

VIABILIDADE TÉCNICA DO USO DE MISTURAS DE ESCÓRIA DE ACIARIA ELÉTRICA E ESCÓRIA GRANULADA DE ALTO-FORNO A CARVÃO VEGETAL COMO AGLOMERANTE HIDRÁULICO*

Sandro de Oliveira Almada¹

Adriana Guerra Gumier²

Abdias Magalhães Gomes³

Resumo

Enquanto as escórias granuladas de alto-forno a carvão vegetal (EGAF_{CV}) no Brasil são regularmente vendidas para cimenteiras, as escórias de aciaria elétrica (EA_{FEA}) geralmente têm aplicações inconstantes e sem valor comercial. O objetivo é analisar a viabilidade técnica de misturas de EA_{FEA} e EGAF_{CV} como aglomerante hidráulico. A EA_{FEA} foi tratada por separação magnética, britagem, reaquecimento e resfriamento brusco em uma unidade piloto construída especificamente para este projeto no Laboratório do Centro de Produção Sustentável da UFMG. Depois EA_{FEA} e EGAF_{CV} foram moídas separadamente para caracterização. Para estudar a atividade pozolânica foram usadas diferentes proporções de misturas de EGAF_{CV}, EA_{FEA} e cimento Portland nas argamassas moldados em corpos de prova cilíndricos de 50 mm de diâmetro por 100 mm de comprimento para os testes de resistência à compressão aos 28 dias. Os resultados obtidos mostraram que o tratamento proposto aumentou o índice de vitrificação da EA_{FEA}, indicando a transformação de um material cristalino em um material parcialmente amorfo e mais reativo. A escória de aciaria elétrica tratada (EA_{FEA}TRAT) apresentou maior friabilidade, favorecendo sua moagem. Os resultados dos testes de resistência à compressão mostraram que as misturas de EA_{FEA} e EGAF_{CV} apresentaram resultados satisfatórios indicando oportunidade de uso como adições minerais.

Palavras-chave: Escória de aciaria; Escória granulada de alto-forno; Cimento Portland; Argamassa.

TECHNICAL VIABILITY OF THE USE OF EAF SLAG AND GRANULATED BLAST FURNACE SLAG (CHARCOAL) AS A HYDRAULIC BINDER

Abstract

While granulated blast furnace slag (EGAF_{CV}) in Brazil is regularly sold to cement makers, EAF steel slag (EA_{FEA}) usually has unstable and non-commercial applications. The objective is to analyse the technical feasibility of EA_{FEA} and EGAF_{CV} mixtures as hydraulic binders. EA_{FEA} was treated by magnetic separation, crushing, reheating and abrupt cooling in a pilot unit built specifically for this project at the Laboratory of the Sustainable Production Center of UFMG. Then EA_{FEA} and EGAF_{CV} were ground separately for characterization. In order to study the pozzolanic activity, different proportions of EGAF_{CV}, EA_{FEA} and Portland cement mixtures were used in the moulded mortar in cylindrical specimens 50 mm in diameter per 100 mm in length for the tests of compressive strength at 28 days. The results showed that the proposed treatment increased the vitrification index of EA_{FEA}, indicating the transformation of a crystalline material into a partially amorphous and more reactive material. The treated EAF steel slag (EA_{FEA}TRAT) presented higher friability, favouring its grinding. The results of the tests of resistance to compression showed

* Contribuição técnica ao 72º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 17º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, parte integrante da ABM Week, realizada de 02 a 06 de outubro de 2017, São Paulo, SP, Brasil.

that the mixtures of EA_{FEA} and EGAF_{CV} presented satisfactory results indicating the opportunity of use as mineral additions.

Keywords: Steel slag; Granulated blast furnace slag; Portland cement; Mortar.

- ¹ *Engenheiro Metalurgista, MsC, Especialista Meio Ambiente, Gerência Geral de Meio Ambiente, ArcelorMittal Brasil, Belo Horizonte, MG, Brasil.*
- ² *Engenheira Civil, PhD, professora associada, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil.*
- ³ *Engenheiro Civil, PhD, professor adjunto, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

Para se produzir uma tonelada de aço, geram-se, em média, 600 kg de resíduos, conforme Instituto Aço Brasil [1]. A figura 1 ilustra a geração específica de resíduos nas siderúrgicas brasileiras nos anos de 2010 a 2015.

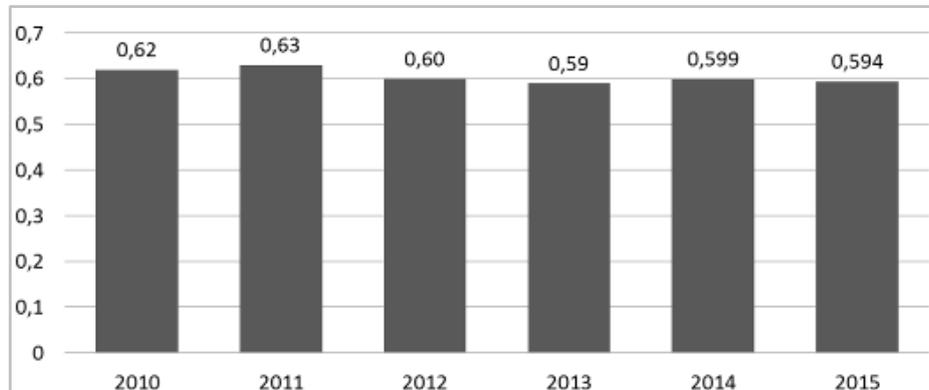


Figura 1. Geração específica de resíduos nas siderúrgicas brasileiras, adaptado de Instituto Aço Brasil (2013, 2014 e 2016).

De acordo com Instituto Aço Brasil [1], no Brasil foram geradas 8,5 milhões de toneladas de escórias de alto-forno e 5,5 milhões de toneladas de escórias de aciaria em 2015.

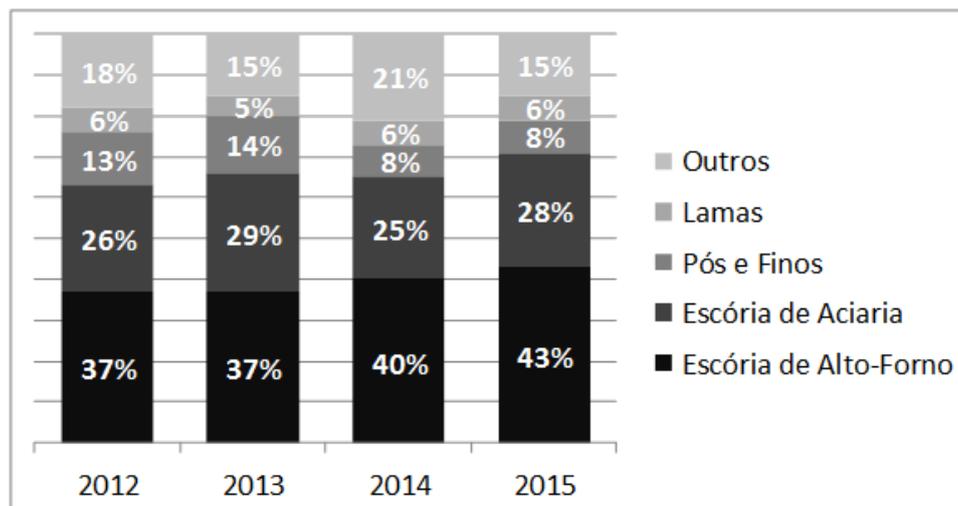


Figura 2. Geração de resíduos por tipo nas siderúrgicas brasileiras, adaptado de Instituto Aço Brasil (2013, 2014 e 2016).

Praticamente 100% das escórias granuladas de alto-forno (EGAF) são recicladas nas indústrias de cimento, pois além da composição química semelhante ao clínquer, durante o processo de granulação, através do resfriamento brusco o material torna-se amorfo conferindo-lhe propriedades cimentícias, tornando-o atrativo técnica e comercialmente [2]. As escórias de aciaria (EA) possuem uma composição química mais variável em função do tipo de aço produzido e do tipo de processo de produção e por questões de segurança usualmente o resfriamento é lento, tornando o material cristalino e, conseqüentemente, menos reativo [3] e menos atrativo para a indústria cimenteira. Estudos [4, 5, 6, 7, 8] apontam que as EA, se tratadas, têm potencial para serem usadas na produção de cimento sendo

essa uma aplicação mais nobre e valorizada do que as aplicações convencionais. Como não foram encontrados estudos sobre misturas de escórias granuladas de alto-forno a carvão vegetal ($EGAF_{CV}$) e escórias de aciaria elétrica a arco voltaico (EA_{FEA}), esta pesquisa torna-se relevante para a busca de uma alternativa interessante com ganhos técnicos, ambientais e econômicos.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Amostras de $EGAF_{CV}$ e EA_{FEA} foram coletadas na ArcelorMittal Juiz de Fora. A amostra de EA_{FEA} passou por um separador magnético (Figura 3) e posteriormente uma batelada de cerca de 50 kg foi aquecida em um forno a gás fabricado especificamente para esta pesquisa (Figura 4).



Figura 3. Separador magnético e peneira vibratória, arquivo próprio.



Figura 4. Forno rotativo, arquivo próprio.

A temperatura foi de 30°C para 1.080°C em 20 minutos ficando nesta temperatura por 15 minutos. Após o aquecimento, a amostra de EA_{FEA} foi basculada e resfriada bruscamente com jatos de água (Figura 5).



Figura 5. Vazamento e resfriamento brusco, arquivo próprio.

A EA_{FEA} aquecida e resfriada (EA_{FEA}TRAT) foi homogeneizada e quarteada. Aproximadamente, 0,5 kg das amostras de EGAF_{CV}, EA_{FEA} e EA_{FEA}TRAT foram moídas separadamente em moinho de painéis por 2 minutos até atingirem uma granulometria passante na malha 0,075 mm e encaminhadas para o laboratório da CRH Brasil onde foram determinadas a massa específica conforme a norma NBR NM 23 [9], a finura conforme a norma NBR NM 76 [10], o grau de vitrificação e o índice de refração por microscopia de luz transmitida. Foram preparadas argamassas de EGAF_{CV}, EA_{FEA} e EA_{FEA}TRAT com (Tabela 1) para confecção de 6 corpos de prova cilíndricos de 50 mm x 100 mm de cada mistura para determinação do índice de desempenho de materiais pozolânicos conforme NBR 5752 [11]. Para estes ensaios usou-se cimento CP II-32-F e também o cimento CP IV-32-RS, que é um tipo de cimento comum na região da siderúrgica e de MG. Para determinação da resistência à compressão, o rompimento dos corpos de prova foi feito numa máquina Pavitest/Contenco I3022C de 20 t no laboratório da UFMG. Para determinar o índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias usou-se a seguinte equação (Equação 1):

$$I = (fcB / fcA) \times 100 \quad (1)$$

onde:

I = Índice de Desempenho;

fcB = resistência à compressão média aos 28 dias da argamassa com cimento e material pozolânico (MPa);

fcA = resistência à compressão média aos 28 dias da argamassa apenas com cimento (MPa).

Tabela 1. Dosagem das misturas usadas na confecção dos 6 corpos de prova

Materiais	Dosagem das mistura em porcentagem (%)							
	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
Cimento	100	75.0	75.0	75.0	75.0	75.0	75.0	100
EGAF _{CV}		25.0			22.5	20.0	12.5	
EA _{FEA}			25.0		2.5	5.0		
EA _{FEA} TRAT				25.0			12.5	
Materiais	Dosagem das mistura em massa (g)							
	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
Cimento	624.0	468.0	468.0	468.0	468.0	468.0	468.0	624.0
EGAF _{CV}		156.0			140.4	124.8	78.0	
EA _{FEA}			156.0		15.6	31.2		
EA _{FEA} TRAT				156.0			78.0	

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Tabelas 2 e 3 apresentam os resultados das análises químicas, massa específica, área específica, grau de vitrificação e índice de refração das amostras coletadas na siderúrgica e da amostra tratada. A Tabela 4 mostra os resultados de pozolanicidade.

Com relação à basicidade binária, CaO / SiO₂, a EGAF_{CV} apresenta característica ácida enquanto a EA_{FEA} e a EA_{FEA}TRAT apresentam características básicas. Correlaciona-se a menor densidade da EA_{FEA}TRAT (2,90 g/cm³) em relação à EA_{FEA} (2,95 g/cm³) pelo fato daquela ter um menor teor de FeO.

A menor área específica ou finura da amostra de EA_{FEA} pode ser explicada pela maior dificuldade de moagem deste material.

O tratamento de aquecimento e resfriamento brusco propiciou uma melhor moagem verificada na maior área específica da amostra de EA_{FEA}TRAT. Este fato também foi verificado na pré-moagem manual antes da moagem no moinho de panelas, ou seja, a amostra de EA_{FEA}TRAT foi mais facilmente moída com o gral e pistilo do que a amostra de EA_{FEA}. Tal fato também foi verificado por Gumieri [5].

A EGAF_{CV} apresentou um grau de vitrificação de 79%. Após o tratamento, o grau de vitrificação da EA_{FEA} elevou de 59% para 70% na EA_{FEA}TRAT. Para cimentos britânicos o grau de vitrificação deve ser superior a 67%, de acordo com Malhotra *et al* [12]. A EGAF_{CV} e a EA_{FEA}TRAT apresentaram valores superiores, indicando potencial uso para a fabricação de cimentos.

Tabela 2. Análises químicas por espectrometria de FRX

Amostras	Oxidos (%)								
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	FeO	MnO	MnO ₂	Fe ₂ O ₃	Basicidade
EGAF _{CV} ⁽¹⁾	29.27	38.96	14.41	8.21	1.09	0.75	-	-	0.75
EA _{FEA} ⁽¹⁾	30.41	14.29	3.84	7.53	34.14	4.83	-	-	2.13
EA _{FEA} TRAT ⁽²⁾	40.9	23.9	4.8	9.9	18.98	-	2.1	6.74	1.71

Obs: (1) Lab. da própria siderúrgica, (2) Lab. da CRH Brasil.

Tabela 3. Massa específica, área específica, grau de vitrificação e índice de refração

Amostra	Massa específica (g/cm ³)	Área específica (cm ² /g)	Grau de vitrificação (%)	Índice de refração (n)
EGAF _{CV}	2.80	3,960	79	1.61 – 1.62
EA _{FEA}	2.95	2,210	59	1.50 – 1.51
EA _{FEA} TRAT	2.90	3,850	70	1.56 – 1.58

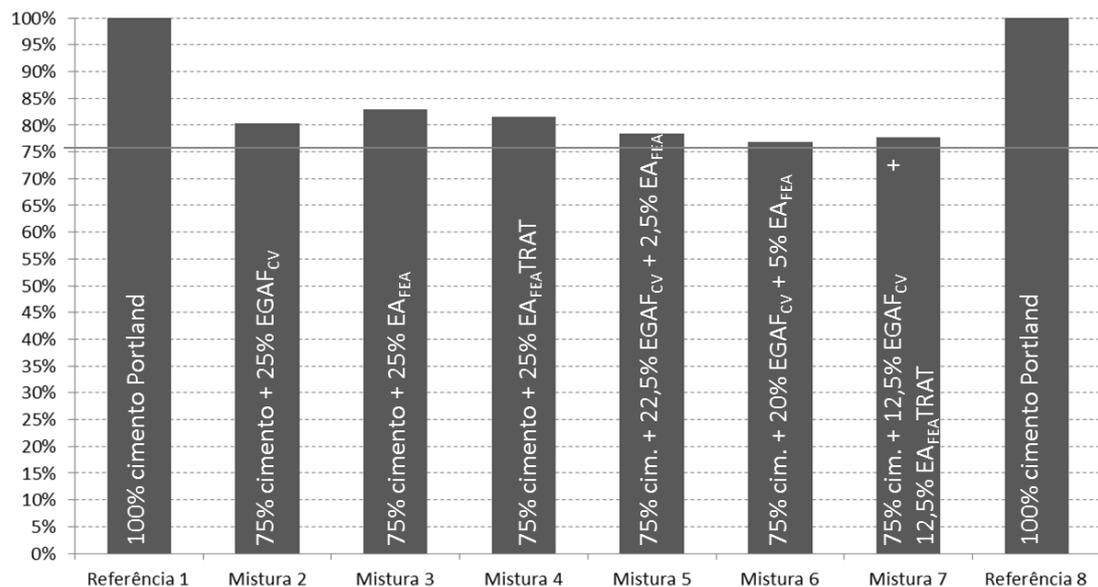
Tabela 4. Resistência à compressão média (28 dias) e índice de atividade pozolânica

Mix	CP II-F-32		CP IV-32-RS	
	MPa	IAP (%)	MPa	IAP (%)
#1 (100% cimento) referência	34.2	100	33.1	100
#2 (75% cimento + 25% EGAF _{CV})	27.5	80.4	24.1	72.4
#3 (75% cimento + 25% EA _{FEA})	28.4	83.0	25.4	76.3
#4 (75% cimento+ EA _{FEA} TRAT)	27.9	81.6	26.1	78.4
#5 (75% cimento + 22,5% EGAF _{CV} +2,5% EA _{FEA})	26.8	78.4	25.1	75.4
#6 (75% cimento + 20% EGAF _{CV} +5% EA _{FEA}) ⁽¹⁾	26.9	76.9	24.1	72.8
#7 (75% cim + 12,5% EGAF _{CV} + 12,5% EA _{FEA} TRAT) ⁽¹⁾	27.2	77.7	24.7	74.6
#8 (100% cimento) referência ⁽¹⁾	35.0	100	33.1	100

Obs.: (1) Fez-se uma segunda batelada de corpos de prova (#6 a #8) devido à quantidade de formas.

Mediante a norma NBR 12653 [13], para os testes de pozolanidade realizados com cimento Portland CP II-32-F, todas as misturas apresentaram resultados superiores a 75%, caracterizando-as como pozolanas. Para o cimento Portland CP IV-32-RS apenas as misturas #2 e #6 não atingiram o limite mínimo estabelecido na norma NBR 12653 [13].

As Figuras 6 e 7 mostram a variação do Índice de Atividade Pozolânica em função das misturas para os cimentos Portland CP II-32-F e CP IV-32-RS respectivamente.

**Figura 6.** Índice de atividade pozolânica (%) com CP II-32-F (28 dias).

Os resultados apresentados na Tabela 4 e na Figura 6 mostram que a EA_{FEA}, quando finamente moída, apresenta uma atividade maior do que a EGAF_{CV}, porém mostra que o tratamento térmico proposto não superou a amostra *in natura*, assim tal fato precisa ser estudado mais detalhadamente.

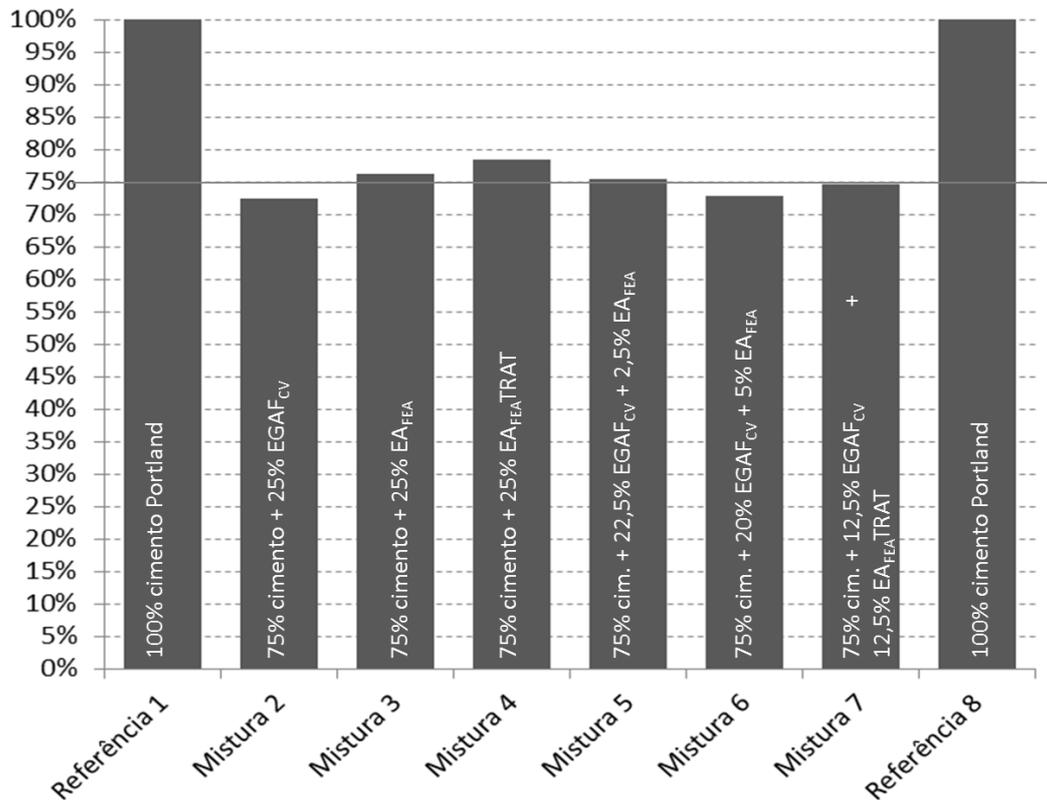


Figura 7. Índice de atividade pozolânica (%) com CP IV-32-RS (28 dias).

Os resultados apresentados na Tabela 4 e na Figura 7 mostra que a EA_{FEA}, quando finamente moída, apresenta uma atividade pozolânica maior do que a EGAF_{cv}, também mostra que o tratamento térmico proposto foi eficiente, pois a EA_{FEA}TRAT apresenta uma atividade maior do que a EA_{FEA}.

4 CONCLUSÃO

As escórias de aciaria quando resfriadas lentamente cristalizam-se e são difíceis de serem moídas. O tratamento térmico proposto alterou a estrutura da EA_{FEA} *in natura* conferindo à EA_{FEA}TRAT uma maior friabilidade e uma melhor moabilidade, viabilizando seu uso como adição mineral em cimentos Portland.

Após tratamento, o grau de vitrificação da EA_{FEA} elevou-se de 59% para 70% na EA_{FEA}TRAT, representando ganho de 19%, indicando potencial uso para a fabricação de cimentos Portland.

A determinação do índice pozolânico (IAP) para o cimento CP II-32-F conforme a norma NBR 12653:2012 Materiais pozolânicos – Requisitos [13] mostrou que o valor mínimo de 75% foi atingido para todas as misturas, evidenciando as propriedades pozolânicas das escórias. Para o cimento CP IV 32-RS, apenas as misturas #2 e #6 não atingiram o limite mínimo, mas considerando-se que o CP IV já é um cimento que contém pozolanas na sua composição, os resultados não inviabilizam o uso dos materiais EGAF_{cv}, EA_{FEA} e EA_{FEA}TRAT ou suas misturas como pozolanas, porém mais estudos são necessários para validar as proporções adequadas.

REFERÊNCIAS

- 1 Relatório de Sustentabilidade. Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil; 2013, 2014 e 2016.
- 2 Souza Júnior DS. Estudo do comportamento de escórias de alto-forno a carvão vegetal produzidas a partir de ativação a quente. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.
- 3 Geyer R T. Estudo sobre a potencialidade de uso das escórias de aciaria elétrica como adição ao concreto. [Tese de doutorado]. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul; 2001.
- 4 Dongxue L, Xinhua F, Xuequan W, Mingshu T. Durability of steel slag cement. Cement and Concret Research. 1997; 27(7): 983-987.
- 5 Gumieri AG. Estudo de viabilidade técnica da utilização de escórias de aciaria do processo LD como adição de cimentos. [Tese de doutorado]. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul; 2002.
- 6 Polisseni AE. Estudo da viabilidade técnica da utilização de escória de aciaria elétrica micronizada como material cimentício. [Tese de doutorado]. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul; 2005.
- 7 Tsakiridis PE, Papadimitriou GD, Tivilis S, Koroneos C. Utilization of steel slag for Portland cement clinker production, Science Direct – Journal of Hazardous Materials. 2008; 152, 805-811.
- 8 Barbosa MR. Caracterização geoambiental da escória de aciaria de cinco estados brasileiros. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. 2013.
- 9 ABNT NBR NM 23:2001 – Cimento Portland – Determinação da massa específica.
- 10 ABNT NBR NM 76:1998 – Cimento Portland – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine).
- 11 ABNT NBR 5752:2014 Materiais pozolânicos – Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias.
- 12 Malhotra VM, Mehta PK. Pozzolan and cementitious material. Advances in Concrete Technology. Amsterdam; 1996.
- 13 ABNT NBR 12653:2012 Materiais pozolânicos – Requisitos.