

ESTUDO DE NOVAS PERSPECTIVAS TECNOLÓGICAS DO APROVEITAMENTO DO PÓ DE ACIARIA ELÉTRICA*

Elizeth Oliveira Alves¹

Cleiton Rodrigues de Vasconcelos²

Kleber Gonçalves Bezerra Alves³

Resumo

Em virtude da periculosidade do Pó de aciaria (PAE), práticas alternativas, como a reinserção do resíduo no processo produtivo, ou sua incorporação em outros materiais fizeram com que a reciclagem tenha se tornado uma via para este subproduto. O presente trabalho tem como objetivo identificar as áreas de desenvolvimento tecnológico de utilização do PAE, avaliar a potencialidade de reaproveitamento e reciclagem do resíduo oriundo do processo de produção do aço carbono, comparando as características obtidas do PAE analisado com os requisitos indicados através da análise de patentes. O PAE produzido no estado de Pernambuco foi caracterizado pelas técnicas de Fluorescência de raios X (FRX), separação granulométrica via peneiramento, distribuição do tamanho de partículas, Difração de raios X (DRX), Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e Espectroscopia por energia dispersiva (EDS). A prospecção tecnológica foi realizada nas bases de patentes europeia EPO e na base nacional de patentes nacional do INPI. As análises realizadas mostraram que o material apresentou aproximadamente 28,5% de suas partículas com granulometria inferior a 53µm, composto em sua maioria por ferro e zinco presentes na forma de óxidos, organizados nas fases franklinita, zincita e magnetita. A baixa granulometria e composição química possibilitam a sua aplicação no campo dos materiais cerâmicos, bem como sua reinserção no processo de fabricação. O resíduo estudado apresentou características similares com os demais resíduos observados nas patentes.

Palavras-chave: Resíduo siderúrgico; Pó de aciaria; reciclagem, prospecção tecnológica.

STUDY OF NEW TECHNOLOGICAL PERSPECTIVES IN THE USE OF ELECTRIC ARC FURNACE DUST FURNACE

Abstract

Due to the hazardousness nature of the electric arc furnace dust (EAFD), alternative practices, as reinsertion of waste into the steelmaking process, or its incorporation into other materials, have led the recycling has become a route for this by-product. The aim of this work was to identify technological development areas of the use of EAFD, evaluate the potential of reuse and recycling of waste arising from production of carbon steel, comparing the characteristics obtained from EAFD examined with requirements indicated by an analysis of patents. EAFD generated in the state of Pernambuco was characterized by X-ray fluorescence (XRF), size separation of particles by sieving, X-ray diffraction (XRD), Scanning electron microscope (SEM) plus Energy dispersive spectroscopy (EDS) analysis technique. Technology prospecting was conducted in EPO European international patent databases and INPI national databases. The analysis carried out show that waste had approximately 28,5% of particle size less than 53µm, composed in its majority by iron and zinc in the form of oxides, present as phases franklinite, zincite and magnetite. The small particle size and chemical composition allow its application in the field of ceramic materials, and reinsertion into the steelmaking process. The waste studied had similar characteristics with other wastes observed in patents.

Keywords: Steelmaking waste; Electric arc furnace dust; Recycling; Technology prospecting.

¹ *Engenheira de materiais, Doutora em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, Brasil.*

² *Administrador/Administração, Doutor em Propriedade Intelectual, Professor, DEPRO/Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal de Sergipe, São Cristovão, SE, Brasil.*

³ *Engenheiro de Materiais, Doutor em Ciência dos Materiais, Professor, DEMEC/Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

As usinas siderúrgicas integradas utilizam, principalmente, cinco grupos distintos de insumos em seu processo produtivo: matérias-primas, ar, água, combustível e energia, entretanto, também são responsáveis pela geração de diversos tipos e em grandes quantidades de resíduos sólidos. Estima-se que durante a produção de aço, entre 2-4 toneladas de resíduos são geradas para cada tonelada de aço [1].

O Pó de aciaria elétrica (PAE) é um dos resíduos sólidos produzidos no Forno elétrico a arco (FEA) durante a fusão de sucata, adicionada como material de carga principal e/ou única, ou com adição de ferro-gusa. O PAE formado é então recolhido por um sistema de coleta de gases e materiais particulados. O tipo de sucata fundida no FEA determina predominantemente a composição química do pó gerado, sendo definido, de modo geral, como um material rico em metais ferrosos e não ferrosos [2, 3, 4].

Entre os principais elementos, o zinco está presente no PAE na forma de franklinita, partículas de ferrita ricas em zinco (espinélio – $ZnFe_2O_4$), seguido pela ferrita de cálcio (espinélio – $CaFe_2O_4$), ou ferritas com metais isomorficamente substituídos (Zn_x, Me_y) Fe_2O_4 , onde $Me = Mn, Co, Ni, Cr, etc.$, e zincita (ZnO). Com exceção da franklinita, o ferro está presente principalmente na fase magnetita (Fe_3O_4). Além dos óxidos apresentados, o PAE pode possuir ainda em sua composição, hematita (Fe_2O_3), carbono (coque), calcita ($CaCO_3$), sílica (SiO_2) e silicato de alumínio [5,6]. Em função de sua composição, é classificado, segundo os critérios estabelecidos pela Norma Brasileira NBR 10004:2004, como um resíduo de Classe I – Perigoso, de uma fonte específica K061, lodos e poeiras provenientes do sistema de controle emissão de gases empregado na produção de aço primário em fornos elétricos, tendo como característica de periculosidade a toxicidade em função da presença de elementos como Zn, Pb e Cd. Assim como no Brasil, a Agência de Proteção Ambiental (Environmental Protection Agency – EPA) dos Estados Unidos também classifica o PAE como um resíduo perigoso [7,8].

No processo de produção do aço por FEA estima-se uma geração entre 10 a 25 kg de pó por tonelada de aço. Entre os métodos sugeridos para a reciclagem de pó de aciaria, os processos pirometalúrgicos ainda são os únicos que têm sido aplicados na indústria. No entanto, cerca de 60 % do PAE gerado em todo o mundo ainda encontra-se estocado em pátios [3]. Em função do volume de matéria-prima e outros insumos consumidos, a questão deste resíduo não possuir uma destinação ambiental adequada não só é um desperdício de recursos, mas também um custo adicional e potencial impacto ambiental adverso [8].

O PAE tem se tornado objeto de estudo de diversos pesquisadores, levando-os a desenvolver novas abordagens para a reciclagem deste resíduo, quer seja em função do seu volume de produção ou pela impossibilidade de estocagem de alguns países, aliadas à crescente preocupação com as questões ambientais. As abordagens propostas se relacionam principalmente aos envolvendo caracterização dos diferentes tipos de PAE [9], processos pirometalúrgicos [8] e hidrometalúrgicos [10], para estabilização ou recuperação de metais de interesse, além de sua incorporação em produtos cerâmicos [11]. Temáticas como a inserção do PAE em compósitos metálicos [12] ou poliméricos ainda tem sido pouco exploradas.

Diante do exposto, esta pesquisa tem como objetivo avaliar a potencialidade do reaproveitamento do PAE produzido na região do estado de Pernambuco, por meio de sua caracterização físico-química e morfológica, comparando as características

obtidas com os requisitos indicados através da análise de patentes e identificação das áreas de desenvolvimento tecnológico de utilização do resíduo.

2 DESENVOLVIMENTO

O PAE analisado foi cedido por uma usina siderúrgica semi-integrada produtora de aço carbono, localizada no estado de Pernambuco. A composição química da amostra foi determinada por Fluorescência de raios-X (FRX) no espectrômetro Rigaku modelo ZSX Primus II. O ensaio de peneiramento para a separação de frações granulométricas de PAE foi conduzido por via úmida em virtude da baixa granulometria esperada, e utilizando a seguinte sequência de malhas: 65, 150, 200 e 270 mesh, no qual foram obtidas cinco frações do resíduo de acordo com as faixas das peneiras utilizadas. Das cinco frações de PAE obtidas apenas quatro foram submetidas aos ensaios posteriores, visto que a fração de tamanho acima de 65 mesh (partículas maiores que 212 μm) possuía impurezas como plásticos, vidro e madeira, possivelmente incorporadas durante a estocagem.

A distribuição do tamanho de partículas das frações foi determinada através do equipamento Mastersizer Hydro 2000MU, utilizando água como meio dispersante. A caracterização das fases cristalinas foi realizada com o uso de um difratômetro da marca Bruker, modelo D8 Advance, com fonte de radiação $\text{CuK}\alpha = 0,1541 \text{ nm}$, no intervalo de medições (2θ) de 10° a 80° , com incremento (*step*) de $0,02^\circ$ e um tempo fixo de 1 segundo para cada passo. Por sua vez, a análise da morfologia das partículas foi realizada no microscópio eletrônico de varredura (MEV) modelo Hitachi TM3000, e a composição química das microrregiões foi analisada através de Espectroscopia de energia dispersiva (EDS) acoplado ao MEV. A composição química das frações obtidas foi determinada por meio da Fluorescência de raios-X (FRX).

A metodologia de investigação das patentes teve como foco buscas realizadas referentes ao Pó de aciaria elétrica, durante o período de julho de 2018, e consistiu em algumas determinações de busca, como segue:

(i) Realização da pesquisa na base internacional EPO (European Patent Office) e na base de dados nacional de patentes do INPI (Instituto Nacional de Propriedade Intelectual).

(ii) Busca nas bases de patentes usando os termos: pó de aciaria elétrica (EAFD), pó de forno elétrico/poeira de forno elétrico (EAF dust) e poeira de aço (dust of electric furnace), no idioma oficial da base brasileira (INPI) e seu correspondente termo em língua inglesa na base europeia (EPO);

(iii) Classificação das patentes de acordo com o IPC (*International Patent Classification*);

(iv) Mineração de dados referente aos documentos de patentes encontrados, com o intuito de identificar as perspectivas tecnológicas ao longo dos anos, referente ao uso do PAE.

A Classificação Internacional de Patentes (IPC), contribuiu para classificar os segmentos de aplicação do resíduo, em que em cada seção foram relacionadas patentes: A (Necessidades humanas), B (Operações de processamento), C (Química/Biotecnologia e Metalurgia), D (Têxteis e Papel), E (Construções fixas), F (Engenharia mecânica, Iluminação, Aquecimento, Armas e Explosão), G (Física) e H (Eletricidade).

A prospecção realizada revelou patentes destinadas ao desenvolvimento de processos para o tratamento do resíduo, extração de algum metal de interesse, e

patentes voltadas para a aplicação do PAE como matéria-prima no desenvolvimento de produtos destinados ao consumidor final, sendo esta última, alvo do estudo deste trabalho

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

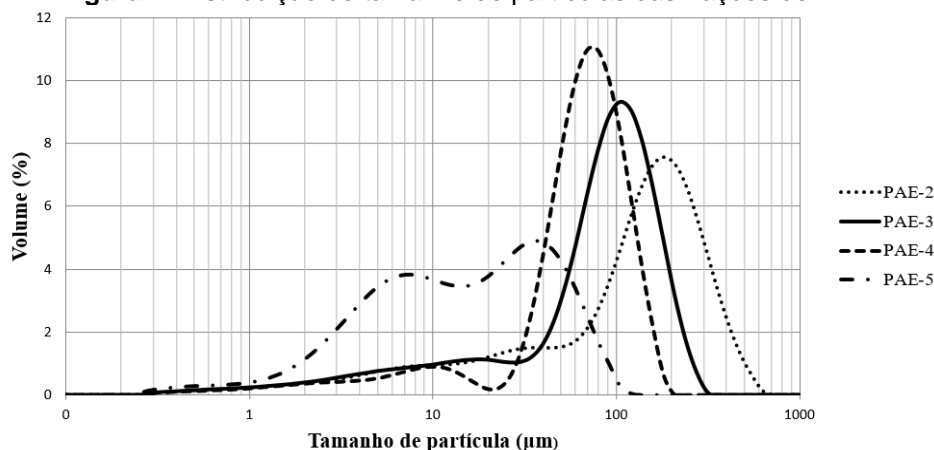
O PAE foi submetido à análise granulométrica para separar a amostra em faixas de acordo com as peneiras utilizadas e determinar as porcentagens em massa de cada destas (Tabela 1). Aproximadamente 50% do total da amostra ficou retido na peneira de 65 mesh (tamanho superior a 212 μm), entretanto, foi possível observar que tal fração possuía a presença de impurezas (como madeira, vidro e plástico), possivelmente oriundos durante o processo de estocagem, o que interferiu no seu peso. Não foi realizado nenhuma estimativa da influência dessas impurezas no peso desta fração. A cerca disto, e baseado na literatura apresentada [5], pode-se apontar a faixa com tamanho de partículas menor que 53 μm como a mais representativa, visto que esta apresentou 28,5% da massa total.

Tabela 1. Nomenclatura e massa das frações obtidas por peneiramento

Fração	Peneiras (mesh)	Faixa granulométrica (μm)	Massa retida (%)
PAE-1	65	> 212	49,55
PAE-2	150	212-105	11,51
PAE-3	200	105-75	5,48
PAE-4	270	75-53	4,96
PAE-5	Fundo	< 53	28,50

A distribuição granulométrica mostra que o resíduo é constituído principalmente por partículas classificadas pela literatura como partículas grandes [7], principalmente para as frações PAE-2 e PAE-3. Na fração PAE-2, 90% das partículas apresentaram diâmetro inferior a 290 μm , já para a fração PAE-3, este valor foi inferior a 160 μm . A fração PAE-4 apresentou 90% do diâmetro de suas partículas abaixo de 112 μm . Todas as frações citadas anteriormente apresentaram comportamento de distribuição unimodal (Figura 1).

Figura 1. Distribuição do tamanho de partículas das frações de PAE.



Para a fração passante do ensaio de peneiramento, denominada de PAE-5, 90% das partículas possuíam tamanho inferior a 50 μm . Pode-se observar nessa fração a presença de dois picos de distribuição (distribuição bimodal), denotando a existência de duas populações distintas de partículas centrada em torno de dois pontos. Uma porção constituída por finos de 10 nm a 7 μm , e outra mais grossa composta por partículas de 7 a 120 μm . Essa distribuição heterogênea do PAE também foi observada nos resultados obtidos por Tang et al. [13].

Por tratar-se de um resíduo industrial perigoso, faz-se necessário conhecer o teor individual de cada elemento presente, quer seja para o desenvolvimento de novas tecnologias de extração de algum metal presente, quer para o desenvolvimento deste em alguma aplicação específica, ou em função dos riscos ambientais associados ao seu descarte ou armazenamento. A Tabela 2 apresenta a composição química do pó de aciaria como recebido e das frações obtidas no ensaio de peneiramento, determinada pelo ensaio de fluorescência de raios X (FRX).

Tabela 2. Composição química obtida por FRX para as frações estudadas e do PAE como recebido

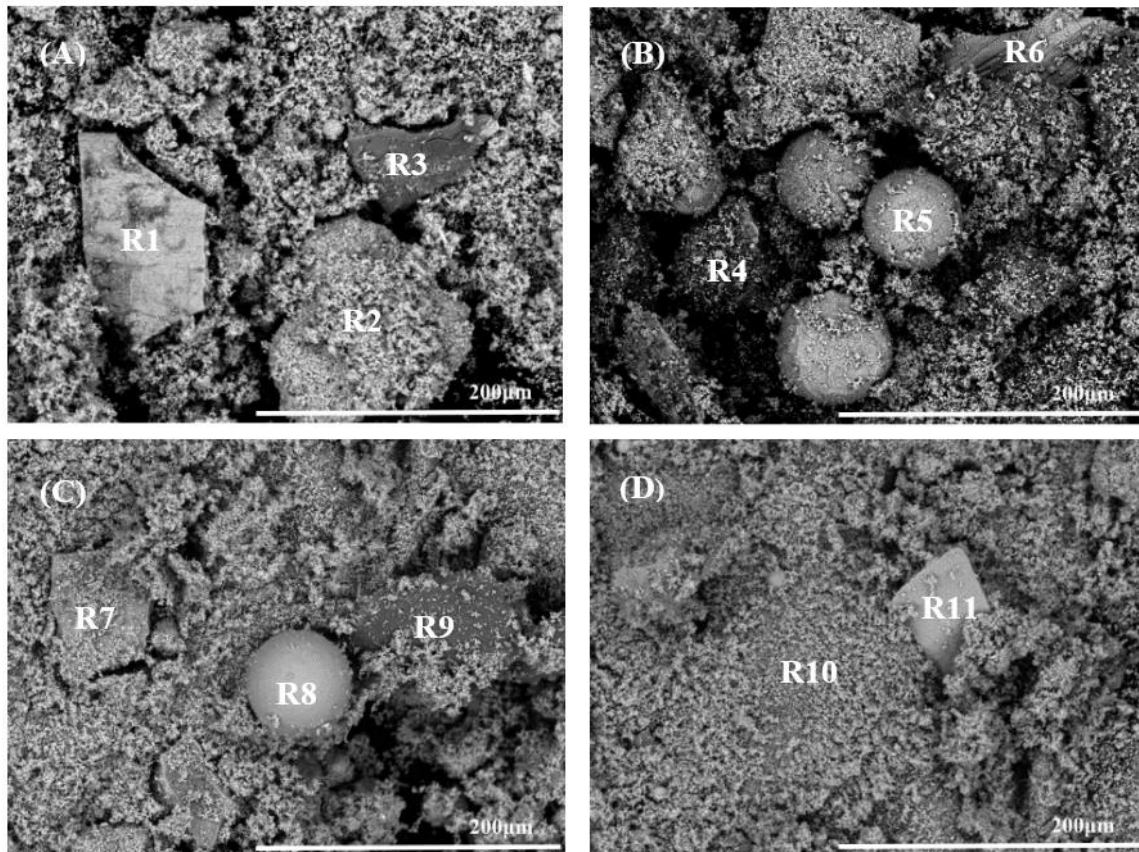
Parâmetro Analisado (%)	Amostra como recebida	PAE-2	PAE-3	PAE-4	PAE-5
Fe ₂ O ₃	35,33	41,58	41,04	35,34	32,69
ZnO	21,01	18,99	20,60	17,70	26,06
Na ₂ O	1,99	1,86	1,89	3,26	3,15
MgO	3,28	2,90	3,28	3,23	3,98
Al ₂ O ₃	2,92	3,53	3,78	3,46	2,49
SiO ₂	11,42	18,14	15,16	12,40	7,54
P ₂ O ₅	0,35	0,39	0,37	0,34	0,34
K ₂ O	0,35	0,46	0,46	0,40	0,31
CaO	6,38	6,18	7,27	6,80	6,26
MnO	2,62	2,26	2,50	2,19	3,09
CdO	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02
PbO	0,76	0,70	0,79	0,66	0,84

O PAE apresentou majoritariamente a presença de Ferro (35,33%) e Zinco (21,01%) em sua composição, estando dentro da faixa observada na literatura [5,10]. Foi possível a detecção de elementos residuais como o P em todas as frações, além de elementos que são volatilizados durante o processo de fabricação, como o Pb e Cd. Elementos oriundos da adição de escorificantes (Ca) e elementos formadores de escória (Si, Al e Mg) [7]. As concentrações de elementos, como zinco e chumbo em PAE dependem das características da sucata carregada nos fornos. Observa-se ainda que os teores de zinco aumentam em função da redução do diâmetro das partículas do resíduo, enquanto o tamanho do óxido de ferro apresentou comportamento inverso, corroborando o exposto no trabalho de Guézennec et al. [5]. Os teores de Pb e Cd, elementos estes de alta periculosidade na composição do resíduo, se mantiveram dentro dos teores mínimos observados na literatura, sugerindo uma boa seleção da sucata utilizada no processo produtivo.

A morfologia das partículas e os elementos identificados por EDS, bem como seus percentuais são apresentados na Tabela 3 para as microrregiões analisadas na Figura 2. O ferro foi identificado em todas as imagens analisadas, principalmente associado as partículas identificadas como R2 (Fig. 2-A), R5 e R6 (Fig. 2-B), R8 (Fig. 2-C) e R11 (Fig. 2-D). O zinco, também foi identificado em todas microrregiões, e de

foma significativa para as partículas R2, R4 e também para a região R7, associado as partículas submicrométricas, classificadas como partículas finas, menores que 20 μm) [7]. Essas regiões podem ser identificadas como sendo compostas possivelmente por zincita e franklinita, em função do percentual dos elementos em questão e pelo tamanho das partículas. O silício foi associado as partículas na região R3 e R9. Um estudo mais detalhado pode ser observado na literatura [9].

Figura 2. Imagens de MEV das partículas de PAE.



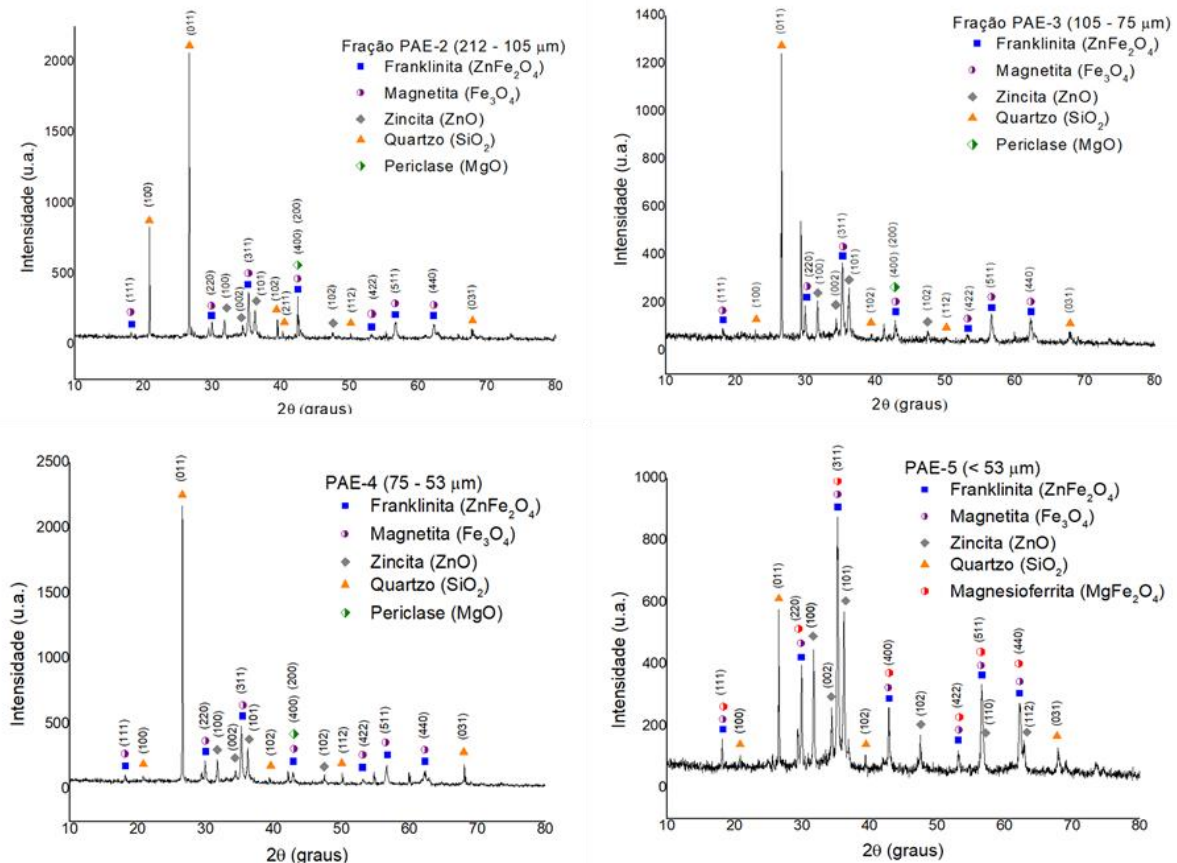
Os teores de todos os elementos observados nas frações, assim como na amostra inicial encontravam-se dentro das faixas descritas na Tabela 3. Apesar disto, um alto teor de ferro presente no resíduo indica grande perda do elemento de interesse do processo.

Tabela 3. Análise semiquantitativa por EDS para as microrregiões identificadas na Figura 3.

Figura	Região	Fe (%)	Zn (%)	Si (%)	Mn (%)	Ca (%)	Mg (%)
A	R1	83,8	2,1	6,3	2,9	1,8	0,7
	R2	29,8	44,1	1,5	3,4	5,8	6,8
	R3	17,8	19,2	37,8	1,6	5,9	0,5
B	R4	50,1	24,3	3,6	5,1	7,9	1,4
	R5	85,0	11,0	-	-	1,5	-
	R6	88,9	5,7	2,2	1,9	0,6	-
C	R7	16,8	57,7	3,4	1,3	5,4	-
	R8	81,0	7,9	0,4	2,5	-	-
	R9	15,1	15,3	56,9	1,8	1,7	-
D	R10	45,0	37,8	2,1	6,4	3,9	3,2
	R11	86,7	7,4	-	2,3	0,3	-

A Figura 3 apresenta os resultados das frações do resíduo de pó de aciaria a fim de se analisar as fases cristalográficas presentes, principalmente, as associações do ferro e do zinco, em que a indexações dos picos dessas fases foi realizada por meio das cartas JCPDS.

Figura 3. Difratogramas obtidos para as frações de PAE.



Em virtude dos resultados de MEV e EDS discutidos anteriormente, pode-se concluir a partir dos difratogramas que os elementos predominantes, ferro e zinco, encontraram-se principalmente associados na forma de óxidos, e óxidos complexos com estrutura de espinélio. O PAE é um resíduo de mineralogia complexa, no qual o zinco foi encontrado nas fases Zincita (ZnO), carta JCPDS (Nº 01-1136) e Franklinita ($ZnFe_2O_4$), carta JCPDS (Nº 02-1043). O ferro, por sua vez, além de estar associado a franklinita, também pôde ser observado na fase Magnetita (Fe_3O_4), carta JCPDS (Nº 01-1111). Tanto a franklinita quanto a magnetita apresentam os mesmos índices de Miller (111), (220), (311), (400), (422), (511) e (440), corresponde a sequência de ângulos de difração (2θ): 18,3°; 30,2°; 35,7°; 43,2°; 53,5°; 57,0° e 62,6°. Enquanto que para a magnetita, a sequência de ângulos de difração para os mesmo índices é: 18,2°; 30,2°; 35,5°; 43,0°; 53,5°; 57,2° e 62,5°.

Além destas fases, ainda se constatou a presença de picos de elementos minoritários formadores de escória, como Quartzo (SiO_2), Magnésio (Periclase) carta JCPDS (Nº 01-1235).

Para as Frações PAE-4 e PAE-5, além das fases identificadas nas frações anteriores, pode-se constatar a presença da fase Magnesioferrita ($MgFe_2O_4$), carta JCPDS (Nº 01-1114), que também apresenta estrutura do tipo espinélio, e os

mesmos índices de Miller, enquanto a sequência de ângulos de difração (2 θ) corresponde a: 18,4°; 30,1°; 35,5°; 43,2°; 53,5°; 57,3° e 62,8°. HAVLÍK et al. [5] realizaram estudo similar do PAE, em que o mesmo foi submetido ao ensaio de peneiramento, e argumentaram em seus resultados que as observações de algumas fases não foram possíveis para as frações separadas, sendo possível apenas para a média das amostras. Como relatado em outros trabalhos [4,5,9,10], os picos de todas as fases mencionadas apresentam sobreposição em algum grau. Tais sobreposições podem interferir na identificação destas fases, principalmente das fases magnetita, hematita, magnesioferrita e cromita, as quais pertencem ao grupo do espinélio e ferrita de cálcio. Apesar disto, a ocorrência da fase magnetita é maior do que a fase hematita.

Por ser descrito como um subproduto de difícil reciclagem devido à diversidade de elementos presentes, a aplicação do PAE em novos produtos ou o desenvolvimento de processos para seu tratamento torna-se complexo. A caracterização de resíduos possibilita identificar a composição do resíduo, bem como suas características, além de fornecer informações para uma avaliação adequada das potencialidades econômicas, tratamento, e destino adequado, auxiliando na determinação da possível aplicabilidade do resíduo.

A prospecção de patentes nos bancos europeu (EPO) e brasileiro (INPI), priorizando o desenvolvimento de produtos que utilizam o PAE em sua composição, resultou em 63 patentes na base do INPI entre 1993 a 2015, sendo 54% pertencente a processos químico e metalúrgico (Classe C) de acordo com o IPC. Enquanto, na base EPO foram registradas 194 patentes entre 1981 a 2017, sendo 70% pertencentes a Classe C. As patentes foram categorizadas pelo período de depósito, país de origem do solicitante e parâmetros obtidos pela caracterização do resíduo (composição química, diâmetro das partículas, principais fases cristalográficas indicadas e o percentual do resíduo adicionado ao produto desenvolvido).

A mineração de patentes permitiu qualificar os documentos encontrados de acordo com os critérios descritos na metodologia, sendo possível encontrar 8 patentes concedidas no banco de dados do INPI, e 8 patentes no banco EPO, entretanto, os documentos de referência 14, 18 e 19 se encontram em ambos os bancos, o que pode representar o interesse do depositante em proteger o seu produto no mercado brasileiro, ou a tendência de utilização desses materiais em diversos produtos como cimento [15], pigmentos anticorrosivos [18] e briquetes [19], realizados pelos EUA, Canadá e Alemanha respectivamente.

De acordo com a análise dos documentos de patentes, o desenvolvimento de tecnologia na área de pesquisa do presente estudo vem se aperfeiçoando e apesar dos primeiros registros de patentes serem de 1981 (EPO), atualmente os resíduos do PAE tem ganhado representatividade nos últimos 10 anos perante a indústria em diversas áreas, sendo às áreas química/biotecnologia e metalúrgica (Classe C) as de maior representatividade de acordo com os registros de patentes do INPI e EPO. Na base de dados do INPI, 50% das patentes foram depositadas por pessoas físicas, empresas ou instituições governamentais nacionais, ou mesmo parceria entre estas.

Outras áreas como necessidades humanas (Classe A), tem tido destaque no desenvolvimento de produtos para tornar inócuo ou menos agressivo os agentes químicos nocivos efetuando uma transformação química e composição de materiais para revestimentos ou roupas para proteção contra agentes químicos nocivos [22]. Nas demais seções, como a seção B (operações de processamento) foram identificados produtos voltados a pigmentos anticorrosivos para tintas [18],

estabilizador em concreto [24] e aplicação em material de construção polimérico [25], sendo estes últimos registrados na base europeia de patentes. Para as demais classes (D, E e F) após mineração dos documentos de patentes, não se identificou nenhuma patente que atendessem aos critérios estudados.

Tabela 4. Patentes referente ao desenvolvimento de produtos utilizando PAE.

Patentes disponíveis na base do INPI								
Ano de depósito	Origem	IPC	Descrição/Aplicação	Fases	Composição do PAE utilizado	Diâmetro	Percentual Aplicado	Ref.
1993	EUA	C04 B	Matéria-prima para fabricação de tijolos	-	-	-	20-60%	14
1993	Brasil	C04 B	Cimento alternativo para fabricação de artefatos de cimento	Fe ₂ O ₃	-	-	-	15
2003	Brasil	C05 D	Óxido de zinco para fabricação de fertilizantes	-	-	-	8-99% (ZnO)	16
2003	Brasil	C05 D	Óxidos de zinco e cobre para fabricação de fertilizantes	-	-	-	-	17
2006	Canadá	B29 B	Fabricação de pigmentos anticorrosivos para tintas	Espinélicos e Fe ₃ O ₄	25-32% (Fe)	≤ 20µm	-	18
2011	Alemanha	C21 C	Briquete para fabricação de escória espumosa em FEA	Fe ₂ O ₃ ou Fe ₃ O ₄	≥ 10% de Fe	-	-	19
2014	Coreia do Sul	C10 L	Fabricação de briquetes	-	-	0,3-1µm	-	20
2015	Brasil	C04 B	Fabricação de ladrilhos hidráulicos	Fe ₂ O ₃	-	≤ 62 µm	20%	21
Patentes disponíveis na base da EPO								
1994	EUA	A62 D	Agente tamponador para a composição de produto cimentício contendo PAE.	-	-	-	63-76%	22
1997	EUA	C04 B	PAE estabilizado como matéria-prima de clínquer Portland	-	-	-	-	23
2011	Arábia Saudita	B09 B	Aplicação de PAE como estabilizador em concreto e mistura	-	39% (Fe)	-	3% 1 a 2Kg por 100 litros de água de lavagem	24
2011	Espanha	B09 B	Aplicação em material de	Óxidos de ferro	40% (Fe)	1-50 µm	40-80%	25

			construção polimérico	e zincita				
2012	Arábia Saudita	C04 B	Aplicação como matéria-prima em cimento	-	29% (Fe)	-	6-8%	26
2014	Arábia Saudita	C09 K	Mistura contendo PAE para aumento de resistência e durabilidade de solo	-	-	-	20% - Sub-base de pavimento asfáltico 30% - Sub-base de pavimento de concreto	27

O campo dos materiais cerâmicos se destaca como o segmento de maior desenvolvimento tecnológico relativo à utilização do PAE em produtos, entre os quais pode se destacar seu emprego na composição de cimento, ou em artefatos cimentícios. Cerca de 60% das patentes analisadas tem como fim este campo de aplicação. Os parâmetros analisados para a caracterização dos resíduos estudados, bem como, a apresentação das informações referentes a estes em cada patente está relacionada aos parâmetros críticos ou relevantes em função da necessidade de cada aplicação. Comparações dos resultados obtidos através da análise de patentes com a caracterização do PAE estudado oriundo de Pernambuco, possibilitam constatar que todas as fases destacadas nas patentes, também puderam ser observadas no resíduo em estudado. O teor de ferro foi observado em teores semelhantes aos demais. Aplicações semelhantes às apresentadas nas patentes [21] e [25] possibilitaria o reaproveitamento de aproximadamente 35% do PAE produzido localmente. O desenvolvimento de pesquisas baseadas na argumentação descrita na patente [27] indica ser um campo promissor para aplicação do resíduo, além de promover a exploração da potencialidade dos depósitos de argila local.

4 CONCLUSÃO

Estudos de caracterização de materiais são relevantes à medida que possibilitam estabelecer as características, propriedades e desempenho dos materiais. O pó de aciaria é um resíduo de baixa granulometria, composto majoritariamente por ferro e zinco, nas fases franklinita, magnetita e zincita, com partículas submicrométricas de zincita, em sua maioria de morfologia quase esférica. A fabricação de briquetes para reinserção do resíduo na produção do aço, e os materiais cerâmicos foram os principais os campos de aplicação do PAE apontados através da análise de patentes. A aplicação do resíduo em materiais poliméricos tem sido ainda pouco explorada. A partir dos critérios analisados, constatou-se que o resíduo regional estudado possui características semelhantes às observadas nos resíduos empregados nas patentes para o desenvolvimento de novos produtos, demonstrando possuir um alto potencial para aplicações nos segmentos identificados.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte financeiro, e bolsa de pós-graduação a aluna Elizeth Oliveira Alves. Ao Centro de Tecnologias Estratégicas do Nordeste (CETENE) pela assistência generosa com o DRX, ao Laboratório de Caracterização Tecnológica de Minérios – PPGEMinas/UFPE pela disponibilidade nos ensaios de análise granulométrica e ao Departamento de Engenharia Mecânica – DEMEC/UFPE.

REFERÊNCIAS

- 1 Montar as referências conforme indicado nas normas (estilo Vancouver) para DAS B, PRAKASH S, REEDY PSR, MISRA VN. An overview of utilization of slag and sludge from steel industries. *Resour. Conserv. Recycl.* 2007; 50: 40-57.
- 2 BUI A, VU T, NGUYEN V. Study on recycling of electric arc furnace dust. *Mater. Sci. Forum* 2015; 804: 127-130.
- 3 BAKKAR, A. Recycling of electric arc furnace dust through dissolution in deep eutectic ionic liquids and electrowinning. *J. Hazard. Mater.* 2014; 280: 191-199.
- 4 GRILLO FF., TENÓRIO JAS, OLIVEIRA JR de. Caracterização e adição de poeira de aciaria elétrica em ferro-gusa. *R. Esc. de Minas.* jul-set 2013; 66(3): 301-307.
- 5 HAVLÍK T, SOUZA BV, BERNARDES AM, SCHNEIDER IAH, MISKUFOVÁ A. Hydrometallurgical processing of carbon steel EAFdust. *J. Hazard. Mater.* 2006; 135 Part B: 311-318.
- 6 XIA DK, PICKLES CA. Caustic roasting and leaching of electric arc furnace dust. *Can. Metall. Quart.* 1999; 38(3): 175-186.
- 7 GUÉZENNEC AG, HUBER JC, PATISSON F, SESSIECQ P, BIRAT JP, ABLITZER D. Dust formation in electric arc furnace: Birth of the particles. *Powder Technol.* 2005; 157: 2-11.
- 8 ARAUJO JA. SCHALCH, V. Recycling of electric arc furnace (EAF) dust for use in steel making process. *J. Mater. Res. And Technol.* 2014; 3(3): 274-279.
- 9 OMRAN M, FABRITIUS T. Effect of steelmaking dust characteristics on suitable recycling process determining ferrochrome converter (CRC) and electric arc furnace (EAF) dusts. *Powder Technol.* 2017; 308: 47-60.
- 10 DUTRA AJB, PAIVA PRP, TAVARES LM. Alkaline leaching of zinc from electric arc furnace steel dust. *Miner. Eng.* 2006; 19: 478-485.
- 11 LEDESMA EF, JIMÉNEZ JR, AYUSO J, FERNÁNDEZ JM, BRITO J de. Experimental Study of the mechanical stabilization of electric arc furnace dust using fluid cement mortars. *J. of Hazar. Mater.* 2017; 326: 26-35.
- 12 ALVES EO; AMARO DRA; SILVA OLIVEIRA, E.C.de; ARAÚJO FILHO, O.O.de; ALVES, K.G.B. Study on effect of eafd particulate reinforcement in aa7075 aluminum matrix composites. *Mater. Res.* 2018; 21(6): e20170779.
- 13 TANG H, WANG L, SUN W, HU Y, HAN H, ZHAI J. Electric arc furnace dust as magnetic carrier particles for removal of micro-fine particles from suspensions. *Sep. Purif. Technol.* 2017; 176: 220-230.
- 14 FRAME SW, DANNEMANN SIEMSEN, BIGLER & IPANEMA MOREIRA. Processo para a produção de tijolos e tijolo. US PI 9301502-0 A2. 12 abr. 1993, 13 out. 1993.
- 15 MENDES JÚNIOR SIDERURGIA S.A, BARBOSA MTG, LOPES LF. Resíduos do processo de fusão do aço a ser utilizado na construção civil como artefato de cimento. BR PI 9302955-1 A2. 22 jul. 1993, 01 mar. 1995.
- 16 PROCESSOS QUÍMICOS DE METAIS LTDA (PROCEQUIM), PERINI S.A., WUNDERLICH S. Pó de exaustão ou de aciaria para preparação de compostos de óxidos diversos granulados para agricultura. BR PI 0304683-4 A2. 22 set. 2003, 17 mai. 2005.
- 17 PROCESSOS QUÍMICOS DE METAIS LTDA (PROCEQUIM), PERINI S.A., WUNDERLICH S. Pó de exaustão ou de aciaria para preparação de concentrações de

- óxido de zinco para agricultura e processo de mistura. BR PI 0302917-4 A2. 06 ago. 2003, 12 abr. 2005.
- 18 FERRINOV INC, SHAN G, MORENCY M, FONTAINE D. Pigmentos anticorrosão derivados da poeira de um forno de arco voltaico e contendo cálcio sacrificial. CA PI 0611831-3 A2. 19 jun. 2006, 28 ago. 2010.
 - 19 SMS GROUP GMBH, ROSE L, REICHEL J, SOUZA O de. Briquete para produção de uma escória espumada na tecnologia eaf da produção de aço inoxidável. DE BR 11 2012 023384 0 B. 24 jan. 2011, 31 mai. 2016.
 - 20 LOTTE FINE CHEMICAL CO., LTD., KIM TH, CHOI NW, KIM TH, DAVID DO NASCIMENTO ADVOGADOS ASSOCIADOS. Composição para formar um briquete de pó de forno elétrico a arco, e briquete de pó de forno elétrico a arco. KR BR 11 2017 000857 2 A2. 29 dez. 2014, 05 dez. 2017.
 - 21 XAVIER J da S, LIMA EA de, DUARTE DS. Processo de fabricação de ladrilho hidráulico piso tátil a partir de pó de aciaria elétrica e produto resultante do mesmo. BR 10 2015 031484 1 A2. 16 dez. 2015, 20 jun. 2017.
 - 22 SMITH CL, CONVERSION SYSTEMS, INC. Buffering of cementitious hazardous waste compositions containing electric arc furnace dust. US 5569152 A. 21 dez. 1994, 29 out. 1996.
 - 23 HILTON RG, CONVERSION SYSTEMS, INC. Use of stabilized EAFD as a raw material in the production of a Portland cement clinker. US 5853474 A. 02 jun. 1997, 29 dez. 1998.
 - 24 AL-ZAID RZ, AL-NEGHEIMISH AI, ALHOZAIMY AM, KHAN MI. KING SAUD UNIVERSITY, AL-ZAID RZ, AL-NEGHEIMISH AI, ALHOZAIMY AM, KHAN MI. Eafd stabilizer for concrete drum and mixer. WO 2013032569 A1. 26 ago. 2011, 07 mar. 2013.
 - 25 RENNA AIF, FABRA LFC, GUERISOLI CB, RIBERA JMC, ÁLVAREZ FE, RUBÍ MS, CUTRONA CS. UNIVERSITAT DE BARCELONA, UNIVERSITAT DE LLEIDA, RENNA AIF, FABRA LFC, GUERISOLI CB, RIBERA JMC, ÁLVAREZ FE, RUBÍ MS, CUTRONA CS. Inertization of electric-arc furnace dust by means of the stabilizing integration thereof in a construction material. ES WO2013014318 A1. 26 jul. 2011. 31 jan. 2013.
 - 26 AL-MUTLAQ FM. SAUDI BASIC INDUSTRIES CORPORATION. Use of non-chloride cement accelerator and electric arc furnace dust in cement. US 9278888 A1. 01 nov. 2012, 08 mar. 2016.
 - 27 AL-AMOUDI OSMB, AL-HOMIDY AAK, MASLEHUDDIN M, SALEH TA. KING FAHD UNIVERSITY OF PETROLEUM AND MINERALS. Method for enhancing strength and durability of weak soils. US 2016168460 A1. 16 dez. 2014. 16 jun. 2016.