o equipamento utilizado é um TESCAN MIRA 3 FEG-SEM (figura 8) que foi acoplado com um sistema de EDS OXFORD INSTRUMENTS INCA X-Act (figura 9), a fim de realizar uma análise elementar de uma amostra específica analisada, com ampliação de 10.000, 25.000 e 50.000, através do software AZtec.

Para realizar as análises foram selecionadas 4 amostras, de acordo com a sua granulometria, conforme mostra a Tabela 2, e tais amostras foram depositadas sobre uma fita dupla face de carbono, devidamente presa ao porta amostras (stub).

Tabela 4 - Tabela de amostras para análises

Tabela de amostras para análises		
Amostras	Passagem/Retenção (mesh)	Passagem/Retenção (μm)
Amostra 1	150 x 200	106 x 75
Amostra 2	270 x 325	53 x 45
Amostra 3	325 x 400	45 x 38
Amostra 4	#635	20

Fonte: A autora, 2022.

Essas análises foram desenvolvidas no Instituto Nacional de Tecnologia em União e Revestimento de Materiais (INTM) localizado na UFPE.

Figura 8 - Microscópio Eletrônico de Varredura



Fonte: A autora, 2022.

Figura 9 - Espectômetro por energia dispersiva



Fonte: A autora, 2022.

3.2.3. Difração de raios X (DRX)

O difratômetro utilizado foi o SHIMADZU, modelo XRD-7000 X-ray, do INTM/UFPE.

Os difratogramas foram digitalizados entre os intervalos de medições (2θ) de 10° a 80° , com incremento (step) de $0,02^\circ$ e um tempo fixo de 1 segundo para cada passo. As fases presentes poderão ser identificadas através de comparação dos difratogramas, com as cartas do banco de dados JCPDS (Joint Committee on Powder

Diffraction Standards), conjuntamente à análise dos difratogramas e identificação das fases realizadas pelo software MATCH!

4 RESULTADO E DISCUSSÃO

4.1. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR PERNEIRAMENTO

Foi possível constatar que aproximadamente 87% de uma amostra de 200g possui tamanho inferior a 20 μ m. Possuem grande área de superfície específica e superfície lisa. Não foi encontrado resquícios de impurezas que pudessem interferir no peso da amostra, mas um pequeno percentual foi perdido durante o experimento.

Dessa forma, pode-se considerar que a faixa de tamanho das partículas predominante nessa amostra é abaixo de 20 μ m, como apresentado na Tabela 3, viabilizando a reutilização do PAE.

Tabela 5 - Análise granulométrica por peneiramento

Resultado da análise de granulometria por peneiramento						
Amostra	Tipo de peneira (mesh)	Diâmetro (microns)	Massa retida (g)	Massa passante (g)	Percentual Total retido (%)	Percentual Total passante (%)
Pó 1	Acima 100	150	7,58	192,42	3,79%	96,21%
Pó 2	150	106	3,9	188,45	1,95%	94,23%
Pó 3	200	75	3,63	183,2	1,82%	91,60%
Pó 4	270	53	2,65	181,9	1,33%	90,95%
Pó 5	325	45	2,1	179,96	1,05%	89,98%
Pó 6	400	38	1,33	177,68	0,67%	88,84%
Pó 7	Abaixo 635	20	1,25	174,37	0,63%	87,19%
Total			22,44		11,22%	
Alimentação inicial (g)				200		

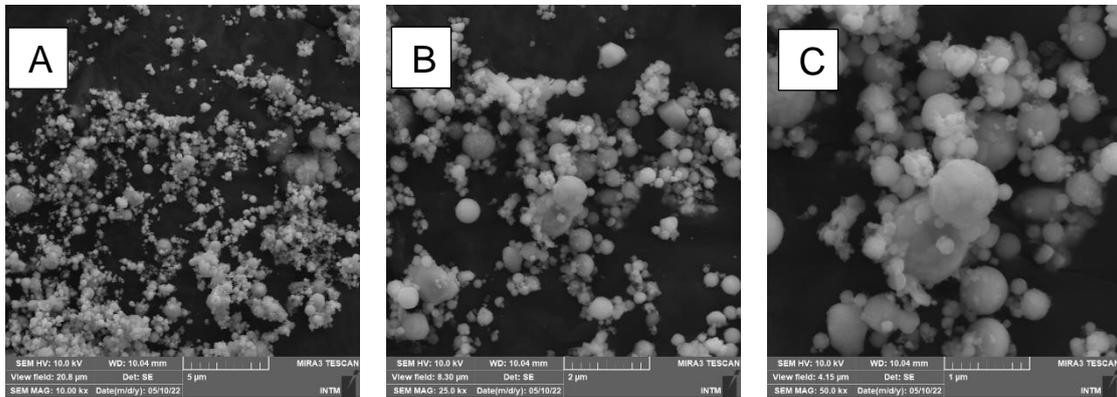
Fonte: A autora, 2022.

4.2. MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV) E ESPECTROSCOPIA DE ENERGIA DISPERSIVA DE RAIOS-X (EDS)

As 4 amostras foram selecionadas por sua representatividade granulométrica, e a morfologia das mesmas foi analisada através do MEV e a análise da composição química das microrregiões foi realizada através do EDS.

A figura 10 representa uma visão geral das partículas da amostra 1 que estão na faixa de 75 μ m, com ampliações de 10.000x (Figura 10-A), 25.000x (Figura 10-B) e 50.000x (Figura 10-C) respectivamente.

Figura 10 - Imagens de MEV da amostra 1 de PAE



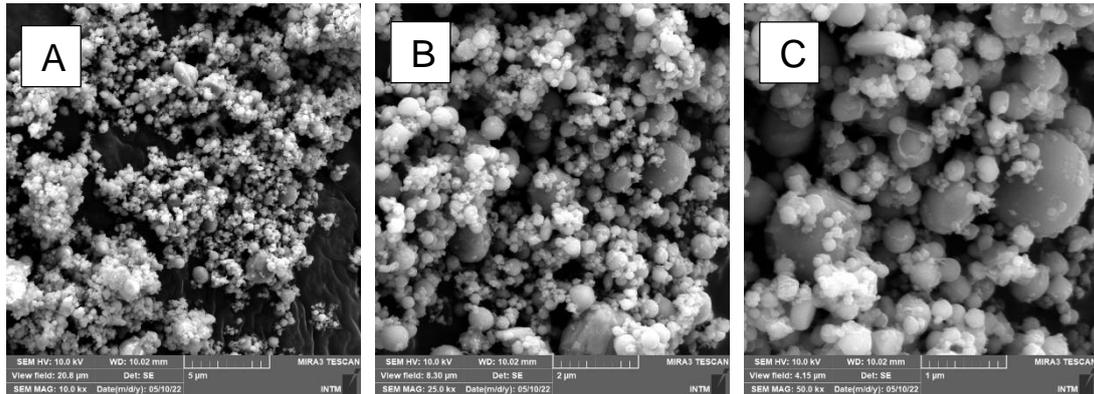
Fonte: A autora, 2022.

É possível observar a predominância de partículas com formatos bem definidos e esféricos, bem como partículas submicrônicas aglomeradas, devido a forças eletrostáticas que facilitam a formação de aglomerados maiores.

Essas partículas esféricas são originadas pela inserção de partículas de metais fundidos e sofreram sinterização em sistemas de controle de poluição do ar, corroborando com os resultados encontrados na caracterização do pó feita por em outros estudos (DA SILVA *et al.*, 2008).

A Figura 11 mostra o aspecto das partículas da amostra 2 que estão em uma faixa granulométrica de 45 μ m, com ampliações de 10.000x (Figura 11-A), 25.000x (Figura 11-B) e 50.000x (Figura 11-C) respectivamente.

Figura 11 - Imagens de MEV da amostra 2 de PAE

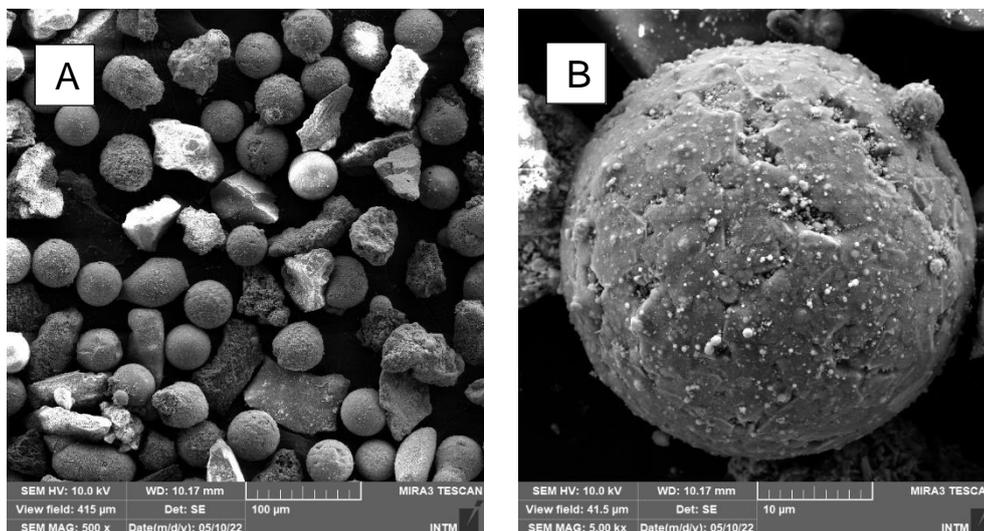


Fonte: A autora, 2022.

Observa-se que na segunda amostra com partículas predominantemente um pouco menores, elas se apresentam em aglomerados maiores, com formatos esféricos, mas também com novos formatos irregulares.

Para as partículas da amostra 3 com uma faixa granulométrica média de 38μm, foram analisadas imagens com duas ampliações a mais. Na Figura 12, com ampliações de 500x (Figura 12-A) e 5.000x (Figura 12-B).

Figura 12 - Imagens de MEV da amostra 3.1 de PAE

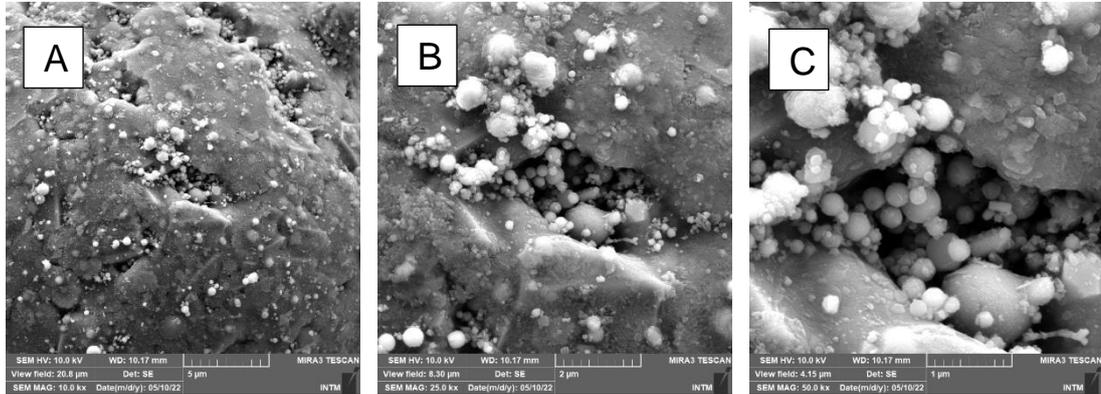


Fonte: A autora, 2022.

Onde é possível identificar de forma mais nítida a presença de partículas alongadas e de maior comprimento.

Na Figura 13 apresentada abaixo, ainda se trata da amostra 3 com as ampliações usuais escolhidas de 10.000x (Figura 13-A), 25.000x (Figura 13-B) e 50.000x (Figura 13-C) respectivamente.

Figura 13 - Imagens de MEV da amostra 3.2 de PAE

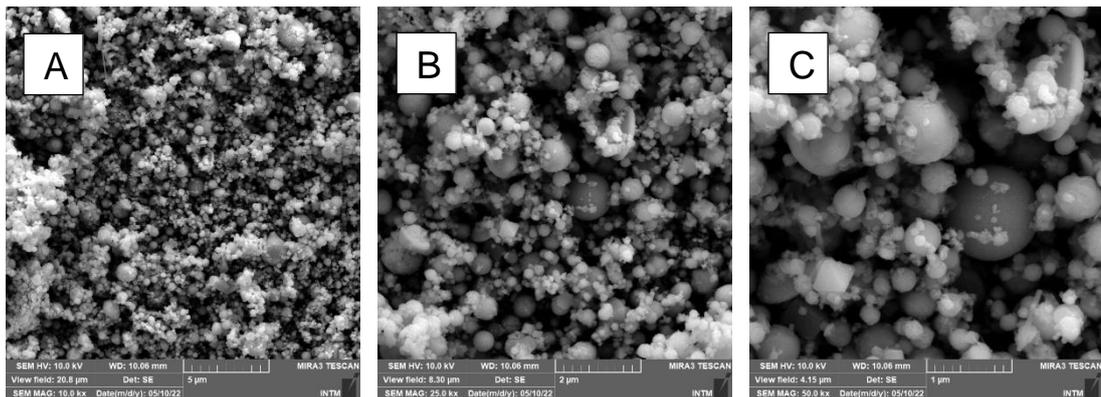


Fonte: A autora, 2022.

Nessas imagens é possível verificar a presença de partículas esféricas submicrônicas aderindo às partículas maiores com formatos arredondados.

Por fim, na Figura 14 a representação da fração da amostra 4, que apresenta uma faixa granulométrica abaixo de 20 μ m, com ampliações de 10.000x (Figura 14-A), 25.000x (Figura 14-B) e 50.000x (Figura 14-C) respectivamente.

Figura 14 - Imagens de MEV da amostra 4 de PAE



Fonte: A autora, 2022.

Nessa última amostra as partículas se apresentam em grandes aglomerações de partículas extremamente finas, com morfologia esponjosa irregular e algumas partículas esféricas isoladas.

Quando realizada a análise das amostras através do EDS identificamos os elementos químicos presentes na composição do PAE em estudo, divididos em

microrregiões. Na Tabela 4 é possível verificar os percentuais de composição de cada microrregião.

Tabela 6 - Resultado da análise de EDS por microrregião

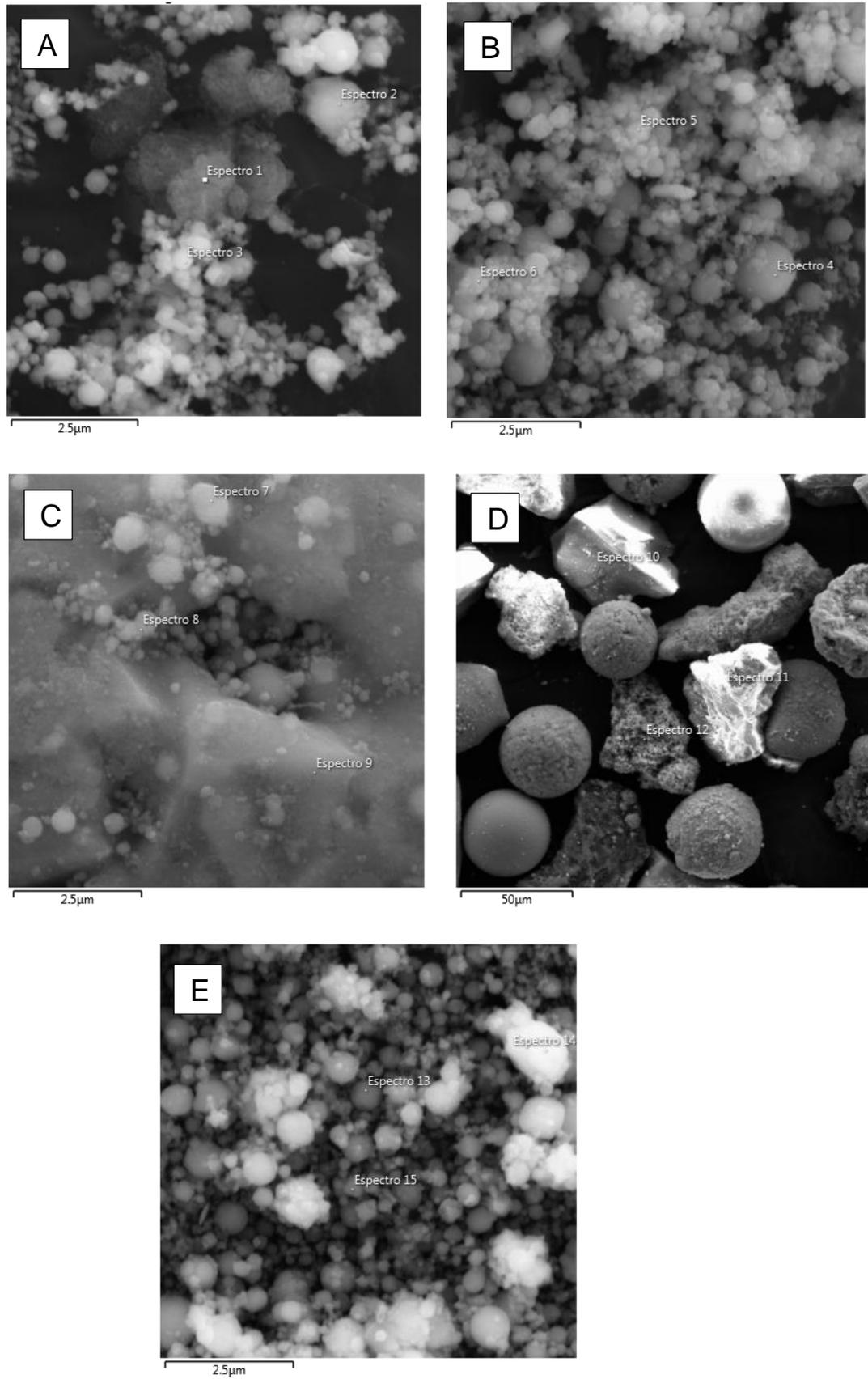
Resultado da análise de EDS									
Amostra	Espectro	Fe(%)	Zn(%)	O (%)	Si (%)	Mn(%)	Mg (%)	Al (%)	Na (%)
Amostra 1	Espectro 1	5,74	5,67	47,51	0,75	0,38	1,38	0,19	0,75
	Espectro 2	16,08	13,17	44,7	0,58	0,0194	5,76	-	1,05
	Espectro 3	13,05	25,21	40,26	0,68	0,01	0,91	-	1,98
Amostra 2	Espectro 4	28,82	30,67	18,24	0,49	2,55	0,46	0,12	0,72
	Espectro 5	27,94	44,91	38,79	0,93	2,66	0,62	-	1,87
	Espectro 6	26,09	35,91	41,72	1,13	5,4	2,21	0,18	1,41
Amostra 3	Espectro 7	36,66	24,09	46,25	3,39	3,43	1,13	1,1	1,97
	Espectro 8	35,5	25,49	35,56	3,58	3,65	1,4	0,82	1,89
	Espectro 9	50,69	22,38	41,02	2,04	4,28	1,66	1,04	1,36
	Espectro 10	1,95	1,07	69,07	38,4	-	0,76	1,09	11,54
	Espectro 11	6,18	6,16	60,48	-	-	50,49	-	-
	Espectro 12	79,66	11,43	47,59	0,76	-	0,66	0,35	1,05
Amostra 4	Espectro 13	36,76	59,66	13,8	0,62	4,21	0,39	0,13	-
	Espectro 14	25,12	61,76	29,6	0,86	3,78	0,88	0,16	1,29
	Espectro 15	28,44	50,36	25,54	0,68	3,6	0,52	0,16	1,22

Fonte: A autora, 2022.

Observando a tabela acima pode-se constatar que o ferro está presente em todas as microrregiões analisadas, principalmente em maior proporção em partículas apontadas no espectro 12 (Figura 15-D). O ferro geralmente está associado a partículas maiores, numa faixa média de 20µm e que apresenta formato irregular.

Outro elemento presente em todas as microrregiões de forma considerável foi o zinco, que diferente do ferro está associado a partículas submicrométricas e finas, numa faixa granulométrica menor que 20µm, como mostrados nos espectros 13, 14 e 15 (Figura 15-E). Essas partículas são originadas através de condensação de vapores contendo zinco dentro do forno (GUÉZENNEC *et al.*, 2005). De acordo com OMRAN & FABRITIUS (2017), quando analisamos os espectros 4 e 6, é possível sugerir que essa região seja composta de zincita e franklinita, devido o percentual dos elementos e o tamanho das partículas dessa amostra.

Figura 15 - Microrregiões analisadas no EDS

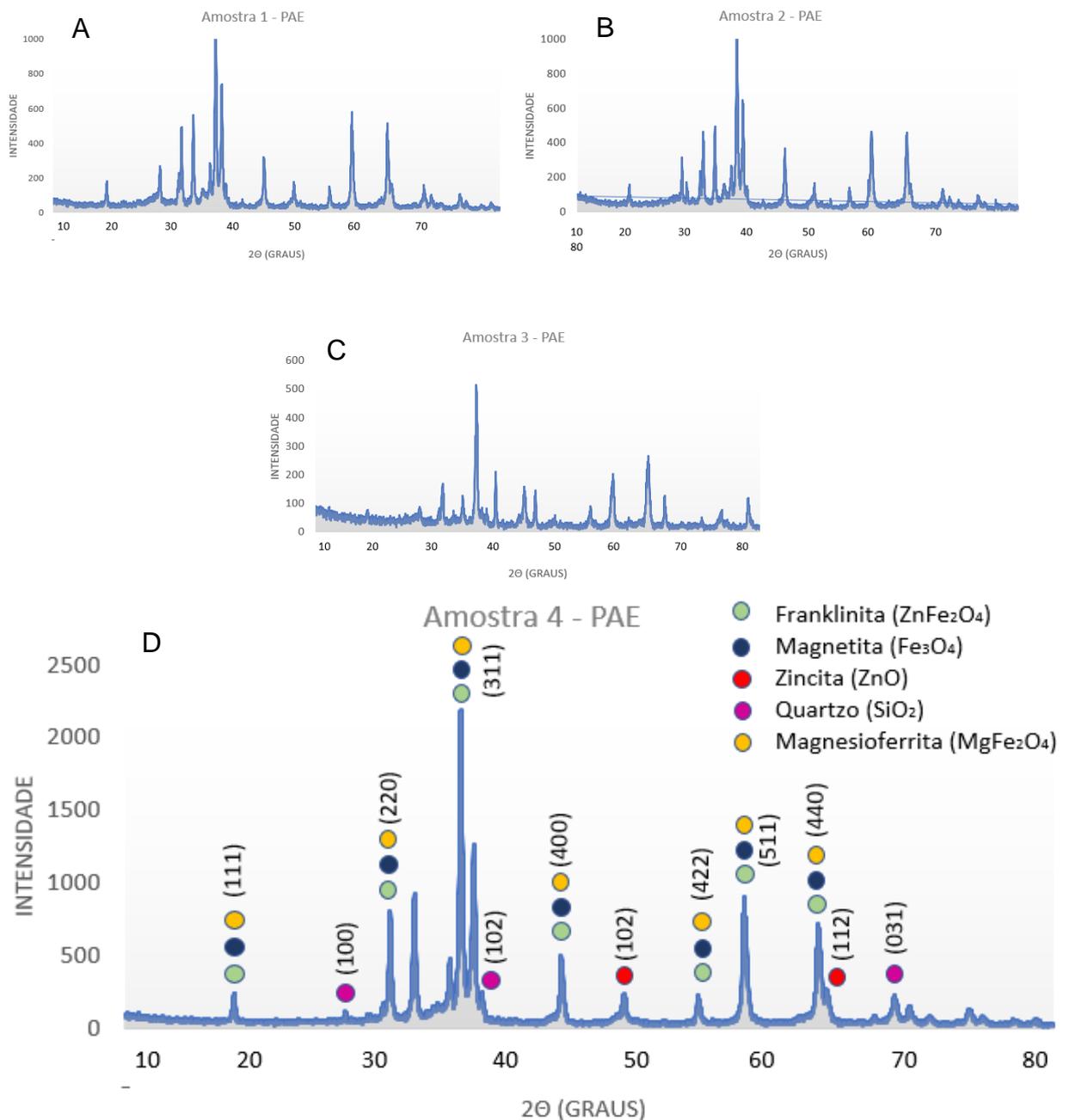


Fonte: A autora, 2022.

4.3. DIFRAÇÃO DE RAIOS X

A análise por difração de raios x foi feita com o objetivo de identificar as fases cristalógicas presentes nas 4 amostras de pó de aciaria elétrica selecionadas, como ilustrado na Figura 16. Para que isso fosse possível as associações dos elementos foram feitas a partir das cartas JCPDS identificadas abaixo.

Figura 16 - Difratomogramas obtidos para as amostras de PAE



Fonte: A autora, 2022.

Com base nos resultados obtidos pelas análises de MEV e EDS apresentados anteriormente, e pelos difratogramas acima, é possível concluir o ferro e o zinco, como sendo os elementos que mais aparecem nas amostras, encontram-se principalmente associados em forma de óxidos, e óxidos com estrutura mais complexas, como espinélio (ALVES, 2019).

De acordo com a complexidade mineralógica do pó em estudo, foram encontradas outras fases como a Zincita (ZnO) e Franklinita (ZnFe_2O_4), por meio das cartas JCPDS (Nº 01-1136) e JCPDS (Nº 02-1043), respectivamente. A fase Magnetita (Fe_3O_4) também pôde ser observada, principalmente associada ao ferro.

As fases Magnetitas e Franklinita possuem em comum os índices de Miller (111), (220), (311), (400), (422), (511) e (440), ilustrados na Figura 16-D, corresponde a sequência de ângulos de difração (2θ): $18,3^\circ$; $30,2^\circ$; $35,7^\circ$; $43,2^\circ$; $53,5^\circ$; $57,0^\circ$ e $62,6^\circ$. Enquanto que para a magnetita, a sequência de ângulos de difração para os mesmos índices é: $18,2^\circ$; $30,2^\circ$; $35,5^\circ$; $43,0^\circ$; $53,5^\circ$; $57,2^\circ$ e $62,5^\circ$.

Ainda foi possível encontrar a presença de picos minoritários formadores de escória, compostos por Quartzo (SiO_2) e Magnésio, através da carta JCPDS (Nº 01-1235), indicados na Figura 16-D.

Os picos para todas as fases encontradas são atingidos pela sobreposição em algum grau, o que pode interferir na identificação das fases, em específico das fases magnetita, hematita, as pertencentes ao grupo do espinélio e ferrita de cálcio, entre outras (ALVES, 2019).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O pó de aciaria elétrica gerado pelo processo da siderurgia, é um pó extremamente fino, apresentando em sua maioria granulometria abaixo de $20\mu\text{m}$, tendo como seus principais compostos o ferro e o zinco, encontrados na fase franklinita, magnetita e zincita, com formato predominantemente esférico. As partículas do pó quando adicionados em proporções de 5% a 10% em peso à matriz cerâmica, é capaz de promover uma melhoria nos materiais produzidos, visto que apresentando tamanhos pequenos, os grãos preenchem os espaços vazios que são geradores de tensões e melhoram as propriedades mecânicas como resistência à tração, trabalhabilidade, resistência e rigidez à fluência, entre outras. A presença de elementos químicos contaminantes torna o material perigoso, o que é reduzido com a imobilização desses metais na matriz cerâmica pelo processo de sinterização à altas temperaturas. Com bases nos resultados encontrados e análises feitas, é possível constatar a viabilidade da reutilização do pó de aciaria elétrica para materiais cerâmicos. As características encontradas no pó estudado favorecem a sua reutilização, principalmente para materiais cerâmicos de aplicações na construção civil, como telhas, tijolos, concreto, argamassas e asfalto. Tornou-se uma ótima alternativa para gerenciamento de descarte do pó, otimização das propriedades dos materiais, redução de custo de produção e redução de impactos ambientais. Por fim, esse trabalho conclui que a reutilização do PAE nos materiais de construção civil pode ter impacto significativo e benéfico para o desempenho dos materiais, para a economia e o meio ambiente.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realização de ensaio de porosidade em materiais com mais de 10% em peso do pó;
- Testar a substituição de aglutinantes e minerais argilosos por PAE;
- Investigar a relação da mudança de cor dos materiais após adição do PAE;
- Avaliação da influência da densificação dos materiais reforçados com PAE;
- Análise da imobilização dos metais pesados a baixas temperaturas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALSHEYAB, M.; KHEDAYWI, T. Dynamic creep analysis of Electric Arc Furnace Dust (EAFD) – Modified asphalt, v. 146, p. 122-127, 2017.

ALVES, E. O. Estudo do efeito da adição de partículas de reforço de Pó de Aciaria Elétrica em compósito de matriz metálica. 2019.

ALVES, E. et al. Estudo de novas perspectivas tecnológicas do aproveitamento do pó de aciaria elétrica. 2019.

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

BAKKAR, A. Recycling of electric arc furnace dust through dissolution in deep eutectic ionic liquids and electrowinning. Journal of hazardous materials, v. 280, p. 191-199, 2014.

BRAGANÇA, S. R.; BERGMANN, C. P.; ISAIA, G. Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais. Ed. GC Isaia, v. 2, p. 1712, 2007.

CHOLAKE, S.T., FARZANA, R., NUMATA, T., SAHAJWALLA, V. Transforming electric arc furnace waste into value added building products. J. Clean. Prod. 171, 1128–1139, 2018.

DA SILVA, M.C., BERNARDES, A.M., BERGMANN, C.P., TENORIO, J.A.S., Espinosa, D.C.R. Characterisation of electric arc furnace dust generated during plain carbon steel production. Ironmak. Steelmak. 35, 315–320, 2008.

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.

DE VARGAS, A. S.; MASUERO, A. B.; VILELA, A. CF. Estudo microestrutural e determinação do calor de hidratação em pastas de cimento Portland com pó de aciaria elétrica (PAE). Ambiente Construído, v. 4, n. 2, p. 7-18, 2004.

DE VARGAS, A. S.; MASUERO, A. B.; VILELA, A. CF. Investigações sobre o uso de pó de forno a arco elétrico (EAFD) em pastas de cimento Portland I (MP) modificado por Pozzolan. Pesquisa de cimento e concreto, v. 36, n. 10, pág. 1833-1841, 2006.

FALESCHINI, Flora et al. High performance concrete with electric arc furnace slag as aggregate: Mechanical and durability properties. *Construction and Building Materials*, v. 101, p. 113-121, 2015.

GAMEA, Eman G. et al. Utilization of electric arc furnace dust as a filler for unsaturated polyester resin, 2022.

GUÉZENNEC, Anne-Gwénaëlle et al. Dust formation in electric arc furnace: birth of the particles. *Powder technology*, v. 157, n. 1-3, p. 2-11, 2005.

HUAIWEI, Z., XIN, H. An overview for the utilization of wastes from stainless steel industries. *Resour. Conserv. Recycl.* 55, 745–754, 2011 <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.03.005>

LIN, X., PENG, Z., YAN, J., LI, Z., HWANG, J. Pyrometallurgical recycling of electric arc furnace dust. *J. Clean. Prod.* 149, 1079–1100, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.128>.

MACHADO, A. T. et al. Utilização do pó de aciaria (PAE) como adição ao concreto. XV CBECIMAT. Natal–RN, 2002.

MAMEDE FILHO, J. Instalações elétricas industriais. Livros Tecnicos e Cientificos, Rio de Janeiro 2007.

MANTOVANI, M.C.; TAKANO, C.; BÜCHLER, P.M. EAF and secondary dust characterisation. *Ironmaking & steelmaking*, v. 31, n. 4, p. 325-332, 2004.

MANTOVANI, M. C.; TAKANO, C.; CAVALLANTE, F. L. Caracterização de três tipos de poeiras geradas em fornos elétricos a arco. In: *Anais do Congresso Anual da ABM*, 1998.

MESQUITA FILHO, M. M. et al. Physical and chemical characterization of electrical steel dust from a steel plant in the southwestern of Pará. In: *Proceedings of the 27. ENTMMME: Brazilian national meeting on mineral treatment and extractive metallurgy*. 2017.

NBR, ABNT. 10004: Associação Brasileira de Normas Técnicas–. Classificação de resíduos sólidos, Rio de Janeiro, 2004.

NBR, ABNT. 13749: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas– Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

NIKOLIĆ, I., DUROVIĆ, D., MARKOVIĆ, S., VESELINOVIĆ, L., JANKOVIĆCASTVAN, I., RADMILOVIĆ, V., RADMILOVIĆ, V.R. Alkali activated slag cement doped with Zn-rich electric arc furnace dust. *J. Mater. Res. Technol.* 9, 12783–12794, 2020.

NYIRENDA, R. L. The processing of steelmaking flue-dust: a review. *Minerals Engineering*, v. 4, n. 7-11, p. 1003-1025, 1991.

OMRAN, M.; FABRITIUS, T. Effect of steelmaking dust characteristics on suitable recycling process determining: Ferrochrome converter (CRC) and electric arc furnace (EAF) dusts. *Powder Technology*. 308:47-60, 2017.

RAMOS, R. A. Otimização do processo de fusão e refino primário através de análises estatísticas de parâmetros elétricos e de processos em forno elétrico a arco. Tese (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.

RIZZO, E. M. S. Introdução aos processos de refino primário dos aços nos convertedores a oxigênio. ABM, 2006.

RUETTEN, DR J. Aplicação da tecnologia Waelz na reciclagem de recursos de pó de siderúrgica. v. 1, 2010.

ROSSI, D. Influência da proporção entre as vazões de oxigênio e gás natural do sistema de injeção na eficiência energética de um forno elétrico a arco. Tese (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

SAYADI, M., HESAMI, S. Performance evaluation of using electric arc furnace dust in asphalt binder. *J. Clean. Prod.* 143, 1260–1267, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.156>.

SILVA, M. C. da. Reciclagem de pó de aciaria elétrica como matéria-prima na fabricação de materiais cerâmicos argilosos: controle das emissões atmosféricas de zinco, 2006.

SKAF, M., MANSO, J.M., ARAGON, A., FUENTE-ALONSO, J.A., ORTEGA-LOPEZ, V. EAF slag in asphalt mixes: a brief review of its possible re-use. *Resour. Conserv. Recycl.* 120, 176–185, 2017.

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.