

# ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICA DA ADIÇÃO DE AREIA DE FUNDIÇÃO EM MATRIZES GEOPOLIMERICAS<sup>1</sup>

Alexandre Silva De Vargas<sup>2</sup>  
Eduarda Trevizani Valandro<sup>3</sup>  
Giovanna Vanini Camerini<sup>4</sup>  
Iohana Muller<sup>3</sup>  
Jéssica Froeloich<sup>4</sup>  
Gabriel Schmitz<sup>5</sup>

## Resumo

Os moldes e machos da fundição são construídos de uma mistura de areia base com resinas orgânicas ou inorgânicas. Uma parcela da AF volta ao processo. A outra é depositada em aterros. Portanto, este trabalho tem como objetivo avaliar o efeito da adição de AF em argamassas geopoliméricas. Foram adotados teores de AF, em substituição à areia de construção, de 25%, 50%, 75% e 100%. As análises de FTIR mostraram que o processo de policondensação dos aluminossilicatos, caracterizado pela banda  $1.000\text{ cm}^{-1}$ , foi prejudicado pela adição da AF. Para os ensaios de lixiviação, foi verificado que a concentração de Pb das argamassas contendo a AF não ultrapassou a concentração máxima permitida. Contudo, ficou acima para os extratos solubilizados, o que caracteriza que as argamassas contendo AF são materiais Classe II A – Não inertes.

**Palavras-chave:** Areia de fundição; Geopolímeros; Resíduos.

## STUDY OF THE ADDITION OF FOUNDRY SAND IN GEOPOLYMERS

### Abstract

The molds and cores of foundry are constructed from a mixture of sand based with organic or inorganic resins. A portion of the foundry sand (FS) back into the process. The other part is deposited in landfills. Therefore, this study aims to evaluate the effect of addition of FS in geopolymetric mortars. Levels of FS were adopted, replacing the construction sand, 25%, 50%, 75% and 100% (by mass). FTIR analysis showed that the polycondensation process of aluminosilicate, characterized by the band  $1,000\text{ cm}^{-1}$ , has been damaged by adding the FS. For leaching tests, it was found that the concentration of Pb in the mortar containing the residue did not exceed the maximum permissible concentration. However, it was above the value allowed for the solubilized extracts, which characterizes the FS mortars containing materials are Class II A - not inert.

**Key words:** Foundry sand; Geopolymer; Waste.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 67<sup>o</sup> Congresso ABM - Internacional, 31 de julho a 3 de agosto de 2012, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

<sup>2</sup> Professor Doutor, Mestrado em Materiais, Universidade Feevale, Novo Hamburgo, RS, Brasil.

<sup>3</sup> Estudante de Farmácia, Bolsista de Iniciação Científica na Universidade Feevale, RS, Brasil.

<sup>4</sup> Estudante de Arquitetura e Urbanismo, Bolsista de Iniciação Científica na Universidade Feevale, RS, Brasil.

<sup>5</sup> Estudante de Engenharia Química, Universidade Feevale, RS, Brasil

## 1 INTRODUÇÃO

Atualmente, sabe-se das grandes quantidades de resíduos gerados pela indústria e, conseqüentemente, do alto custo de descarte e suas ameaças ambientais. Esse panorama tem incentivado a realização de diversos estudos sobre a utilização de subprodutos em outros materiais para outras indústrias. Segundo Alonso-Santurde,<sup>(1)</sup> o setor de cerâmica pode incorporar grandes quantidades de resíduos sem modificações significantes no processo.

Um deles é a areia de fundição. Conforme Adegas<sup>(2)</sup> “a indústria da fundição é de importância básica ao desenvolvimento industrial [...] e o Brasil ocupa a sétima posição no ranking dos maiores países produtores de fundidos do mundo”.

Este resíduo é proveniente da mistura de areia base e resinas orgânicas (resinas furânicas, fenólicas, uretânicas- 1% a 2%, bentonita – 1%, pó de carvão – 2%, amido de milho – 1%), inorgânicas (silicato de sódio e cimento Portland) ou mistas (resinas fenólicas alcalinas), que dá origem aos moldes e machos, nos quais o metal é vazado para confecção de peças (ABIFA).<sup>(3)</sup>

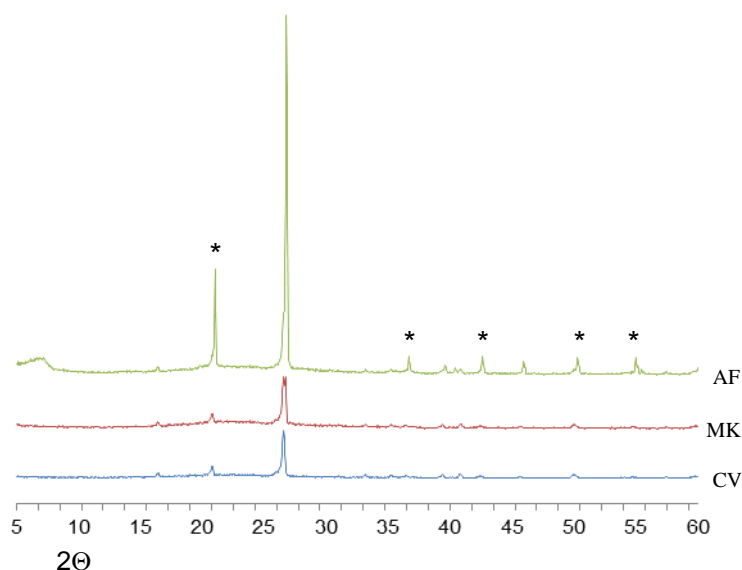
Segundo a NBR 10.004<sup>(4)</sup> a areia de fundição pode ser classificada como um resíduo classe I – Perigoso, ou como um resíduo classe II A – não inerte. Esta classificação irá depender do processo de moldagem/macharia utilizado.

A tendência de gerenciamento ambiental têm evoluído em função da regulamentação mundial estabelecida para as questões de desenvolvimento sustentável, de forma a substituir as alternativas corretivas por medidas preventivas (OCDE).<sup>(5)</sup> No final do processo de vazamento, grande parte da areia de fundição é reutilizada na produção de fundidos, no entanto há uma sobra dessa areia que não pode ser mais utilizada e necessita de tratamentos para regeneração ou deve ser descartada.

Portanto, este trabalho objetiva avaliar a viabilidade da adição de AF em matrizes geopoliméricas, através de ensaios ambientais e microestruturais.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

A cinza volante (CV) e a areia de fundição (AF) foram geradas em uma usina termelétrica e em uma indústria de fundição, respectivamente, localizadas no estado do Rio Grande do Sul. O metacaulim (MK) utilizado foi do tipo comercial. Na Figura 1 é apresentado o espectro de DRX da areia de fundição (AF), do metacaulim (MK) e da cinza volante (CV).



**Figura 1.** Espectro de DRX da areia de fundição (AF), do metacaulim (MK) e da cinza volante (CV).  
\* = quartzo ( $\text{SiO}_2$ )

**Tabela 1.** Composição química da cinza volante e metacaulim (% em massa)

Material	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{CaO}$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{TiO}_2$	$\text{MgO}$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{SO}_4$
CV	70,79	14,65	2,65	5,90	0,132	2,195	0,261	2,35	0,496
MK	58,39	38,2	0,11	1,7	0,27	1,24	0,24	0,18	0,17

A partir dos dados da Tabela 1, constata-se que a CV (classe F, segundo a ASTM C 6128-03)<sup>(6)</sup> possui baixo teor de cálcio e é constituída preponderantemente por  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

## 2.1 Ativadores Alcalinos

Os ativadores alcalinos empregados foram o hidróxido de sódio – NaOH - do tipo comercial, com pureza de 98%, e o silicato de sódio comercial -  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  (32,55% de  $\text{SiO}_2$  e 15,10% de  $\text{Na}_2\text{O}$ ).

## 2.2 Metodologia

A metodologia empregada avaliou a influência do teor de substituição da areia de construção por areia de fundição (AF), em argamassas álcali-ativadas, também denominadas argamassas geopoliméricas, sob os aspectos microestrutural e ambiental.

Para isso, foram preparadas argamassas à base de cinzas volantes (CV) e metacaulim (MK) álcali-ativadas, a partir de solução combinada de NaOH e  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ . A argamassa referência (branco) foi preparada contendo 70% de MK e 30% de CV, álcali-ativadas com solução contendo 50% de NaOH e 50%  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ . A partir desta argamassa foram adotados teores de areia de fundição, em substituição à areia de construção, de 25%, 50%, 75% e 100% (em massa).

Além disso, foram utilizadas quatro frações de areia – material retido entre as peneiras 2,4 – 1,2; 1,2 – 0,6; 0,6 – 0,30; 0,30 – 0,15 –, tanto para a areia de construção quanto para a areia de fundição, representando cada uma 25% do agregado miúdo, conforme estabelece a NBR 7215.<sup>(7)</sup> Na Figura 2 são apresentadas as areias utilizadas para o preparo das argamassas álcali-ativadas.



**Figura 2.** Agregado de areia comum e areia verde de Fundição.

O preenchimento e adensamento das argamassas nos moldes metálicos ( $\varnothing$  5 cm e altura 10 cm) para o preparo dos corpos-de-prova (CP's) foram realizados em quatro camadas, sendo necessárias em cada camada a aplicação de 30 golpes, conforme estabelece a NBR 7215<sup>(7)</sup>. Após, os CP's foram curados à temperatura ambiente até a idade de 28 dias.

Para as análises microestruturais foram utilizadas técnicas de análises instrumentais, como a espectroscopia vibracional na região do infravermelho com transformada de Fourier (FTIR). Para as análises ambientais as amostras foram preparadas para os ensaios de lixiviação (NBR 10005)<sup>(8)</sup> e de solubilização (NBR 10006).<sup>(9)</sup>

### 2.3 Consistência

Foi analisada a influência do teor de substituição da areia de construção por areia de fundição sobre a consistência da argamassa geopolimérica no estado fresco, com o auxílio da mesa de consistência (*flow table*). Esse ensaio é realizado enchendo-se um molde cônico, disposto sobre a mesa, com argamassa fresca, convenientemente adensada. Após desmoldada a argamassa é submetida a um esforço dinâmico, impelido por uma seqüência de 30 golpes desferido em um período de 30 segundos, produzida por uma peça excêntrica acoplada à parte inferior da mesa (Figura 3). A média de duas medidas de diâmetros ortogonais, em milímetros, da argamassa deformada após a ação mecânica descrita, define o índice de consistência. Para este trabalho foi definido uma consistência de 170 mm ( $\pm 20$  mm), pois a mesma foi ideal para o lançamento e adensamento das argamassas geopoliméricas nos moldes metálicos.



Figura 3. Mesa de consistência (flow table).

### 3 RESULTADOS

Tabela 2. Relação água/materiais secos (cinza volante/metacaulim) para as argamassas geopoliméricas com índice de consistência de 170 mm ( $\pm 20$  mm)

Amostra	Concentração Cinza Volante	Concentração Metacaulim	Concentração Silicato de Sódio*	Concentração Hidróxido de Sódio*	Relação água/CV+MK
0%	30%	70%	21%	21%	0,50
25%					0,71
50%					0,80
75%					1,04
100%					1,06
*Em relação à quantidade total de cinza volante e metacaulim.					

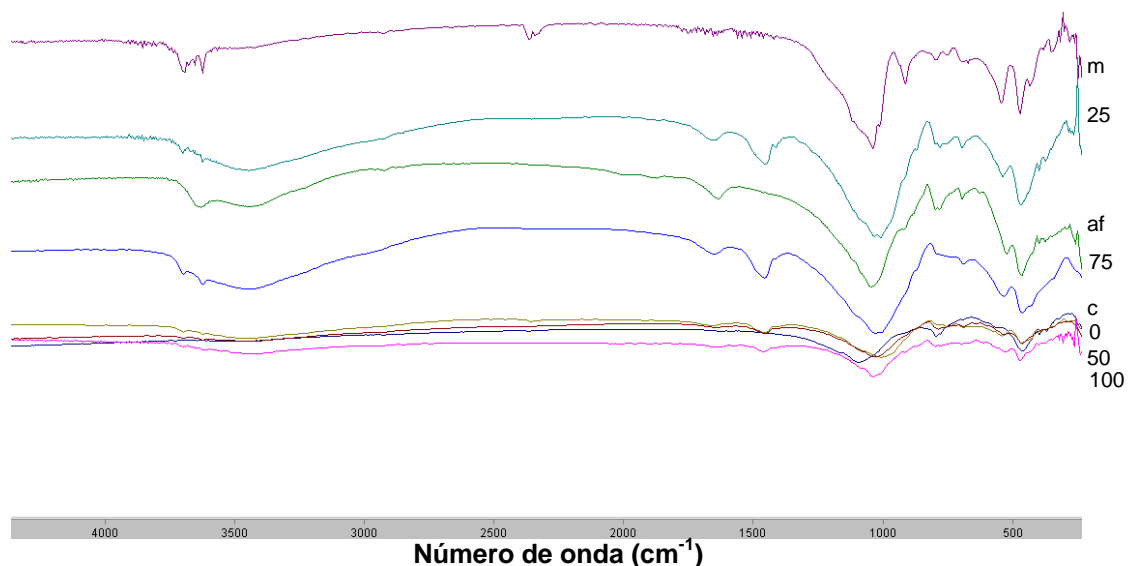


Figura 4. Análises de FTIR para as argamassas geopoliméricas contendo distintos teores de AF – idade de 28 dias (m: metacaulim; 25: AF 25%; af: AF; 75: AF 75%; CV: cinza volante; 0: AF 0%; 50: AF 50%; 100: AF 100%).

**Tabela 3.** Análise dos extratos lixiviados da AF e dos fragmentos das argamassas geopoliméricas com e sem adição do resíduo

Concentração (mg L <sup>-1</sup> )							
Elementos	AF	0%	25%	50%	75%	100%	Norma
Cádmio	n.d.	n.d.	n.d.	0,017	0,021	0,025	0,50
Chumbo	0,026	0,021	0,021	0,068	0,077	0,089	1,00
Cromo Total	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	5,00
Sódio	117,0	1242,0	1381,5	1415,0	3225,0	2875,0	-
Zinco	0,206	0,264	0,178	0,273	0,220	0,267	-
pH	3,54	4,97	5,00	4,92	4,95	4,93	-

\*conforme Anexo F da NBR 10.004<sup>(4)</sup>; n.d. = não detectado pelo método.

**Tabela 4.** Análise dos extratos solubilizados da AF e dos fragmentos das argamassas geopoliméricas com e sem adição do resíduo

Concentração (mg L <sup>-1</sup> )							
Elementos	AF	0%	25%	50%	75%	100%	Norma
Cádmio	n.d.	0,003	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0,005
Chumbo	0,019	0,076	0,029	0,397	0,370	0,349	0,01
Cromo Total	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0,05
Sódio	440	4419,0	4464,0	4310,0	4654,0	4115,0	200
Zinco	0,043	0,154	0,139	0,085	0,088	0,081	5,00
pH	8,13	12,72	12,83	12,46	12,31	12,43	-

\*conforme Anexo G da NBR 10.004<sup>(4)</sup>; n.d. = não detectado pelo método.

## 4 DISCUSSÃO

Na Tabela 2 são apresentadas as composições das argamassas geopoliméricas assim como a relação água/materiais secos (cinza volante/metacaulim), necessária para que as argamassas apresentassem consistência de 170 mm ( $\pm$  20 mm).

Conforme resultados de relação água/CV+MK, foi observado que à medida que o teor de AF foi aumentado na mistura, em substituição a areia de construção, foi necessário adicionar maior quantidade de água para manter a mesma consistência da massa (170 mm  $\pm$  20 mm). Segundo Armange et al.,<sup>(10)</sup> que utilizou AF em argamassas à base de cimento Portland, a maior quantidade de água para argamassas contendo maiores teores de AF se deve à hidratação da argila presente no resíduo. Além de absorver água, a argila diminui a trabalhabilidade da argamassa. Comportamento semelhante foi observado por Siddique et al.<sup>(11)</sup> em concretos contendo AF. Os autores verificaram que para a mesma consistência do concreto (teste de slump) foi necessária maior quantidade de aditivo superplastificante nos concretos contendo AF em relação aos concretos isentos do resíduo.



#### 4.1 Análises de FTIR

Conforme Figura 4, percebe-se que bandas próximas a  $3.450\text{ cm}^{-1}$  e a  $1.650\text{ cm}^{-1}$  indicam a presença de moléculas de água, ou seja, essas bandas seriam provenientes de água adsorvida da atmosfera pela cinza volante (CV). A Banda próxima a  $3.450\text{ cm}^{-1}$  está relacionada a vibrações de estiramento simétrico e assimétrico das moléculas de H-O-H, enquanto que a bandas em torno de  $1.650\text{ cm}^{-1}$  está relacionada com deformações angulares das ligações H-O-H. Bandas próximas a  $796\text{ cm}^{-1}$  e a  $693\text{ cm}^{-1}$  estão relacionadas à presença de alumínio e quartzo, respectivamente. Estes fazendo parte da composição química da CV.

Bandas próximas a  $800\text{ cm}^{-1}$ : vibrações de  $\text{AlO}_4$ . Bandas próximas a  $688\text{ cm}^{-1}$ : Vibrações simétricas de estiramento do Si - O - Si, em amostras de CV.

As bandas  $560$  e  $460\text{ cm}^{-1}$  também foram identificados nas amostras de CV antes e depois do álcali-ativação. Esses resultados são semelhantes aos obtidos por PALOMO et al.<sup>(12)</sup>, que identificaram as bandas em CV antes e depois da álcali-ativação. Para estes autores, a banda  $560\text{ cm}^{-1}$  é característica da presença de mulita, já regiões próximas a  $460\text{ cm}^{-1}$  são atribuídas a deformações angulares dos tetraedros  $\text{SiO}_4$  (O-Si-O), provavelmente relacionados ao quartzo.

Bandas próximas a  $1090\text{ cm}^{-1}$  estão relacionadas a vibrações de Si - O e vibrações de Al - O. Estas bandas estão bem definidas nas matérias-primas utilizadas como precursores geopoliméricos. Para Bakharev<sup>(13)</sup>, os modos de estiramento são sensíveis à composição Si-Al das redes e podem mudar para baixas frequências com o aumento do número de átomos de alumínio tetraédrico.

Bandas próximas a  $1.000\text{ cm}^{-1}$  são caracterizados por estiramentos assimétricos de Al - O - Si, característica da policondensação dos aluminossilicatos no processo de álcali-ativação. Conforme Van Jaarsveld et al.<sup>(14)</sup> é importante que o meio esteja fortemente alcalino para dissolver a sílica e alumínio, bem como hidrolisar a superfície das matérias-primas, para gerar a policondensação dos aluminossilicatos. Esta banda caracteriza os geopolímeros. Quanto melhor for o processo de policondesação dos aluminossilicatos, mais definida é a banda. As análises de FTIR (Figura 4) mostraram que o processo de policondensação dos aluminossilicatos, caracterizado pela banda  $1.000\text{ cm}^{-1}$ , foi prejudicado pela adição da AF.

Observando os espectros da CV (a) e do MK (b), é percebido que há um deslocamento das bandas próximas a  $1.090\text{ cm}^{-1}$  para bandas próximas a  $1.000\text{ cm}^{-1}$ . Contudo, este comportamento é menos evidente na medida em que o teor de AF é aumentado, mostrando o efeito negativo da AF na policondensação dos aluminossilicatos. Ou seja, as propriedades mecânicas do geopolímero estão relacionadas ao processo de policondensação dos aluminossilicatos. Se este processo não ocorre de maneira efetiva, a tendência é o material não apresentar características mecânicas ideais para a construção civil. Além disso, se a matriz não apresenta um bom desempenho mecânico, o encapsulamento dos metais pesados contidos na AF pode ser prejudicado. O fato da quantidade de água adicionada aumentar, na medida em que o teor de AF foi aumentado, também interferiu no processo de policondensação dos aluminossilicatos.

## 4.2 Análise Ambiental - Lixiviação e Solubilização

Na Tabela 3 estão apresentados os resultados das análises realizadas no extrato lixiviado obtido das amostras com idade de 28 dias, juntamente com os limites máximos estabelecidos na norma NBR 10.004<sup>(4)</sup>.

Observando os resultados dos ensaios do extrato lixiviado, pode-se perceber que o resíduo não apresentou nenhum dos parâmetros acima do limite estabelecido pela norma, portanto não exibe características que o torne perigoso, sendo classificado como resíduo classe II (não perigoso).

Na Tabela 4, são apresentados os resultados do estudo de classificação como inerte, o qual é baseado no ensaio de solubilização, bem como os limites máximos estabelecidos na norma NBR 10.004<sup>(4)</sup>. Segundo esta norma, a análise do extrato solubilizado indica que o chumbo e o sódio encontram-se acima do limite estabelecido, o que caracteriza tanto a AF quanto as argamassas geopoliméricas com adição deste resíduo como classe II A (não inerte). Isto mostra que o processo de solidificação/estabilização do chumbo nas argamassas geopoliméricas não foi eficiente. Em relação ao sódio, o acréscimo na concentração das argamassas está relacionado aos ativadores alcalino adotados neste trabalho (NaOH e Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>).

## 5 CONCLUSÃO

As argamassas contendo maiores teores de AF necessitaram maiores quantidades de água na mistura para manter a mesma consistência (170 mm ± 20 mm). Além disso, as argamassas com maior quantidade de AF apresentaram maior dificuldade de lançamento e adensamento nos moldes metálico, pelo aumento da coesão.

Sob o aspecto ambiental, não houve diferença na classificação entre a AF e as argamassas contendo o resíduo, independente do teor de AF estudado. Tanto a AF quanto as argamassas contendo o resíduo foram classificadas como Classe II A (não inerte). As argamassas contendo AF apresentaram concentrações de Pb superiores à amostra de AF nos ensaios de solubilização. Um estudo mais aprofundado neste comportamento deverá ser realizado em trabalhos futuros.

A adição da AF nas argamassas interferiu no processo de policondensação dos aluminossilicatos dos geopolímeros, caracterizado pela banda 1.000 cm<sup>-1</sup>. Esta banda mostra a formação de ligações do tipo Si-O-Al-O, responsáveis pelas características mecânicas do geopolímero. Se o processo não for eficiente, haverá perda da resistência do material e conseqüentemente baixo encapsulamento dos metais pesados.

## Agradecimentos

Agradecemos à Fapergs, ao CNPq e à Central Analítica da Universidade Feevale.

## REFERÊNCIAS

- 1 ALONSO-SANTURDE, R., COZ, A., VIGURI, J.R., ANDRÉS, A. Recycling of foundry by-products in the ceramic industry: Green and core sand in clay bricks. *Construction and Building Materials*, v. 27, p. 97-106, 2012.
- 2 ADEGAS, R. G. Perfil ambiental dos processos de fundição ferrosa que utilizam areis no estado do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, setembro de 2007.



- 3 ABIFA - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FUNDIÇÃO – COMISSÃO DE MEIO AMBIENTE. Manual de regeneração e reuso de areias de fundição. São Paulo: Associação Brasileira de Fundição, 1999, p.1-49.
- 4 NBR 10004, Resíduos Sólidos - Classificação. Rio de Janeiro, 2004.
- 5 OCDE (1985). Déchets solides. In: L'état de L'environnement. Paris:, 171-185.
- 6 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). Standard practice for use of apparatus for determination of length change of hardened cement paste, mortar, and concrete (C 490). Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, 1997.
- 7 NBR 7215, Associação Brasileira de Normas Técnicas. Cimento Portland – determinação da resistência à compressão, Rio de Janeiro, 1996.
- 8 NBR 10005, Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.
- 9 NBR 10006, Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.
- 10 ARMANGE, L. C. ET AL. Utilização de areia de fundição residual para uso em argamassas. Revista Matéria, v. 10, n. 1, p. 51 – 62, março de 2005.
- 11 SIDDIQUE, R. ET AL. Effect of used-foundry sand on the mechanical properties of concrete. Construction and Building Materials, v. 23, p. 976–980, 2009.
- 12 PALOMO, A. Et al. Alkali-activated fly ashes. A cement for the future. Cement and Concrete Research, v. 29, p. 1323-1329, 1999.
- 13 BAKHAREV, T. Geopolymeric materials prepared using Class F fly ash and elevated temperature curing. Cement and Concrete Research, v. 35, p. 1224– 1232, 2005.
- 14 VAN JAARSVELD, J. G. S. et al. The potencial use of geopolymeric materials to immobilise toxic metals: Part I. Theoria and Applications. Minerals Engineering, v. 10, n 7, p. 659 – 667, 1997.