

OPORTUNIDADES PARA ADIÇÃO DE PÓ DE ACIARIA ELÉTRICA NO CIMENTO*

Josué Claudio Metz¹
Feliciane Andrade Brehm²
Carlos Alberto Mendes Moraes³
Regina Célia Espinosa Modolo⁴

Resumo

A concepção de desenvolvimento sustentável tem resultado no aumento de pressões ambientais para a melhoria da eficiência na utilização de recursos, e para a significativa redução das emissões e da geração de resíduos. No processo de fabricação de aço nas siderúrgicas com fornos elétricos a arco ocorre a geração do resíduo sólido denominado pó de aciaria elétrica (PAE). O PAE é constituído por diferentes óxidos metálicos. Contém cromo, chumbo e cádmio e, por isso, é classificado como resíduo classe I – Perigoso pela NBR 10004 [1]. Gerado em grandes quantidades diariamente em todo o país, o PAE é disposto principalmente em aterros industriais. A indústria da construção civil, devido a quantidade de matérias-primas consumida e variedade de produtos disponíveis – cimento, concreto, agregado, cerâmica, entre outros, apresenta-se como alternativa para a reciclagem de resíduos gerados em outros setores da econômica. Estudos indicam o potencial uso do PAE na produção de materiais da construção civil, tais como cimento e concreto. O objetivo deste trabalho é apresentar uma revisão da literatura sobre a viabilidade técnica da adição do PAE ao cimento como alternativa de valorização desse resíduo. Os estudos sugerem que em quantidades próximas a 1%, a adição de PAE não afeta de forma significativa as propriedades do cimento.

Palavras-chave: Pó de aciaria elétrica; Siderurgia; Resíduos sólidos; Cimento.

OPPORTUNITIES TO ADD ELECTRIC ARC FURNACE DUST IN CEMENT

Abstract

The sustainable development concept has resulted in increased environmental pressures to improve the efficient use of resources and reduction of emissions and waste generation. In the steelmaking process through electric arc furnaces, dust generation occurs which is called electric arc furnace dust (EAFD). EAFD is composed by different metal oxides. Some common elements those constitute this dust, chromium, lead and cadmium, and therefore, waste is classified as class I – hazardous by NBR 10004 [1]. PAE has been generated in large quantities every day across the country and it has mainly landfilled. Due to expressive amount of raw materials consumed in civil construction industry and also the variety of products available (cement, concrete, aggregate, ceramics, among others), this seems to be an alternative for waste recycling generated in other sectors. Studies indicate the potential use of the EAFD in the production of construction materials such as cement and concrete. The objective of this paper is to present a literature review about the technical feasibility of adding EAFD in cement as an alternative valorization of this waste. Studies suggest that in amounts up to 1%, the addition of EAFD does not affect significantly cement properties.

Keywords: Electric arc furnace dust; Steel mill; Solid wastes; Cement.

¹ Estudante de pós-graduação no PPG Engenharia Civil (NucMat), Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS, São Leopoldo, RS, Brasil.

² Profa. Dra, PPG Engenharia Civil (NucMat), Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS, São Leopoldo, RS, Brasil.

³ Prof. Dr, PPG Engenharia Civil e Engenharia Mecânica (NucMat), Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS, São Leopoldo, RS, Brasil.

⁴ Dra, PPG Engenharia Civil (NucMat), Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS, São Leopoldo, RS, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

A indústria siderúrgica gera uma quantidade elevada de resíduos e coprodutos. Para cada tonelada de aço bruto produzido, foram gerados 594 kg de resíduos e coprodutos em 2013 e classificados como escória de alto forno, escoria de aciaria, pós, finos, lamas e outros. A escória de alto forno representa 37% dos resíduos e coprodutos gerados, sendo integralmente utilizada na produção de cimento e na construção civil no sudeste do Brasil. A escória de aciaria, que representa 29% dos resíduos e coprodutos gerados, tem aplicação na construção de bases de estradas (62%), nivelamento terrestre (20%), uso agrônômico (7%), entre outros [2].

O pó de aciaria elétrica (PAE) é um resíduo sólido da indústria siderúrgica, gerado como particulado nas emissões provenientes da fabricação do aço em fornos elétricos a arco (FEA) e composto, principalmente, de diferentes óxidos metálicos. O pó de aciaria também é gerado em aciarias a oxigênio que operam com conversores [3]. O mesmo é gerado durante a fusão da sucata de aço em fornos elétricos, onde os metais pesados são volatilizados, oxidados e, posteriormente, solidificados e retidos sob a forma de pó fino em filtros especiais instalados no sistema de limpeza do fluxo de gases dos fornos elétricos a arco [4]. A Figura 1 apresenta o esquema do mecanismo de formação do PAE na indústria siderúrgica

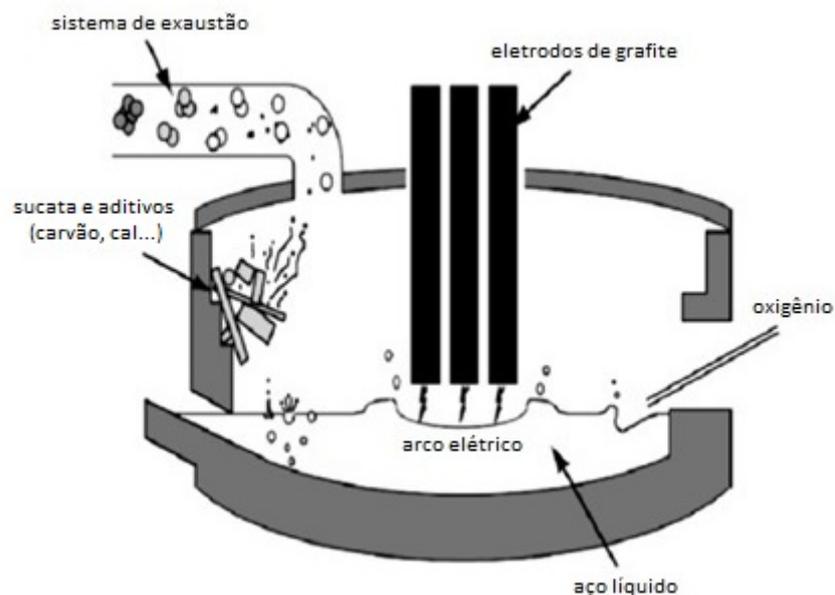


Figura 1. Mecanismo de formação do PAE na indústria siderúrgica.
Fonte: Adaptado de Guézennec [5].

A ausência de uma solução técnica viável para o tratamento e reciclagem do resíduo de PAE, que é gerado diariamente em grandes quantidades nas indústrias siderúrgicas de todo o país, tem motivado trabalhos científicos que buscam identificar soluções mais sustentáveis para que o PAE possa ter um destino mais adequado que a disposição em aterro industrial, podendo gerar ganhos ambientais e econômicos.

Dentre as possíveis soluções para a destinação do resíduo sólido industrial está o seu uso como matéria-prima. A indústria da construção civil tem se mostrado um setor altamente promissor para a reciclagem de resíduos gerados por diferentes setores da economia. O consumo de elevadas quantidades de matéria-prima, o custo dos materiais tradicionais de construção e a demanda energética na

fabricação dos insumos – principalmente aço e cimento, estimulam o desenvolvimento de pesquisas para avaliar o aproveitamento de resíduos na produção de cimento. Alinhado às necessidades técnicas, ambientais e econômicas, a reciclagem de resíduos, subprodutos e coprodutos em substituição aos minerais naturais pode reduzir custos de produção e melhorar a qualidade dos materiais produzidos.

Estudos indicam o potencial uso do PAE na produção de materiais da construção civil, tais como cimento e concreto [6-8]. Entretanto, seu uso como aditivo sempre foi limitado em função da redução do tempo de pega acarretado principalmente pelo ZnO presente no PAE. Conforme Al-Zaid [6], porém, quando adicionado em quantidades inferiores a 1%, o ZnO presente no PAE não chegaria a afetar de forma significativa o tempo de pega. Alternativamente, o uso combinado de ZnO juntamente com outro componente mineral também apresentou resultados positivos no tempo de pega do cimento [9].

Neste contexto, o objetivo deste trabalho é apresentar uma revisão da literatura sobre a viabilidade técnica da adição do PAE ao cimento como alternativa para destinação sustentável desse resíduo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Pó de Aciaria Elétrica (PAE)

A produção de aço segue basicamente duas rotas tecnológicas, com algumas possíveis variações ou combinações entre elas: usinas integradas (preparação da carga, redução, refino, lingotamento e laminação) e usinas semi-integradas (refino, lingotamento e laminação). A diferença básica entre estes dois tipos está na ausência das etapas de preparação da carga e redução do minério de ferro nas usinas semi-integradas e na matéria-prima utilizada na produção do aço. Na rota integrada predomina o minério de ferro, com uma pequena quantidade de sucata de aço, enquanto que as usinas semi-integradas (fornos elétricos a arco - FEA) usam principalmente sucata [2,3].

O PAE é constituído por um pó muito fino, normalmente contendo metais pesados em concentrações variáveis, cuja disposição em aterros é problemática devido aos impactos ambientais negativos envolvidos [10]. A morfologia do PAE é predominante esférica e na forma de aglomerados, com 85% das partículas com granulometria abaixo de 10 μ m [11].

A quantidade de PAE gerado representa aproximadamente 1% do aço produzido. Em todo o mundo, estima-se que 70% do PAE seja enviado para aterros industriais, enquanto que os 30% restantes são processados para recuperação de Zn e outros fins [7]. Conforme Guézennec [5], para cada tonelada de aço produzido são gerados entre 15 e 25 kg de PAE.

A NBR 10004 [1], que estabelece a classificação dos resíduos sólidos, define que lodos ou poeiras provenientes do sistema de controle de emissão de gases empregado na produção de aço primário e fornos elétricos, no qual se enquadra o PAE, são classificados como resíduo classe I – Perigoso, k061, por conter cromo hexavalente, chumbo e cádmio.

2.2 Incorporação de Resíduos ao Cimento

A indústria da construção civil tem trabalhado no desenvolvimento de novos materiais, com atributos que permitam a redução de custos, a agilidade de execução, a durabilidade e a melhoria das propriedades do produto final, visando, também à redução da extração de materiais naturais através do emprego de resíduos recicláveis, solucionando o problema de gerenciamento desses resíduos [12].

A escassez de matérias-primas naturais, problemas de disposição indiscriminada de resíduos e do aquecimento global, devido às emissões de gases de efeito estufa, podem ser considerados resultados da rápida industrialização. Cada setor tenta o seu melhor para combater e minimizar esses problemas globais. Em estruturas de concreto, a principal iniciativa consiste em reduzir o teor de cimento Portland no mesmo devido às elevadas emissões no seu processo de fabricação. A inclusão de aditivos minerais como: cinzas volantes, sílica ativa, escória granulada de alto forno, cinza de casca de arroz, metacaulim, entre outros, na substituição parcial do concreto, auxilia nesse esforço [13]. Os materiais de construção têm sido vistos como alvo para a reciclagem de resíduos devido à enorme quantidade de recursos primários e não-renováveis consumidos, assim como a flexibilidade e variedade de produtos disponíveis - cimento, concreto, agregados, cerâmica, etc. [14]. Na produção de cimento os resíduos também podem ser utilizados como matéria-prima secundária e como aditivo na etapa de moagem, além de servirem como fonte de energia para o processo de produção do clínquer, conforme mostrado na Figura 2. Além disso, aditivos convencionais, tais como materiais pozolânicos naturais, e agregados convencionais, como brita e areia, podem ser substituídos por materiais secundários durante a produção de concreto [15].

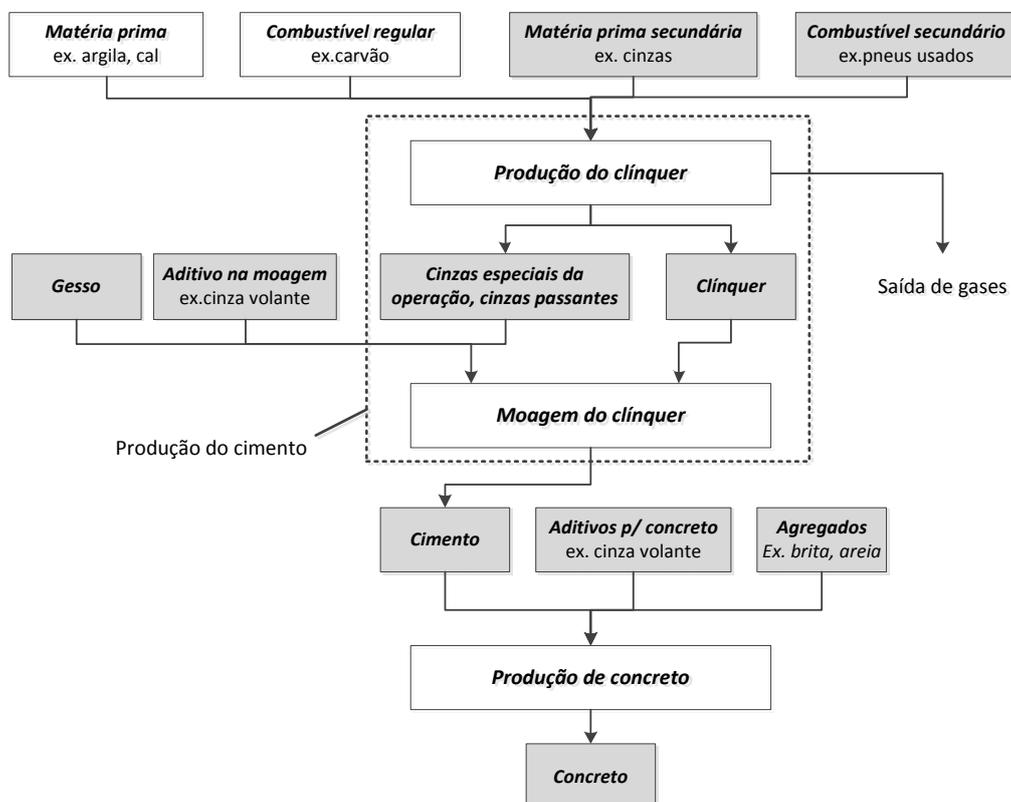


Figura 2. Materiais secundários na produção de cimento (adaptado de Achternbosch [15]).

2.3 Composição Química do PAE

Em estudos onde foram realizados ensaios de caracterização do PAE, constatou-se que os elementos predominantes na composição da PAE são Fe e Zn. Sofilíc [16] apresentaram o resultado de análises químicas de 14 trabalhos, ampliando o conhecimento relacionado aos elementos predominantes na composição do PAE, conforme Tabela 1.

Tabela 1. Composição química do PAE

Elementos	(% massa)	Elementos	(% massa)
Fe	10 a 45	Cu	< 3
Zn	2 a 46	S	1,5 a 2,5
Ca	1 a 25	C	0,11 a 2,36
Mg	1 a 12	K	0,35 a 2,3
Pb	0,4 a 15,14	Na	0,5 a 1,8
Cr	0,2 a 11	Al	0,1 a 1,5
Si	1 a 5	Cd	0,01 a 0,30
Mn	1 a 5		

Na Tabela 2 são apresentados resultados de trabalhos que realizaram a caracterização química do PAE gerado no Brasil, onde se destaca a predominância do Fe (36,46 a 48,96%) e Zn (13,3 a 28,47%) [17-20].

Tabela 2. Composição química do PAE gerado no Brasil

Elemento	Brehm [17] (% massa)	Machado [18] (% massa)	Silva [19] (% massa)	Martins [20] (% massa)
Fe	42	48,96	42	36,46
Zn	13,3	9,24	13,4	28,47
Ca	4,28	3,28	4,3	1,73
Mn	1,9	2,9	1,9	1,95
Pb	1,34		1,3	4,05
Mg	1,61	1,65	1,6	0,23
Si	1,29		1,3	1,12
K	0,97		1,6	0,77
Cr	1,05		2,1	0
Cl			1,6	1,48
C	1,1		1,1	
Na	0,84		0,7	
S	0,32		0,3	0,42
Cu	0,24		0,2	0,35
P	0,17		0,3	0,26
Al	0,29		0,3	0,11
Ni	0,19		0,2	0,04
Cd	0,11		0,1	0,07
Sn			0,04	0,23
Mo	0,07		0,07	
Co	0,05			
Ti				0,07
Sr				0,06
I				0,21
O (óxidos fixos)*				19,62
Perda ao fogo				2,31

* Óxido dos elementos mais estáveis.

Ao se analisar os dados, percebe-se que a quantidade total de Zn apresenta uma grande variabilidade. Enquanto Martins [20] identificou uma presença de Zn à proporção de 28,47% na composição do PAE, os demais autores obtiveram concentrações inferiores a 15%.

Segundo Brehm [21], a concentração de Zn no resíduo PAE vem aumentando em função da intensificação, por parte das indústrias siderúrgicas, da técnica de galvanização. Esse processo consiste no revestimento de um material metálico por outro com o intuito de protegê-lo contra corrosão. Entre os materiais utilizados para galvanização, o Zn ainda é o metal mais amplamente utilizado [22]. Ao se reutilizar a sucata galvanizada, o Zn nela contido acaba evaporando durante o processo de fusão, restando retido no PAE.

Um grau considerável de poeira é recuperado em unidades de depuração de gases durante a produção de aço a partir de sucata em fornos elétricos. Nos últimos anos, a presença de lixiviáveis Zn, Pb, Cd, Cr e outros metais dentro do pó levou o material a ser amplamente considerado como resíduo tóxico, não sendo adequado para a disposição em aterros [23].

2.4 Adição do PAE no Cimento

O cimento é o ligante mais utilizado e amplamente estudado. Solidificação com cimento é amplamente compreendido e simples, é acessível e resulta em um produto estável. Em geral os outros ligantes: cimento branco, pó de forno, cal, cinza volante, cinzas de combustível pulverizado, silicatos, etc, substituem parcialmente o cimento, o que pode ter um impacto positivo ou efeito negativo sobre a força, tempo de pega e hidratação [24].

Processos de estabilização/solidificação de resíduos são tratamentos destinados a melhorar o manuseio e as características físicas de líquidos ou semi-sólidos e diminuir a liberação de risco para o ambiente. A técnica de processamento normalmente envolve a mistura de resíduos com ligantes de solidificação. Estes processos baseiam-se nas reações de hidratação dos cimentos ou nas reações pozolânicas entre o cimento Portland ou cal e os materiais pozolânicos [25]. O material utilizado para a estabilização/solidificação não só solidifica os resíduos perigosos por meios químicos, mas também insolubiliza, imobiliza, encapsula, destrói ou de outra forma interage com componentes dos resíduos. O resultado dessas interações são produtos sólidos não perigosos ou menos perigosos do que resíduo original [24].

Com objetivo de estabilizar o Pb e o Zn presentes em quantidades superiores aos limites estabelecidos pelas normas ambientais norte americana e europeia para disposição de PAE em aterros, Salihoglu [26] avaliaram o uso de cimento Portland e de cal no processo de estabilização/solidificação. Os resultados indicaram que a composição de 30% PAE + 35% Cal + 35% de cimento Portland produzem lixiviados com índice de Pb e Zn inferiores aos estabelecidos pelas normas ambientais. Este resultado foi influenciado pelo pH entre 8,2 e 9,4 alcançado com a mistura, pois tanto Pb quanto Zn se mostraram insolúveis nestes níveis de pH.

No estudo do efeito do PAE nas propriedades de concretos produzidos com cimento Portland e formulações contendo sílica ativa e cinza volante, Maslehuddin [7] verificaram que com 2% de adição de PAE os tempos de início e fim de pega aumentaram para 16h 48min a 17h 50min (inicial) e 22h 57min a 25h 57min (final) em relação aos concretos de referência que registraram 3h 50min (inicial) e 5h22min (final). No entanto, o aumento nos tempos de pega não influenciaram no

desenvolvimento da resistência. A adição desta quantidade de PAE elevou a trabalhabilidade e a consistência, mas também aumentou o efeito de retração do concreto.

O tempo de pega também foi avaliado por Nochaiya [27] em pasta de cimento contendo nanopartículas de ZnO. Em amostras contendo 1, 2 e 5% em massa, verificou que os tempos de pega inicial e final aumentaram com o aumento de teor de ZnO na mistura. Com 1% de adição de ZnO o tempo de início de pega foi de 7:20hs e o final de 14:15hs. Com 2% de adição os tempos foram 8:15hs para início e 15:20hs para fim de pega, enquanto que com 5% de adição os tempos ficaram em 13:15hs e 23:40hs para início e fim de pega respectivamente. Para a pasta de referência sem adição de ZnO o início de pega ocorreu com 2:15hs e o fim de pega com 3:05 hs. O efeito do ZnO no retardo do tempo de pega do cimento concorda com trabalhos anteriores [7,8], que também verificaram o retardo das reações de hidratação do cimento contendo óxido de zinco.

De acordo com Achternbosch [15], a forma como os resíduos são incorporados ao cimento assumem importância decisiva pelo potencial risco ambiental que podem ser causados pelos elementos traços. Todos os elementos traços que entram no concreto são incorporados no endurecimento da pasta de cimento ao longo de sua vida útil, formando um ambiente estável para esses elementos. Após o fim da sua vida útil, a exposição do concreto moído a ação de intempéries é acelerada devido ao aumento da sua área superficial.

Cubukcuoglu [8] avaliaram o potencial de estabilização/solidificação e de metais pesados presentes no PAE em matriz contendo cimento e um subproduto do processo de calcinação de Magnesita denominado MgO de baixo grau (LGMgO). Em amostras com relação cimento/LGMgO de 1:2 e 1:4 e adições de 0%, 40% e 70% de PAE, foram avaliados o tempo de pega, resistência a compressão e o atendimento ao critério de lixiviação para disposição em aterros no Reino Unido. Os resultados dos ensaios de tempo de pega indicaram que para relação cimento/LGMgO 1:2 ocorreu aumento de 6% no tempo de início de pega e 70% no tempo de fim de pega em relação a amostra controle. Já com a relação cimento/LGMgO 1:4, a adição de 40% de PAE reduziu o tempo em 34% no início de pega e 16% no final de pega, enquanto a adição de 70% manteve o comportamento verificado na relação cimento/LGMgO 1:2. Com base na literatura, os autores confirmaram o efeito do PAE no retardo do processo de hidratação do cimento devido a presença de Pb e Zn no PAE. Quanto a redução do tempo de pega verificado na relação cimento/LGMgO 1:4 com 40% de PAE, pode ter se configurado um falso início de pega como efeito do espessamento provocado pela formação de excesso de ZnO sobre as partículas de cimento [8].

Com o objetivo de melhorar a reatividade de misturas metacaulinita-cimento, Taylor-Lange [9] produziram argamassa adicionando ZnO nas quantidades de 0,1%, 0,5% e 1% em massa. O ZnO foi adicionado em matrizes de cimento contendo 0% e 15% de metacaulinita calcinada em temperaturas de 500°C, 550°C, 600°C e 650°C. Avaliando o processo de hidratação através de calorímetro isotérmico, verificaram que o uso combinado de metacaulinita com ZnO praticamente elimina o retardo das reações químicas (por conter metacaulinita altamente desidroxilada), permitindo que uma variedade de resíduos contendo ZnO, tal como PAE, possam ser utilizados como adição ao concreto.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos trabalhos apresentados verifica-se que o Fe e o Zn são os principais constituintes do PAE, e que a concentração de Zn vem aumentando em razão da crescente utilização de sucata metálica na produção de aço.

O Zn presente no PAE tem papel importante no processo de hidratação do cimento, influenciando especialmente no tempo de pega.

Os estudos sugerem que adições de PAE em quantidades próximas a 1%, sem o uso combinado com outro material ou resíduo, não afetam de forma significativa as propriedades do cimento.

Por fim, a adição de PAE combinado com outro material ou resíduo que reduza os efeitos do Zn na hidratação do cimento poderá indicar a viabilidade técnica da adição destes ao cimento, inclusive em quantidades superiores a 1%, resultando em significativos benefícios ambientais oriundo da destinação desse material. Entre esses benefícios, pode-se citar a redução da disposição de resíduo em aterro industrial, a valorização e reciclagem do resíduo perigoso, além da diminuição do consumo de matérias-primas naturais na produção do cimento.

REFERÊNCIAS

- 1 Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 10004: Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.
- 2 Instituto Aço Brasil. Relatório de Sustentabilidade 2014 [página da internet]. Rio de Janeiro, 2014 [acesso em 04 mar. 2015]. Disponível em: http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/sustentabilidade/downloads/Relatorio%20de%20Sustentabilidade_2014_web.pdf.
- 3 Vargas AS. Estudo da viabilidade do uso de PAE a arco na confecção de blocos de concreto para pavimentação [tese de doutorado]. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS); 2002.
- 4 Kavouras P, Kehagias T, Tsilika I, Kaimakamis G, Chrissafis K. Glass-ceramic materials from electric arc furnace dust. *Journal of Hazardous Materials*. 2007;A139:424–429.
- 5 Guézennec AG, Huber JC, Patisson F, Sessiecq P, Birat JP, Ablitzer D. Dust formation in Electric Arc Furnace: Birth of the particles. *Powder Technology*. 2005;157:2–11.
- 6 Al-Zaid RZ, Al-Sugair FH, Al-Negheimish AI. Investigation of potential uses of electric-arc furnace dust (EAFD) in concrete. *Cement and Concrete Research*. 1997;27(2):267–278.
- 7 Maslehuddin M, Awan FR, Shameem M, Ibrahim M, Ali MR. Effect of electric arc furnace dust on the properties of OPC and blended cement concretes. *Construction and Building Materials*. 2011;25:308–312.
- 8 Cubukcuoglu B, Ouki SK. Solidification/stabilisation of electric arc furnace waste using low grade MgO. *Chemosphere*. 2012;86:789–796.
- 9 Taylor-Lange SC, Riding KA, Juenger MCG. Increasing the reactivity of metakaolin-cement blends using zinc oxide. *Cement & Concrete Composites*. 2012;34:835–847.
- 10 Mutlaq FMA, Page CL. Effects of electric arc furnace dust on susceptibility of steel to corrosion in chloride-contaminated concrete. *Construction and Building Materials*. 2013;39:60–64.
- 11 Grillo FF. Recuperação do Zn e Fe da poeira de aciaria elétrica proveniente da produção de aço carbono [dissertação de mestrado]. Vitória: Instituto Federal do Espírito Santo; 2011.
- 12 Marques ML, Silva EJ, Velasco FG, Fornari Junior CCM. Potencialidades do uso de resíduos de celulose (dregs/grits) como agregado em argamassas. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*. 2014;16(4):423–431.

- 13 Mala K, Mullick AK, Jain KK, Singh PK. Effect of relative levels of mineral admixtures on strength of concrete with ternary cement blend. *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 2013;7(3):239–249.
- 14 Buruberri LH, Seabra MP, Labrincha JA. Preparation of clinker from paper pulp industry wastes. *Journal of Hazardous Materials*. 2015;286:252–260.
- 15 Achternbosch M, Bräutigam KR, Hartlieb N, Kupsch C, Richers U, Stemmermann P. Impact of the use of waste on trace element concentrations in cement and concrete. *Waste Manage & Research*. 2005;23:328–337.
- 16 Sofilic T, Mioc AR, Stefanovic SC, Radovid VN, Jenko M. Characterization of steel mill electric-arc furnace dust. *Journal of Hazardous Materials*. 2004;B109:59–70.
- 17 Brehm FA, Moraes CAM, Graffitti DF, Vilela ACF, Mafaldo I. Caracterização química, térmica e estrutural de pós de aciaria elétrica. In: XIII Seminário de Fusão, Refino e Solidificação, 2001, Bahia, Brasil.
- 18 Machado JGMS, Brehm FA, Moraes CAM, Santos CA, Vilela ACF, Cunha JBM. Chemical, physical, structural and morphological characterization of the electric arc furnace dust. *Journal of Hazardous Materials*. 2006;B136:953–960.
- 19 Silva MC. Reciclagem de pó de aciaria elétrica como matéria-prima na fabricação de materiais cerâmicos argilosos: controle das emissões atmosféricas de zinco [tese de doutorado]. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do SUL (UFRGS); 2006.
- 20 Martins FM, Reis Neto JM, Cunha CJ. Mineral phases of weathered and recent electric arc furnace dust. *Journal of Hazardous Materials*. 2008;154:417–425.
- 21 Brehm FA. Adição de óxido de zinco (ZnO) em pastas de cimento visando viabilizar a reciclagem de pós de aciaria elétrica (PAE) na construção civil [tese de doutorado]. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do SUL (UFRGS); 2004.
- 22 Santos AP, Rodrigues JS, Dick LFP. Estudo comparativo da resistência à corrosão de aços revestidos pelos processos de galvanização a fogo, galvannealing e galvalume. *Tecnol. Metal. Mater. Miner*. 2013;10(3):280-286.
- 23 Orhan G. Istanbul Leaching and cementation of heavy metals from electric arc furnace dust in alkaline medium. *Hydrometallurgy*. 2005;78:236–245.
- 24 Malviya R, Chaudhary R. Factors affecting hazardous waste solidification/stabilization: A review. *Journal of Hazardous Materials*. 2006;B137:267–276.
- 25 Asavapisit S, Naksrichum S, Harnwajanawong N. Strength, leachability and microstructure characteristics of cement-based solidified plating sludge. *Cement and Concrete Research*. 2005;35:1042–1049.
- 26 Salihoglu G, Pinarli V. Steel foundry electric arc furnace dust management: Stabilization by using lime and Portland cement. *Journal of Hazardous Materials*. 2008;153:1110–1116.
- 27 Nochaiya T, Sekine Y, Choopun S, Chaipanich A. Microstructure, characterizations, functionality and compressive strength of cement-based materials using zinc oxide nanoparticles as an additive. *Journal of Alloys and Compounds*. 2015;630:1-10.