

CARACTERIZAÇÃO DE RESÍDUOS DA FUNDIÇÃO DE FERRO E AVALIAÇÃO DE POSSÍVEIS APLICAÇÕES NA CONSTRUÇÃO CIVIL

IRON FOUNDRY WASTES CHARACTERIZATION AND EVALUATION OF POSSIBLE APPLICATIONS IN CIVIL CONSTRUCTION

Lucimara Bragagnolo 

Engenheira Ambiental e Sanitarista pela Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS), Campus Erechim. Pesquisadora na UFFS, Campus Erechim – Erechim (RS), Brasil.

Suélien Tonatto Ferrazzo 

Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental da UFFS, Campus Erechim – Erechim (RS), Brasil.

Felipe Paiva Muscope 

Acadêmico do curso de Engenharia Ambiental e Sanitária da UFFS, Campus Erechim – Erechim (RS), Brasil.

Eduardo Pavan Korf 

Doutor em Engenharia pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Professor pesquisador no Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental da UFFS, Campus Erechim – Erechim (RS), Brasil.

Gean Delise Leal

Pasquali Vargas 

Doutora em Engenharia Química pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Professora pesquisadora no Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental da UFFS, Campus Erechim – Erechim (RS), Brasil.

Clarissa Dalla Rosa 

Doutora em Engenharia de Alimentos pela UFSC. Professora pesquisadora no Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental da UFFS, Campus Erechim – Erechim (RS), Brasil.

Hugo Von Linsingen Piazzetta 

Doutor em Agronomia pela Universidade Federal do Paraná. Professor pesquisador no Curso de Agronomia da UFFS, Campus Erechim – Erechim (RS), Brasil.

Andréia Fátima Tormen 

Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Passo Fundo – Passo Fundo (RS), Brasil.

Endereço para correspondência:

Lucimara Bragagnolo – Universidade Federal da Fronteira Sul, Campus Erechim – Rodovia ERS 135, km 72, n. 200 – CEP: 99700-970 – Caixa Postal: 764 – Erechim (RS), Brasil – E-mail: lucimarabragagnolo@hotmail.com

Recebido em: 24/9/2018

Aceito em: 28/11/2018

RESUMO

A geração e a disposição de resíduos oriundos da fundição de metais despertam a necessidade de alternativas que promovam seu melhor reaproveitamento em processos produtivos. Assim, este estudo realizou a caracterização química, mineralógica e granulométrica de resíduos de fundição de ferro cinzento e nodular e avaliou sua aplicabilidade na construção civil. A areia verde, escória e material particulado apresentaram em sua composição química a presença majoritária de dióxido de silício (SiO_2), além de óxido de alumínio (Al_2O_3), óxido de potássio (K_2O) e óxido de ferro (Fe_2O_3). A análise mineralógica revelou a presença de quartzo em todos os resíduos e de hematita, na escória. Os três resíduos apresentaram granulometrias compreendidas entre 0,002 e 0,6 mm. Identificou-se que os resíduos possuem potencialidade de uso na produção de cimento, argamassas e materiais cerâmicos, como substituintes parciais dos agregados miúdos do concreto e como material da camada de sub-base de pavimentos.

Palavras-chave: produção de peças fundidas; subprodutos; composição química e mineralógica; reaproveitamento; cerâmica e concreto.

ABSTRACT

The generation and disposal of foundry waste result in the need for alternatives or solutions that promote a better waste reuse in the production processes. Having this in mind, this study carried out the chemical, mineralogical and granulometric characterization of gray and nodular iron foundry wastes and evaluated their applicability in civil construction. The green sand, slag and particulate material presented, in their chemical composition, the major presence of SiO_2 , followed by Al_2O_3 , K_2O and Fe_2O_3 . The mineralogical analysis revealed the presence of quartz in all residues and hematite in the slag. These three residues had particle sizes ranging from 0.002 to 0.6 mm. It was identified that the residues have great potentiality of use in the production of cement, concrete as material of the sub-base layer of pavements.

Keywords: castings production; by products; chemical and mineralogical composition; granulometry; ceramic and concrete.

INTRODUÇÃO

O crescimento populacional e o avanço tecnológico conduziram à crescente extração de recursos naturais e ao aumento da geração de resíduos. Esse cenário impulsiona a realização de pesquisas que visam ao desenvolvimento de mecanismos a fim de reduzir a produção dos resíduos e torná-los subprodutos de valor agregado (AGGARWAL; SIDDIQUE, 2014; BHARDWAJ; KUMAR, 2017). A busca pelo reaproveitamento dos resíduos industriais deve-se ao fato de que sua disposição em aterros vem se tornando economicamente desfavorável, por conta do aumento do custo da disposição final (SIDDIQUE, 2014; BHARDWAJ; KUMAR, 2017; MANOHARAN *et al.*, 2018; YAZOGHLI-MARZOUK *et al.*, 2014). Também, deve-se à criação de regulamentos ambientais rigorosos que controlam a disposição dos resíduos e instituem responsabilidades aos envolvidos nessa atividade, bem como pela perda da lucratividade tida por parte das indústrias, pelas sobras e pelos desperdícios decorrentes do processo (BHARDWAJ; KUMAR, 2017; MANOHARAN *et al.*, 2018).

Diversos resíduos industriais vêm sendo estudados para utilização em materiais da construção civil, como o uso da areia de fundição ou escórias de fornos de fundição de ferro na fabricação de concretos convencionais e autoadensáveis, em pisos e blocos, bem como argamassas e pavimentos asfálticos (SWAPNA; PATIL, 2015; BHARDWAJ; KUMAR, 2017; SIDDIQUE; SINGH; SINGH, 2018; TORRES; BARTLETT; PILGRIM, 2017; CASALI *et al.*, 2018). A substituição dos agregados convencionais por agregados reciclados, além de contribuir para a conservação do meio ambiente, pela redução do descarte de resíduos e da extração dos recursos naturais, também resulta na minimização de custos com a destinação final e a gestão dos resíduos, bem como em ganhos econômicos com a produção de materiais com custo reduzido (AGGARWAL; SIDDIQUE, 2014; MANOHARAN *et al.*, 2018; SAHA; SARKER, 2017b; SIDDIQUE; KAUR; RAJOR, 2010; SIDDIQUE; SINGH; SINGH, 2018).

A indústria de fundição de metais, apesar de fazer uso de sucatas metálicas como matéria-prima, é grande geradora de resíduos sólidos, entre os quais se destacam poeiras diversas e areia de moldagem, correspondente ao maior volume de resíduos gerados por esse setor. A areia de moldagem é utilizada na confecção dos moldes e machos para a obtenção de peças fundidas em razão das características como boa condutibilidade térmica e gra-

nulometria arredondada que permite fácil moldagem. Ao longo do tempo, essa areia sofre deterioração e perda de qualidade, deixando de ser reincorporada no ciclo produtivo e necessitando de uma destinação final adequada (BHARDWAJ; KUMAR, 2017). Gerada em grandes quantidades, a areia de fundição é um subproduto com grandes perspectivas de ser introduzido na substituição dos agregados miúdos do concreto (AGGARWAL; SIDDIQUE, 2014; GURUMOORTHY; ARUNACHALAM, 2016; MANOHARAN *et al.*, 2018; SIDDIQUE; SINGH; SINGH, 2018), porém ainda há a necessidade de mais estudos quanto a essa aplicação (BHARDWAJ; KUMAR, 2017).

A cadeia produtiva de fundição de metais do Brasil concentra-se, principalmente, nos estados de Santa Catarina, São Paulo e Rio Grande do Sul (BRASIL, 2009). No país, em 2012, estimou-se uma geração anual de resíduo de areia de fundição de aproximadamente 3 milhões de toneladas (MASTELLA *et al.*, 2014), e o que foi reciclado destinou-se, principalmente, à pavimentação asfáltica (BRASIL, 2009). Em comparação com outros países, como Espanha, Índia e Estados Unidos, são geradas, respectivamente, em torno de 1 (ETXEBERRIA *et al.*, 2010), 1,71 e 10–15 milhões de toneladas, por ano, desse resíduo (SIDDIQUE; SINGH; SINGH, 2018).

Nos processos de fundição de metais, também há geração de escórias nos fornos de alta temperatura. Esse resíduo vem sendo utilizado em substituição aos agregados miúdos e/ou graúdos do concreto (GURUMOORTHY; ARUNACHALAM, 2016; SETHY; PASLA; CHANDRA SAHOO, 2016; TORRES; BARTLETT; PILGRIM, 2017), da areia natural ou do cimento Portland (RAHMAN *et al.*, 2017; SAHA; SARKER, 2017a; 2017b; SIDDIQUE; SINGH; SINGH, 2018). Outro resíduo gerado na produção de peças fundidas consiste em um material particulado, coletado por equipamentos de controle da poluição do ar. Esse resíduo de estudo apresenta, basicamente, granulometria inferior a 0,2 mm. Torres *et al.* (2017) demonstraram a viabilidade do uso desse resíduo junto a areia, escória e cinzas de fundição, como substituinte parcial dos agregados naturais do concreto. Para utilização dos resíduos de fundição na composição de materiais construtivos, e para avaliar a eficácia e a viabilidade desse uso, são necessárias informações referentes às propriedades, ao desempenho e à durabilidade desses subprodutos. Entretanto, a falta desses dados ainda é um dos principais limitantes para a utilização desses resíduos.

Há uma escassez de conhecimentos sobre outros resíduos industriais semelhantes à areia e que apresentem propriedades de engenharia que podem ser comparáveis (AGGARWAL; SIDDIQUE, 2014).

O método padrão e mais utilizado para o manejo dos resíduos de fundição é a disposição final em aterros industriais. A reciclagem desses subprodutos na produção de cimento, argamassa, concreto, camadas de pavimento, entre outros, ainda é baixa em razão dos custos inerentes às técnicas de processamento, que incluem separação, limpeza, trituração, armazenamento e análise, as quais variam em função das características das matérias-primas de origem, das operações unitárias a que são submetidos, das variáveis do tratamento

térmico, entre outros (TORRES; BARTLETT; PILGRIM, 2017). Outra barreira que impede a utilização plena desses materiais é a falta de informações referentes ao desempenho, à durabilidade e às propriedades físicas, químicas, estruturais e de ecotoxicidade desses subprodutos, as quais irão influenciar no seu potencial de aplicação (LADOMERSKÝ *et al.*, 2016).

Diante desse cenário, o objetivo deste estudo consistiu em realizar a caracterização química, mineralógica e granulométrica de três resíduos oriundos da produção de peças fundidas de ferro e avaliar suas possíveis aplicações na construção civil. Tratam-se de resíduos gerados em grandes quantidades que necessitam de estudos para buscar potenciais formas de reaproveitamento.

METODOLOGIA

Os materiais utilizados consistem em resíduos oriundos do processo produtivo de uma indústria de produção de peças fundidas de ferro cinzento e nodular, localizada no município de Erechim, Rio Grande do Sul. Os resíduos são denominados:

- Areia verde: utilizada na fabricação do molde para produção de peças metálicas, gerada após um número máximo de reuso no processo, sendo composta de areia natural, de características refratárias; bentonita, utilizada como aglomerante, conferindo à mistura propriedades coesivas; e pó Cardiff, utilizado como aditivo;
- Material particulado: resíduo gerado durante o processo de reaproveitamento da areia verde, em que é removida a parcela de material pulverulento, de tamanho inferior a 0,20 mm a partir de um sistema de peneiramento, exaustão, ciclone e filtro de manga;
- Escória: resíduo dos fornos de alta temperatura do processo de fundição de ferro. Na indústria, são geradas mensalmente 200 toneladas de resíduos de areia verde e material particulado, e aproximadamente 30 toneladas de escória, sendo todos destinados a um aterro industrial, com exceção de uma parcela de areia verde, destinada à indústria cerâmica.

Inicialmente, as amostras de cada material foram secas na estufa a 100°C por 48 horas e peneiradas conforme a Norma Brasileira (NBR) 6.457 (ABNT, 2016). Cerca de

100 g de cada amostra foram coletadas para a determinação da composição química e mineralógica. A composição mineralógica foi analisada por meio da técnica de difração de raios X (DRX) pelo método do pó, mediante o emprego de difratômetro de raios X da marca *PANalytical*, modelo *X'Pert PRO* com detector sensível a posição *X'Celerator*. A identificação das fases cristalinas foi realizada por meio do *software X'Pert High Score*. A composição química foi determinada por meio de fluorescência de raios X (FRX), por meio de pastilhas prensadas com espectrômetro de marca *Bruker*, modelo *S8 Tiger*, na calibração *STD-1 (Standardless)* referente à análise sem padrões dos elementos químicos compreendidos entre flúor e urânio. A perda ao fogo (PF) foi determinada a 1.020°C por 2 horas.

Dos resíduos areia verde e material particulado foram determinados, no estado solto, a porosidade, a curva de retenção de água e a capacidade de recipiente (REICHARDT, 1988). Para a determinação da curva de retenção de água seguiu-se a metodologia descrita por Richards e Fireman (1943) com auxílio do *software SWRC v.3,0*, considerando o modelo proposto por Van Genuchten (1980); e para a porosidade e sua partição, utilizaram-se os critérios estabelecidos por Klein e Libardi (2002). Para os três resíduos, determinaram-se, também, a densidade das partículas, o teor de umidade e a distribuição de tamanho de partículas conforme as normas do Departamento Nacional de Estradas e Rodagem (DNER-ME) 093/94 (DNER, 1994) e a NBR 7.181 (ABNT, 1984). Para a realização dessas análises, a escória foi submetida à trituração.

Com base nas características físicas, químicas e mineralógicas obtidas, realizou-se um levantamento bibliográfico para avaliar as potenciais aplicações dos resíduos deste estudo. A consulta à literatura foi realizada pela pesquisa por documentos nos bancos de dados *Elsevier* e *Springer* e em revistas nacionais. Nos trabalhos sele-

cionados, buscou-se destacar a quantidade de resíduos incorporados a materiais de construção, a influência da adição de resíduos nas propriedades mecânicas, físicas e químicas desses materiais e as propriedades dos resíduos desses trabalhos, traçando comparativos com os resíduos do presente estudo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Fluorescência de raios X

Conforme resultados da técnica de FRX (Tabela 1), todos os materiais avaliados apresentam como composto químico majoritário o dióxido de silício (SiO_2), principalmente na areia verde, seguido por óxido de alumínio (Al_2O_3). Na escória, também observou-se uma proporção significativa de óxido de potássio (K_2O) e de óxido de ferro (Fe_2O_3). Quantidade significativa de K_2O não foi observada para os outros compostos. Contudo, observaram-se quantidades semelhantes de Fe_2O_3 para todos os materiais. Outros compostos também foram identificados, embora representem uma parcela residual.

Composições químicas semelhantes da areia verde foram observadas por outros autores, em que se destacam como componentes significativos o silício (Si), o alumínio (Al) e o ferro (Fe) (ARULRAJAH *et al.*, 2017; ETXEBERRIA *et al.*, 2010; GUNEY *et al.*, 2010; KAUR;

SIDDIQUE; RAJOR, 2013; MASTELLA *et al.*, 2014; SIDDIQUE; KAUR; RAJOR, 2010; SIDDIQUE; SINGH, 2011). O predomínio de Si na areia de fundição foi considerado bom indicativo da aplicabilidade do resíduo na construção civil e na indústria de cerâmicas, o qual será discutido na sequência.

Quanto à escória, são escassos os estudos que avaliaram esse resíduo proveniente da fundição do ferro cinzento e nodular. Os resultados das análises de composição química de pesquisas existentes com escórias provenientes da fundição de outros tipos de metal, como ferro-níquel (LEMONIS *et al.*, 2015; MARAGKOS; GIANNOPOULOU; PANIAS, 2009; RAHMAN *et al.*, 2017), aço, ferrocromo (CUNICO *et al.*, 2003; GÖKALP *et al.*, 2018) e ferro e cobre (GEETHA; MADHAVAN, 2017; MIRHOSSEINI *et al.*, 2017; VIJAYARAGHAVAN; JUDE; THIVYA, 2017) não apresentam grande semelhança

Tabela 1 – Análise de fluorescência de raios X para os três materiais.

| Óxidos | Areia verde (%) | Material particulado (%) | Escória (%) |
|-------------------------|-----------------|--------------------------|-------------|
| SiO_2 | 90,4 | 58,8 | 70,4 |
| Al_2O_3 | 2,94 | 10,8 | 13,6 |
| K_2O | 0,094 | 0,325 | 4,98 |
| Fe_2O_3 | 2,07 | 3,55 | 3,29 |
| Na_2O | 0,447 | 1,59 | 2,79 |
| CaO | 0,177 | 0,749 | 1,2 |
| PF | 2,85 | 20,6 | 1,32 |
| Outros | 0,987 | 3,618 | 2,387 |

SiO_2 : dióxido de silício; Al_2O_3 : óxido de alumínio; K_2O : óxido de potássio; Fe_2O_3 : óxido de ferro; Na_2O : óxido de sódio; CaO: óxido de cálcio; PF: perda ao fogo.

com os obtidos no presente estudo. A principal diferença é o elevado teor de SiO_2 na escória, característica não observada nos demais estudos. Essa alta concen-

Difração de raios X

Os resultados de DRX para areia verde, material particulado e escória estão expressos nas Figuras 1, 2 e 3, respectivamente. Na areia verde e no material particulado, identificou-se a presença de fases cristalinas de quartzo, o que justifica a grande parcela de SiO_2 verificada na análise de FRX (Tabela 1). Na escória, observou-se a fase cristalina de quartzo e de hematita.

A sílica, presente na forma de quartzo, é a principal matéria-prima utilizada na obtenção da sílica ativa (microsílica). A sílica ativa é obtida como subproduto do processo de fabricação do silício metálico ou das ligas de ferro-silício. Essa é caracterizada pela alta concentração de SiO_2 (estrutura amorfa), a qual se mostrou presente

tração deve-se aos resíduos dos moldes da areia verde e à composição do material, normalmente composta de uma estrutura de carbono e silício.

nos resíduos de fundição. Por isso, infere-se que esses materiais possam ser utilizados como substituintes parciais do agregado convencional do concreto, pois quando o material se apresenta disperso, torna-se um produto bastante reativo, que contribui para uma melhoria de resistência à compressão do produto final. A adição das microsílicas no concreto permite a redução da sua porosidade e permeabilidade, o que promove menor absorção de água e maior proteção contra agentes externos, acarretando em maior durabilidade, vida útil do concreto, além de maior resistência à carbonatação e à corrosão das armaduras (JAVED; LOVELL; WOOD, 1994; SIDDIQUE; SCHUTTER; NOUMOWÉ, 2009)

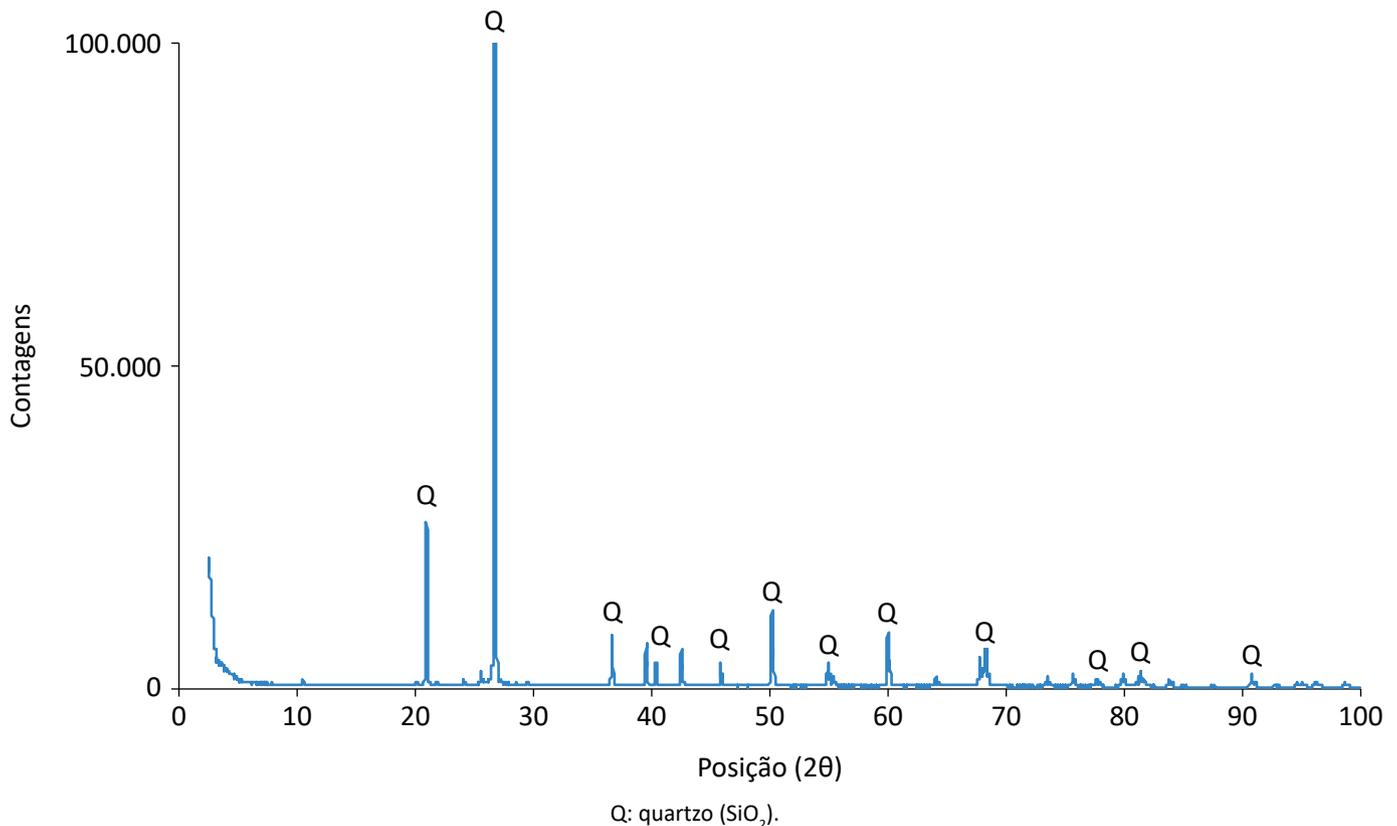
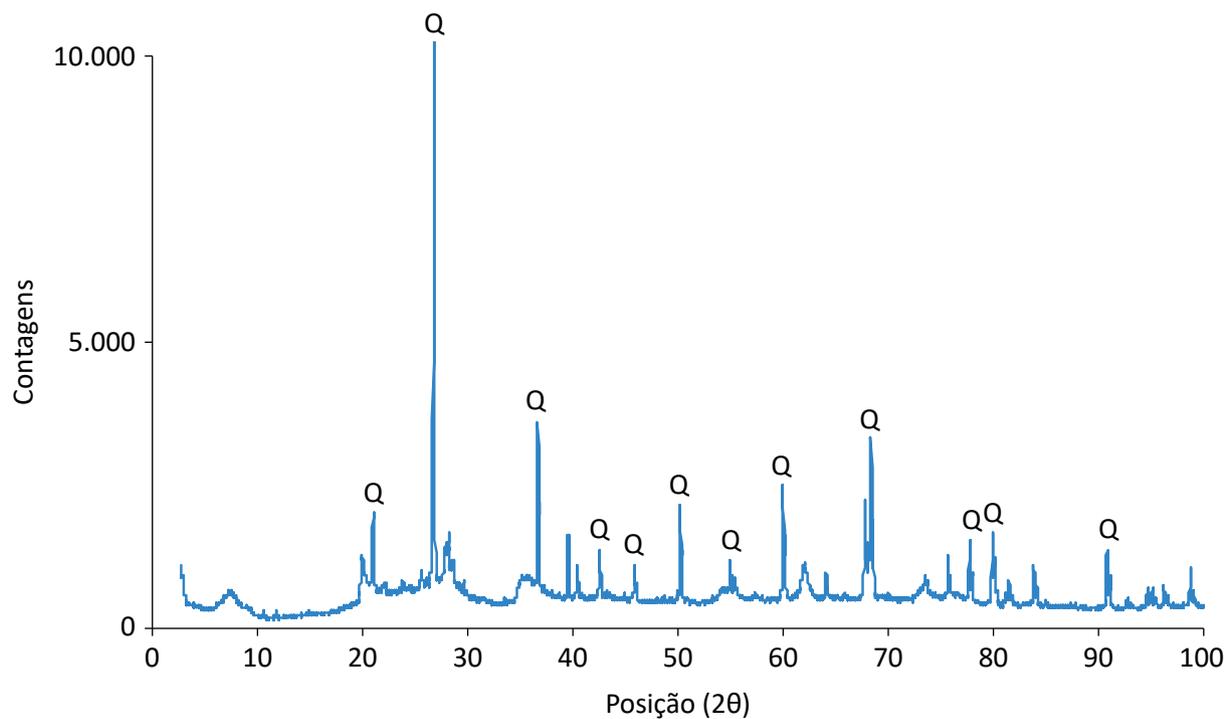
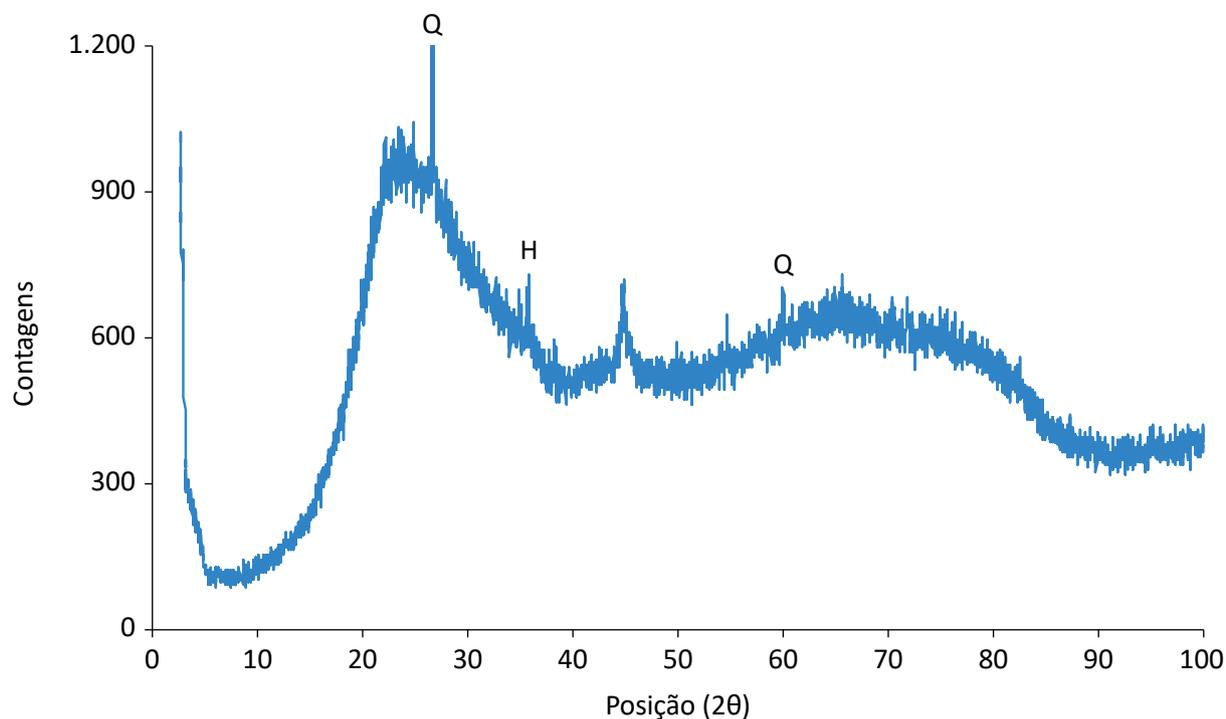


Figura 1 – Análise de difração de raios X da areia verde.



Q: quartzo (SiO_2).

Figura 2 – Análise de difração de raios X do material particulado.



Q: quartzo (SiO_2); H: hematita (Fe_2O_3).

Figura 3 – Análise de difração de raios X da escória.

Análise granulométrica

Os resultados de distribuição granulométrica dos resíduos de estudo estão apresentados na Figura 4 e na Tabela 2. A areia verde é composta basicamente de areia fina (91,38%), além de silte (3,82%) e argila (3,34%). A distribuição do tamanho de partículas desse resíduo pode ser considerada uniforme e com resultados semelhantes ao observado por Dayton *et al.*

(2010), que relataram a areia (0,05 a 2 mm) como fração majoritária de 39 areias de fundição (ferro, alumínio e aço), variando entre 76,6 e 100%, com média de 90,3%. Quanto à densidade real das partículas e ao teor de umidade médio, obtiveram-se valores de $2,61 \pm 0,00 \text{ g.cm}^{-3}$ e $0,38 \pm 0,00\%$, respectivamente. Já no material particulado, verificou-se a presença

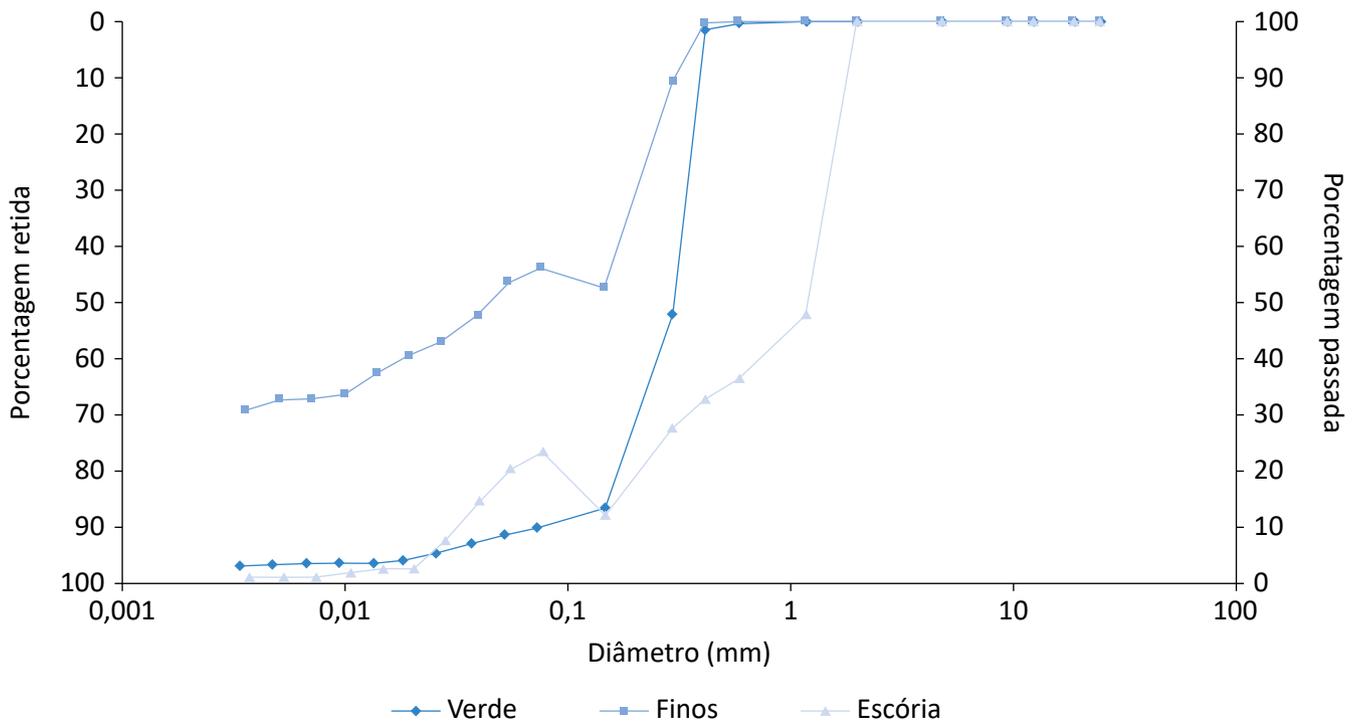


Figura 4 – Curvas de distribuição granulométrica dos resíduos.

Tabela 2 – Distribuição granulométrica dos resíduos (%).

| Tamanho das partículas (mm) | Areia verde | Material particulado | Escória |
|-----------------------------|-------------|----------------------|---------|
| < 0,002 (argila) | 3,34 | 30,58 | 1,06 |
| 0,002 – 0,06 (silte) | 3,82 | 16,83 | 13,64 |
| 0,06 – 0,2 (areia fina) | 91,38 | 52,28 | 18,09 |
| 0,2 – 0,6 (areia média) | 1,46 | 0,31 | 67,21 |
| 0,6 – 2 (areia grossa) | 0 | 0 | 0 |
| > 2 (pedregulho) | 0 | 0 | 0 |

de um percentual significativo de areia fina (52,28%), além de partículas que se assemelham ao tamanho de partículas da argila (30,58%). Esse material apresentou densidade das partículas igual a $2,23 \pm 0,00 \text{ g.cm}^{-3}$ e teor de umidade médio de $4,10 \pm 0,06\%$. A granu-

lometria da escória revelou que esse material é composto essencialmente de areia média (67,21%) e fina (18,09%) e silte (13,64%). A escória apresentou densidade real das partículas de $2,18 \pm 0,00 \text{ g.cm}^{-3}$ e teor de umidade médio de $0,23 \pm 0,06\%$.

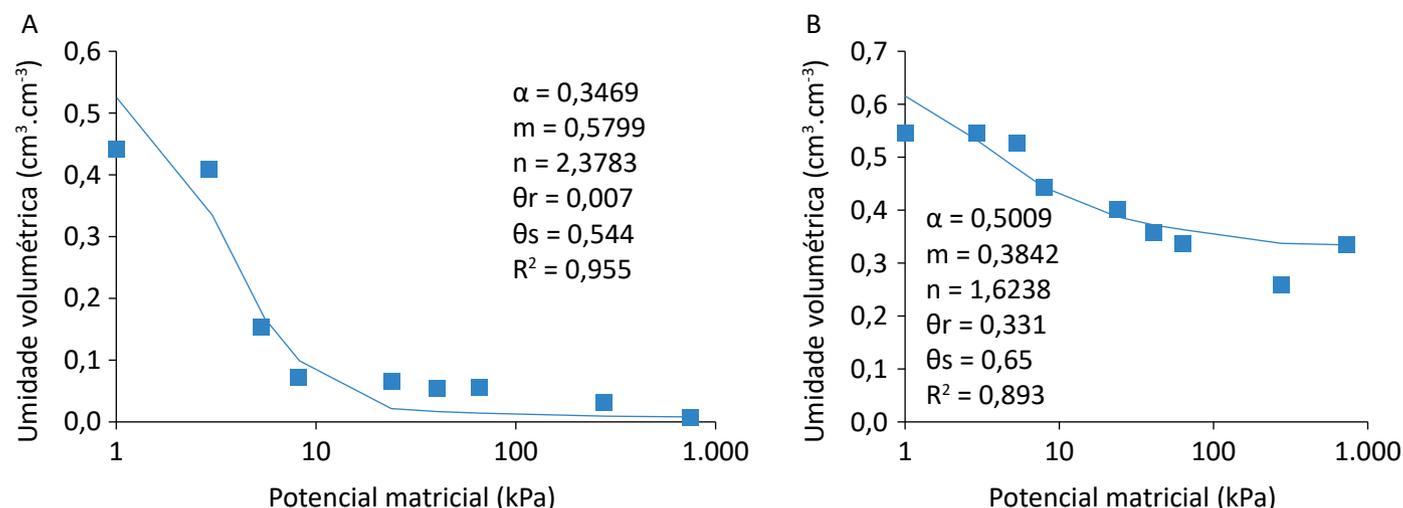
Porosidade, capacidade de recipiente e curva de retenção de água

A areia verde apresentou porosidade constituída, majoritariamente, de macroporos, enquanto o material particulado estrutura-se em criptoporos ($< 0,0002 \text{ mm}$) (Tabela 3). Tal fato corrobora com os resultados obtidos pela granulometria, em que a areia verde é composta de partículas de maior tamanho quando comparada com o material particulado, que apresenta partículas de tamanho próximo aos da argila, favorecendo estruturas com tamanhos de poro reduzidos.

Considerando as curvas de retenção de água, observou-se que o material particulado possui maior capacidade de retenção (Figura 5). Quanto à capacidade de recipiente, extraída das curvas de retenção de água, obteve-se valor de $0,10 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ para a areia verde ($\theta_{10\text{kPa}}$) e $0,39 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ ($\theta_{33\text{kPa}}$) para o material particulado. Com isso, infere-se que o material particulado apresenta maior potencial de retenção de água, propriedade associada à capacidade do material, em esta-

Tabela 3 – Macroporosidade, microporosidade, criptoporosidade e porosidade total da areia verde e do material particulado.

| | Areia verde | Material particulado |
|----------------------|-------------|----------------------|
| Macroporos (%) | 35,9 | 16,8 |
| Microporos (%) | 17,8 | 14,6 |
| Criptoporos (%) | 0,7 | 33,6 |
| Porosidade total (%) | 54,4 | 65,0 |



α ; m ; n : parâmetros de ajuste do modelo de Van Genuchten; θ_r : umidade volumétrica residual; θ_s : umidade volumétrica de saturação.

Figura 5 – Curva de retenção de água: (A) areia verde e (B) material particulado.

do fresco, de manter a sua trabalhabilidade em solicitações que provoquem perda de água de amassamento, seja por absorção de água pela base do substrato ou por evaporação. Na aplicação desses dois resíduos no

concreto como substituintes do agregado miúdo convencional, as propriedades referentes à capacidade de retenção de água devem ser observadas no momento da determinação da relação água-cimento.

APLICAÇÕES

Entre as alternativas de reaproveitamento dos resíduos deste estudo, alguns trabalhos comprovaram a viabilidade de inserção em obras de infraestrutura, como no uso com materiais para aterramento, reforço para construção de estradas e produção de misturas asfálticas (CARNIN, 2008; JAVED, 1992; YAZOGHLI-MARZOUK *et al.*, 2014); em concreto estrutural, concreto para blocos de pavimentos e tijolos (BHARDWAJ; KUMAR, 2017; KHATIB; HERKI; KENAI, 2013; LADOMERSKÝ *et al.*, 2016; RESCHKE, 2003) e no desenvolvimento de barreiras ou revestimentos hidráulicos (ABICHOU; EDIL; BENSON, 2004). Para a

utilização dos resíduos de fundição nessas aplicações é necessário que eles apresentem, principalmente, granulometria semelhante aos agregados naturais e elementos químicos em sua composição, como sílica e alumina, que contribuam para a melhoria das propriedades mecânicas e a redução da permeabilidade dos materiais em que são incorporados como matérias-primas. Com isso, as características dos resíduos de fundição deste estudo foram comparadas com as dos resíduos reciclados na construção civil. Apresentou-se, também, a influência dessas características nas propriedades dos materiais.

Areia de fundição e material particulado

A classificação das areias de fundição é normalmente dada em função do tipo de sistema utilizado no processo de fundição do metal, sendo geralmente classificadas como: sistema de argila (areia verde), empregada no presente estudo, e sistema de areia ligada quimicamente. A areia verde é a mais empregada nesses processos em razão da presença de sílica, que confere resistência a altas temperaturas, enquanto a bentonita resulta na união das partículas de areia. Ainda, a água é o que proporciona plasticidade ao molde (SIDDIQUE; KAUR; RAJOR, 2010).

Na literatura, tem-se observado o desenvolvimento de estudos que buscam a reutilização do resíduo de areia de fundição na fabricação de concreto e tijolos para a construção civil e a pavimentação. Considerando que o material particulado aqui avaliado é proveniente do processo de separação da areia verde que não é passível de reaproveitamento e, portanto, esse material apresenta composição química e mineralógica semelhante à areia verde. As possíveis aplicações desse material também serão discutidas nesta seção.

Diversas pesquisas demonstraram a aplicabilidade da areia de fundição na indústria cerâmica com a produção de tijolos (ALONSO-SANTURDE *et al.*, 2011; 2012; PABLOS; SICHIERI; IZELI, 2009) e azulejos (LUO *et al.*, 2014). No estudo realizado por Pablos, Sichert e Izeli

(2009), avaliou-se a reutilização da areia de fundição, aglomerada com argila, na fabricação de tijolos maciços e peças decorativas. O resíduo foi estabilizado em matrizes solidificadas de cimento Portland, complementadas pela adição de sílica ativa e/ou aditivo superplastificante. Estudaram-se duas composições para cada material, sendo que as proporções cimento:resíduo para os tijolos e para as peças foram 1:1, 1:3 e 1:3, 1:4, respectivamente. Os resultados demonstraram a viabilidade técnica para o uso desse resíduo em tijolos para alvenaria de vedação e produção de peças decorativas, apresentando bom potencial de comercialização.

Alonso-Santurde *et al.* (2011) analisaram a viabilidade do uso da areia de fundição, com características químicas e de distribuição granulométrica muito semelhantes a do presente estudo, como substituta parcial da areia natural em tijolos de argila, em escala laboratorial, piloto e em ensaios na indústria. Verificou-se que até 30% do resíduo de areia de fundição pode ser incorporado em substituição ao agregado miúdo na composição de tijolos, sem que ocorra alterações de qualidade. Ainda, os compostos perigosos da areia de fundição tornam-se inertes durante o processo de queima e os constituintes químicos do lixiviado apresentam concentrações inferiores referente à categoria de resíduos inertes, com exceção do cromo e do chumbo. Contudo, o risco ambiental durante a vida

útil desse produto pode ser considerado insignificante. Resultados semelhantes foram obtidos por Alonso-Santurde *et al.* (2012), em que a incorporação de 25% de areia verde e 35% de areia de núcleo, na composição de tijolos, atendeu aos requisitos técnicos. Referente à fabricação de azulejos, Luo *et al.* (2014) recomendam como substituição ótima ao agregado natural o uso de areia de fundição em até 15%.

De forma geral, diagramas ternários são comumente utilizados para produção de massas cerâmicas, como o proposto por Fiori *et al.* (1989), e compostos dos vértices (1) SiO_2 ; (2) Al_2O_3 ; e (3) $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$. Ao observar a Tabela 1, verifica-se que tais resíduos apresentam os compostos que constituem majoritariamente as massas cerâmicas, especialmente SiO_2 e Al_2O_3 .

Outro fator a ser considerado na adição de resíduos para a produção de materiais cerâmicos é a granulométrica mistura final, uma vez que essa se relaciona com os estágios de queima e com o processo de secagem do produto. Assim, misturas com elevadas parcelas de pequenas partículas podem dificultar o processo de secagem em decorrência da retenção da umidade (ALONSO-SANTURDE *et al.*, 2012). Por outro lado, a presença de muitas partículas acima do diâmetro de argila e silte pode ocasionar a manifestação de trincas durante a queima (QUEIROZ; MONTEIRO; VIEIRA, 2010). Diante disso, a dosagem ótima entre o resíduo de areia verde e de material particulado, de forma a obter um equilíbrio na distribuição das partículas, pode representar um grande potencial de aplicação em materiais cerâmicos.

Referente a outras aplicações, Siddique, Schutter e Noumowé (2009) e Siddique, Kaur e Rajor (2010) mostraram que resíduos da areia de fundição podem ser adequados para fabricação de concreto de boa qualidade, materiais de construção e como componente para preenchimentos fluidos. Entretanto, o uso excessivo de materiais como a areia de fundição pode resultar em efeitos desfavoráveis, como fraca aderência cimento-agregado, aumento da quantidade de água necessária e retardo do tempo de hidratação do cimento. De acordo com Guney *et al.* (2010), a *American Society for Testing and Materials* (ASTM) C33 estabelece que no máximo 5% das partículas do agregado fino devem passar pela peneira número 200 (argila e poeiras), pois um teor maior dessas partículas pode preju-

dicar a ligação com o cimento, elevar a demanda de água e, conseqüentemente, reduzir a durabilidade do concreto. O mesmo limite da especificação é estabelecido pela NBR 7.211 (ABNT, 2009) para a granulometria do agregado miúdo do concreto. Por outro lado, o uso desses resíduos, principalmente em decorrência dos finos presentes na areia de fundição, pode favorecer o decréscimo da porosidade do concreto, podendo melhorar as propriedades mecânicas e impermeabilizantes (GUNEY *et al.*, 2010; SIDDIQUE; SCHUTTER; NOUMOWÉ, 2009). Com base nos resultados de granulometria dos três resíduos de estudo e no requisito das normas ASTM C33 (ASTM, 2018) e NBR 7.211 (ABNT, 2009), o material particulado apresentou teor de argila e poeiras de 30,58% e, portanto, sua utilização como agregado de concreto deve ser dosada com rigor.

As propriedades dos agregados exercem forte influência no desempenho do concreto. Em geral, as normativas que especificam as propriedades dos agregados para as misturas do concreto consideram muito importante a granulometria das partículas. Nesse aspecto, os resíduos areia verde, material particulado e escória enquadram-se dentro dos parâmetros físicos especificados por Guney *et al.* (2010) e pela NBR 7.211 (ABNT, 2009) para serem utilizados como agregados miúdos do concreto, especialmente relacionado ao tamanho da partícula e à densidade (Tabela 4).

Outros estudos também avaliaram o uso de areia de fundição na produção de concreto. Manoharan *et al.* (2018) testaram a substituição da areia natural por teores de 0, 5, 10, 15, 20 e 25% de areia de fundição na fabricação de produtos de concreto. A partir dos ensaios, verificou-se que os parâmetros de resistência à compressão, à flexão e ao módulo de elasticidade permaneceram constantes até a substituição de 20%, apresentando redução dos valores a partir dessa concentração. Por outro lado, a resistência à tração aumentou com a adição acima de 20% da areia de fundição. Ainda, outros parâmetros avaliados, como a resistência à abrasão, apresentaram valores similares aos observados pela amostra de controle, quando os teores de substituição não ultrapassaram 20%. Assim, os autores concluíram que os resíduos de areia de fundição podem ser utilizados como substitutos dos agregados naturais na produção do concreto, quando a recomendação dessa substituição não ultrapassar 20%. Já Singh e Siddique (2012) produziram blocos de concreto com

a substituição parcial da areia natural pelos teores de 0, 5, 10, 15 e 20% de areia de fundição. Observou-se aumento das resistências do concreto com substituição de até 15%, o que se assemelha aos resultados encontrados por Manoharan *et al.* (2018).

Siddique, Singh e Singh (2018) estudaram os impactos econômicos e ambientais gerados da substituição parcial da areia natural no concreto, por resíduo de areia de fundição. As substituições foram de 0, 5, 10, 15 e 20% em massa e foi utilizado cimento Portland Pozolânico com 30% de cinza volante. Após o tempo de cura do concreto (28 dias), verificou-se, para misturas de concreto com areia de fundição, aumento nas resistências à compressão e à tração de ruptura de 26 e 12,87%, respectivamente, em relação ao concreto convencional. Observam-se melhorias em relação à penetração de íons cloreto e à resistência ao sal de gelo, que oscilaram, respectivamente, entre 7,2 – 17,7 e 6,6 – 26,42%, indicando maior proteção contra a corrosão do aço em ambientes salinos. Os resultados demonstraram que a incorporação de até 20% de areia de fundição como substituto da areia natural traz melhorias no desempenho e na durabilidade do concreto, uma vez que a maior quantidade de finos do resíduo de areia de fundição contribui para o aumento da resistência à compressão e à tração do concreto, pois atua como um material com maior densidade de empacotamento da mistura e, conseqüentemente, menor redução da porosidade do material. Essa aplicação gerou redução no custo do concreto em US\$ 1,06 por metro cúbico, bem como no custo de disposição do resíduo de fundição e nas emissões de CO₂.

Embora inúmeros pontos positivos venham sendo destacados sobre a aplicação desses compostos em produtos de concreto, há relatos de que certos resíduos de areias de fundição podem ocasionar corrosão de metais decorrente da presença de fenóis (MNR, 1992). Siddique, Kaur e Rajor (2010) verificaram que todas as areias de fundição avaliadas apresentaram hidrocarbonetos poliaromáticos, em concentrações muito superiores na areia verde do que nas areias ligadas quimicamente. Assim, é imprescindível a execução de testes de lixiviação para avaliação dos produtos em que esse tipo de material é adicionado.

Como exemplo, Mastella *et al.* (2014) realizaram uma avaliação mecânica e toxicológica de produtos de materiais de concreto com a aplicação de areia de fundição. Produziram-se blocos com diferentes concentrações do resíduo e avaliou-se a resistência à compressão dos blocos, bem como a toxicidade do lixiviado a partir de ensaios com *Daphnia magna* (*D. magna*), *Allium cepa* (*A. cepa*) e *Eisenia fétida* (*E. fetida*). Não se observou redução nos valores de resistência (35 ± 2 MPa em 28 dias). Ainda, os testes de toxicidade a partir do lixiviado não mostraram interferência significativa no desenvolvimento de *D. magna* e *E. fetida*. Contudo, houve redução no crescimento das espécies de *A. cepa*. Com base nos resultados, verificou-se a viabilidade de aplicação dos resíduos de areia de fundição na produção de materiais cimentícios, para pavimentos e blocos estruturais e de alvenaria para vedação.

Biolo (2005) realizou testes de lixiviação e solubilização do resíduo de areia verde com a mesma areia

Tabela 4 – Propriedades físicas dos agregados convencionais do concreto e dos materiais deste estudo.

| | Guney et al. (2010) | | | NBR 7.211 (ABNT, 2009) | | Presente estudo | | |
|---------------------------|-----------------------|---------|---------------|------------------------|-----------|----------------------|----------------------|-------------|
| | Agregados do concreto | | | Agregados do concreto | | Resíduos de fundição | | |
| | Brita 1 | Brita 2 | Areia natural | Miúdo | Graúdo | Areia verde | Material particulado | Escória |
| Tamanho da partícula (mm) | 8 – 16 | 4 – 8 | 0 – 4 | 0,15 – 4,75 | 4,75 – 75 | 0,002 – 0,6 | 0,002 – 0,6 | 0,002 – 0,6 |
| Densidade relativa | 2,64 | 2,63 | 2,60 | – | – | 2,61 | 2,23 | 2,18 |
| Teor de umidade (%) | 0,4 | 0,3 | 2,0 | – | – | 0,38 | 4,10 | 0,23 |

verde utilizada nesta pesquisa, proveniente da mesma empresa. O ensaio de lixiviação não apresentou concentrações de elementos perigosos acima dos limites normatizados pela NBR 10.004 (ABNT, 2004), fator que potencializa a aplicação desse composto em materiais de construção. Quanto ao ensaio de solubilização, algumas substâncias ultrapassaram os limites propostos pela norma, como alumínio, cloretos, cromo, fenol, ferro, manganês e surfactantes. Para a análise de fenol, baixas concentrações foram encontradas, enquadrando o resíduo como não perigoso e não inerte – classe IIA. Torna-se necessário um estudo criterioso de forma a avaliar o comportamento dos materiais após a adição desses resíduos que apresentam substâncias solubilizantes, que podem afetar as estruturas químicas desses produtos.

Além de substituinte parcial no cimento, na argamassa, nos cerâmicos e no concreto, a areia de fundição também pode ser utilizada na pavimentação de rodovias (ARULRAJAH *et al.*, 2017; GUNEY; AYDILEK; DEMIRKAN, 2006; JAVED, 1992; YAZOGHLI-MARZOUK *et al.*, 2014). Yazoghli-Marzouk *et al.* (2014) avaliaram a substituição integral da areia natural por areia de fundição para a preparação da camada sub-base na construção de uma estrada, na França. Os resultados demonstraram que esse resíduo, complementado com 5,5% de aglomerante (cimento), apresentou bom comportamento mecânico, sem causar prejuízos

Escória de fundição

A escória é um dos resíduos do processo de fundição de metais, e é dividida em dois tipos: escória de alto forno (fundição de ferro) e escória de forno de aço (escória de aciaria elétrica), ambas compostas de distintas combinações de silicatos de cálcio, magnésio e alumínio. A escória consiste em um material inerte e um dos subprodutos com maior volume e potencial de reutilização na construção civil. Diferente da areia de fundição, a escória tem sido usada como substituinte parcial dos agregados ou como material cimentante suplementar do concreto, isto é, substitui uma parcela do cimento (TORRES; BARTLETT; PILGRIM, 2017). Posterior à saída do alto forno, a escória é submetida a processos de resfriamento, com pulverização de grandes quantidades de água, e de granulação, os quais conferem características pozolânicas a esse resíduo. Os materiais pozolânicos unicamente não apresentam

ambientais. Essa investigação demonstrou que a areia de fundição atende aos padrões técnicos para ser empregado em um material rodoviário. Esses resultados corroboram com os encontrados por Guney, Aydilek e Demirkan (2006), que ainda afirmaram que essa aplicação proporciona redução de custos da obra. Além do uso como material para preenchimento de aterros rodoviários, a areia de fundição demonstrou viabilidade geotécnica e ambiental para ser utilizada na regularização de bases para assentamento de tubulações (ARULRAJAH *et al.*, 2017).

Baseado nos resultados obtidos e nos estudos levantados na literatura, infere-se que o resíduo de areia verde e o material particulado, ambos gerados no processo de fundição do ferro, apresentam grande potencial de reaproveitamento para uso na construção civil. Um dos principais pontos favoráveis refere-se à semelhança na composição química e na distribuição granulométrica desses resíduos se comparados com os constituintes dos materiais convencionais. Ainda, com base nos ensaios de lixiviação, verificou-se a não ocorrência de lixiviação de compostos perigosos, outro ponto favorável. Contudo, é imprescindível a execução de testes de forma a obter a proporção ótima de substituição do agregado reciclado, bem como a distribuição granulométrica para dosagem ideal e otimização dos constituintes do material a ser produzido.

potencial cimentante, contudo, com a presença de umidade, o hidróxido de cálcio (originado do cimento) gera produtos com propriedades específicas similares a do cimento Portland, justificando sua grande empregabilidade como material substitutivo ao agregado tradicional e como aglomerante em argamassas e concretos (COUTO *et al.*, 2010). Conjuntamente, unem-se os benefícios ambientais e econômicos, como a conservação dos recursos naturais e a economia de energia (ULUBEYLI; ARTIR, 2015). Conforme Gökalp *et al.* (2018), escórias, em geral, também vêm sendo aplicadas em camadas de base e sub-base de pavimentos, por conta do elevado ângulo de fricção e características de autocimentação.

Ladomerský *et al.* (2016) estudaram a aplicação de escória de fundição de ferro como substituta parcial

de agregados naturais em concreto. Os autores observaram para uma substituição de 25,5% de agregado miúdo natural por escória (granulometria semelhante), propriedades similares ao concreto convencional, especialmente referente à trabalhabilidade, à resistência, ao módulo de elasticidade, à microestrutura e à porosidade. Já Rahman *et al.* (2017) investigaram a incorporação de escória granulada de ferro-níquel como material cimentante no concreto. Os elevados teores de sílica e alumina presentes nesse material podem auxiliar na redução da permeabilidade e na melhoria da resistência e da durabilidade do concreto (APRIANTI S, 2015).

Li *et al.* (2018) avaliaram a durabilidade de um sistema ternário de cimentos contendo cimento Portland, cimento aluminato de cálcio e sulfato de cálcio, com diferentes teores de escória de alto forno granulada (5, 15, 25 e 35% em massa), quando submetido ao ataque combinado de cloretos (5%) e sulfatos (5%). Verificou-se a diminuição da porosidade aparente, o aumento da resistência à compressão e do teor de cloreto confinado com a adição da escória, considerado benéfico para a durabilidade das estruturas de concreto, principalmente as expostas a ambientes quimicamente agressivos.

A escória também tem sido estudada como substituinte do cimento em blocos de concreto para pavimentação (*pavers*) (GANJIAN; JALULL; SADEGHI-POUYA, 2015; LIMBACHIYA; GANJIAN; CLAISSE, 2016; SADEK; NOUHY, 2014). Atici e Ersoy (2008) avaliaram a incorporação de escória e cinza volante em substituição a 10, 20, 30, 40, 50 e 60% do cimento. Os resultados demonstraram que, com o aumento do período de cura (3, 7, 28, 90 e 180 dias), os blocos apresentaram maior resistência à compressão, à tração e à flexão, sendo os melhores resultados obtidos compreendidos em substituições de 20 a 60%. Para eles, essa aplicação contribui para a produção de *pavers* com melhores propriedades e menor custo. Limbachiya *et al.* (2016) também verificaram redução das propriedades de lixiviação dos blocos de concreto com a adição de escórias.

Conforme os estudos supracitados, a elevada presença de sílica e alumina na constituição da escória pode ser útil como auxiliar cimentante do concreto e de *pavers*, uma vez que contribui para a melhoria da resistência mecânica e da permeabilidade desses materiais. Além disso, em função de suas características granulométricas, a escória avaliada neste estudo também possui potencialidade para ser utilizada como substituinte parcial de agregados na fabricação de concreto.

CONCLUSÃO

Este estudo apresentou a caracterização química, física e mineralógica de três resíduos oriundos da fundição de ferro (material particulado, areia verde e escórias), e buscou possíveis alternativas de reaproveitamento na construção civil. Ao comparar os resultados de caracterização desses subprodutos com os descritos na literatura, verificaram-se diversos potenciais de aplicabilidade no referido setor.

A areia verde pode servir como substituinte parcial dos agregados miúdos do concreto, por apresentar granulometria mais fina do que a areia natural e presença de fases cristalinas de quartzo na microestrutura, características estas que podem conferir melhorias das propriedades mecânicas dos materiais construtivos. Além disso, essa areia pode ser utilizada na pavimentação de rodovias, pois, em diversos estudos, foi aplicada como material de sub-base de estradas ou de regularização para assentamento de tubulação, atendendo aos requisitos técnicos exigidos. Considerando as características de composição química e granulométrica

supracitadas, também se aponta a possibilidade de utilização do material particulado, para a utilização como agregado miúdo no concreto.

Referente à escória, esta apresentou elevados teores de sílica e alumínio em sua composição, características que favorecem a redução da permeabilidade e o aumento da durabilidade do concreto produzido com esse resíduo, em quantidades adequadas. Ainda, a escória apresentou granulometria adequada, observando-se o recomendado ao agregado miúdo de concreto. Portanto, identifica-se como alternativas potenciais o uso como material aglomerante em argamassas e concretos e como substitutivo do cimento e do agregado miúdo tradicional, na produção de concreto e blocos de concreto para pavimentação e como material de base ou sub-base de pavimentos. Contudo, cada uma das alternativas de aplicação dos resíduos de fundição necessita de estudos de viabilidade técnica e econômica, avaliando-se as propriedades mecânicas e ambientais, incluindo testes de lixiviação de metais e toxicidade.

REFERÊNCIAS

- ABICHOU, T.; EDIL, T. B.; BENSON, C. H. Beneficial use of foundry by-products in highway construction. *Geotechnical Engineering for Transportation Projects*, v. 1, n. 126, p. 715-722, 2004. [http://doi.org/10.1061/40744\(154\)58](http://doi.org/10.1061/40744(154)58)
- AGGARWAL, Y.; SIDDIQUE, R. Microstructure and properties of concrete using bottom ash and waste foundry sand as partial replacement of fine aggregates. *Construction and Building Materials*, v. 54, p. 210-223, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.051>
- ALONSO-SANTURDE, R.; ANDRÉS, A.; VIGURI, J. R.; RAIMONDO, M.; GUARINI, G.; ZANALLI, C.; DONDI, M. Technological behaviour and recycling potential of spent foundry sands in clay bricks. *Journal of Environmental Management*, v. 92, n. 3, p. 994-1002, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.11.004>
- 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, n. 1, p. 97-106, 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.022>
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). *ASTM C33: Standard Specification for Concrete Aggregates*. Estados Unidos: ASTM, 2018.
- APRIANTI S, E. A huge number of artificial waste material can be supplementary cementitious material (SCM) for concrete production – a review part II. *Journal of Cleaner Production*, v. 142, p. 4178-4194, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.115>
- ARULRAJAH, A.; YAGHOUBI, E.; IMTEAZ, M.; HORPIBULSUK, S. Recycled waste foundry sand as a sustainable subgrade fill and pipe-bedding construction material: Engineering and environmental evaluation. *Sustainable Cities and Society*, v. 28, p. 343-349, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scs.2016.10.009>
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 6.457: Amostras de solo: Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização*. Rio de Janeiro: ABNT, 2016. p. 1-9.
- _____. *NBR 7.181: Análise Granulométrica*. Rio de Janeiro: ABNT, 1984. p. 13.
- _____. *NBR 7.211: Agregados para concreto – Especificação*. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.
- _____. *NBR 10.004: Resíduos sólidos – Classificação*. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- ATICI, U.; ERSOY, A. Evaluation of destruction specific energy of fly ash and slag admixed concrete interlocking paving blocks (CIPB). *Construction and Building Materials*, v. 22, n. 7, p. 1507-1514, 2008.
- BHARDWAJ, B.; KUMAR, P. Waste foundry sand in concrete: A review. *Construction and Building Materials*, v. 156, p. 661-674, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.010>
- BIOLO, S. M. *Reúso do resíduo de fundição areia verde na produção de blocos cerâmicos*. 162 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia (MME). *Desenvolvimento de estudos para elaboração do plano duodecenal (2010-2030) de geologia, mineração e transformação mineral*. Produto 35 – Cadeia da fundição. Brasil: Ministério de Minas e Energia, 2009. 41 p.
- CARNIN, R. L. P. *Reaproveitamento do resíduo de areia verde de fundição como agregado em misturas asfálticas*. 152 f. Tese (Doutorado em Química) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.
- CASALI, J. M.; MIGUEL, T. F.; FELIZARDO, C. C.; MEIRA, N. S.; DOMINGUINI, L.; BETIOLI, A. M. Caracterização e influência do teor do resíduo de areia de fundição fenólica em argamassas de revestimento. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 18, n. 1, p. 261-279, jan./mar. 2018. <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212018000100220>

- COUTO, C.; ALMEIDA, J. A.; PINTO, J. D. S.; BAMBERG, P.; STARLING, T. Influência da pozolanicidade da escória de alto-forno nas propriedades de argamassas e concretos duráveis. *Construindo*, Belo Horizonte, v. 2, n. 1, p. 31-34, jan./jun. 2010.
- CUNICO, L.; DIRCETTI, G.; DONDI, M.; ERCOLANI, G.; GUARINI, G.; MAZZANTI, F.; RAIMONDO, M.; RUFFINI, A.; VENTURI, I. Steel slag recycling in clay brick production. *Tile & Brick International*, v. 20, p. 230-239, 2003.
- DAYTON, E. A.; WHITACRE, S. D.; DUNGAN, R. S.; BASTA, N. T. Characterization of physical and chemical properties of spent foundry sands pertinent to beneficial use in manufactured soils. *Plant Soil*, v. 329, n. 1, p. 27-33, 2010. <http://dx.doi.org/10.1007/s11104-009-0120-0>
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (DNER). *DNER-ME 093/94: Solos - determinação da densidade real*. Brasil: DNER, 1994.
- ETXEBERRIA, M.; PACHECO, C.; MENESES, J. M.; BERRIDI, B. Properties of concrete using metallurgical industrial by-products as aggregates. *Construction and Building Materials*, v. 24, n. 9, p. 1594-1600, 2010. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.02.034>
- FIORI, C.; FABBRI, B.; DONATI, G.; VENTURI, I. Mineralogical composition of the clay bodies used in the Italian tile industry. *Applied Clay Science* 1, v. 4, n. 5-6, p. 461-473, 1989. [https://doi.org/10.1016/0169-1317\(89\)90023-9](https://doi.org/10.1016/0169-1317(89)90023-9)
- GANJIAN, E.; JALULL, G.; SADEGHI-POUYA, H. Using waste materials and by-products to produce concrete paving blocks. *Construction and Building Materials*, v. 77, p. 270-275, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.048>
- GEETHA, S.; MADHAVAN, S. High Performance Concrete with Copper slag for Marine Environment. *Materials Today: Proceedings*, v. 4, n. 2, p. 3525-3533, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.02.243>
- GÖKALP, I.; UZ, V. E.; SALTAN, M.; TUTUMLUER, E. Technical and environmental evaluation of metallurgical slags as aggregate for sustainable pavement layer applications. *Transportation Geotechnics*, v. 14, p. 61-69, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2017.10.003>
- GUNEY, Y.; AYDILEK, A. H.; DEMIRKAN, M. M. Geoenvironmental behavior of foundry sand amended mixtures for highway subbases. *Waste Management*, v. 26, n. 9, p. 932-945, 2006. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2005.06.007>
- GUNEY, Y.; SARI, Y. D.; YALCIN, M.; TUNCAN, A.; DONMEZ, S. Re-usage of waste foundry sand in high-strength concrete. *Waste Management*, v. 30, n. 8-9, p. 1705-1713, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.02.018>
- GURUMOORTHY, N.; ARUNACHALAM, K. Micro and mechanical behaviour of Treated Used Foundry Sand concrete. *Construction and Building Materials*, v. 123, p. 184-190, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.143>
- JAVED, S. Use of waste foundry sand in highway construction. *Transportation Research Record*, v. 1, n. JHRP-94/2, p. 0-273, 1992. <https://doi.org/10.5703/1288284316152>
- JAVED, S.; LOVELL, C. W.; WOOD, L. E. Waste foundry sand in asphalt concrete. *Transp. Res. Board. Rec.*, v. 1437, p. 27-34, 1994.
- KAUR, G.; SIDDIQUE, R.; RAJOR, A. Micro-structural and metal leachate analysis of concrete made with fungal treated waste foundry sand. *Construction and Building Materials*, v. 38, p. 94-100, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.112>
- KHATIB, J. M.; HERKI, B. A.; KENAI, S. Capillarity of concrete incorporating waste foundry sand. *Construction and Building Materials*, v. 47, p. 867-871, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.013>
- KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L. Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um Latossolo Vermelho, sob diferentes sistemas de uso e manejo. *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, v. 26, n. 4, p. 857-867, 2002. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832002000400003>

- LADOMERSKÝ, J.; JANOTKA, I.; HRONCOVÁ, E.; NAJDENÁ, I. One-year properties of concrete with partial substitution of natural aggregate by cupola foundry slag. *Journal of Cleaner Production*, v. 131, p. 739-746, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016%2Fj.jclepro.2016.04.101>
- LEMONIS, N.; TSAKIRIDIS, P. E.; KATSIOTIS, N. S.; ANTIOHOS, S.; PAPAGEORGIOU, D.; KATSIOTIS, M. S.; BEAZI-KATSIOTI, M. Hydration study of ternary blended cements containing ferronickel slag and natural pozzolan. *Construction and Building Materials*, v. 81, p. 130-139, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.046>
- LI, G.; ZHANG, A.; SONG, Z.; LIU, S.; ZHANG, J. Ground granulated blast furnace slag effect on the durability of ternary cementitious system exposed to combined attack of chloride and sulfate. *Construction and Building Materials*, v. 158, p. 640-648, 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.062>
- LIMBACHIYA, V.; GANJIAN, E.; CLAISSE, P. Strength, durability and leaching properties of concrete paving blocks incorporating GGBS and SF. *Construction and Building Materials*, v. 113, p. 273-279, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.152>
- LUO, H.-L.; LIN, D.-F.; CHUNG, M.-L.; CHEN, L. Y. Waste Foundry Sand Reused as Clay Replacement for Tile Manufacture. *International Journal of Transportation Science and Technology*, v. 3, n. 4, p. 339-351, 2014. <https://doi.org/10.1260/2046-0430.3.4.339>
- MANOHARAN, T.; LAKSMANAN, D.; MYLSAMY, K.; SIVAKUMAR, P.; SIRCAR, A. Engineering properties of concrete with partial utilization of used foundry sand. *Waste Management*, v. 71, p. 454-460, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.10.022>
- MARAGKOS, I.; GIANNOPOULOU, I. P.; PANIAS, D. Synthesis of ferronickel slag-based geopolymers. *Minerals Engineering*, v. 22, n. 2, p. 196-203, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2008.07.003>
- MASTELLA, M. A.; GISLON, E. S.; PELISSER, F.; RICKEN, C.; DA SILVA, L.; ANGIOLETTO, E.; MONTEDO, O. R. K. Mechanical and toxicological evaluation of concrete artifacts containing waste foundry sand. *Waste Management*, v. 34, n. 8, p. 1495-1500, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.02.001>
- MINERAL AGGREGATE CONSERVATION (MNR). *Reuse and recycling. Report prepared by John Emery Geotechnical Engineering Limited for Aggregate and Petroleum Resources Section*. Ontário: MNR, 1992.
- MIRHOSSEINI, S. R.; FADAEI, M.; TABATABAEI, R.; FADAEI, M. J. Mechanical properties of concrete with Sarcheshmeh mineral complex copper slag as a part of cementitious materials. *Construction and Building Materials*, v. 134, p. 44-49, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.024>
- PABLOS, J.; SICHIERI, E.; IZELI, R. Reutilização de resíduo sólido industrial. *Risco: Revista De Pesquisa Em Arquitetura E Urbanismo*, n. 10, p. 112-125, 2009. <https://doi.org/10.11606/issn.1984-4506.v0i10p112-125>
- QUEIROZ, L. F. T.; MONTEIRO, S. N.; VIEIRA, C. M. F. Efeito da utilização de areia no processamento e nas propriedades de cerâmica vermelha. *Cerâmica*, v. 56, n. 339, p. 279-284, 2010. <http://dx.doi.org/10.1590/S0366-69132010000300011>
- RAHMAN, M. A.; SARKER, P. K.; SHAIKH, F. U. A.; SAHA, A. K. Soundness and compressive strength of Portland cement blended with ground granulated ferronickel slag. *Construction and Building Materials*, v. 140, p. 194-202, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.023>
- REICHARDT, K. Capacidade de campo. *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, v. 12, p. 211-216, 1988.
- RESCHKE, J. S. *Escória granulada de fundição utilizada como substituição ao cimento em concretos: avaliação de propriedades relacionadas com a durabilidade*. 174 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.
- RICHARDS, L. A.; FIREMAN, M. Pressure-plate apparatus for measuring moisture sorting and transmission by soils. *Soil Science*, v. 56, n. 6, p. 395-404, 1943. <http://dx.doi.org/10.1097/00010694-194312000-00001>

- SADEK, D. M.; NOUHY, H. A. Properties of paving units incorporating crushed ceramic. *HBRC Journal*, v. 10, n. 2, p. 198-205, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.hbrj.2013.11.006>
- SAHA, A. K.; SARKER, P. K. Compressive Strength of Mortar Containing Ferronickel Slag as Replacement of Natural Sand. *Procedia Engineering*, v. 171, p. 689-694, 2017a. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.410>
- SAHA, A. K.; SARKER, P. K. Sustainable use of ferronickel slag fine aggregate and fly ash in structural concrete: Mechanical properties and leaching study. *Journal of Cleaner Production*, v. 162, p. 438-448, 2017b. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.035>
- SETHY, K. P.; PASLA, D.; CHANDRA SAHOO, U. Utilization of high volume of industrial slag in self compacting concrete. *Journal of Cleaner Production*, v. 112, p. 581-587, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.039>
- SIDDIQUE, R. Utilization of industrial by-products in concrete. *Procedia Engineering*, v. 95, p. 335-347, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.192>
- SIDDIQUE, R.; KAUR, G.; RAJOR, A. Waste foundry sand and its leachate characteristics. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 54, n. 12, p. 1027-1036, 2010. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.04.006>
- SIDDIQUE, R.; SCHUTTER, G. DE; NOUMOWÉ, A. Effect of used-foundry sand on the mechanical properties of concrete. *Construction and Building Materials*, v. 23, n. 2, p. 976-980, 2009. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.05.005>
- SIDDIQUE, R.; SINGH, G. Utilization of waste foundry sand (WFS) in concrete manufacturing. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 55, n. 11, p. 885-892, 2011. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.05.001>
- SIDDIQUE, R.; SINGH, G.; SINGH, M. Recycle option for metallurgical by-product (Spent Foundry Sand) in green concrete for sustainable construction. *Journal of Cleaner Production*, v. 172, p. 1111-1120, 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.255>
- SINGH, G.; SIDDIQUE, R. Effect of waste foundry sand (WFS) as partial replacement of sand on the strength, ultrasonic pulse velocity and permeability of concrete. *Construction and Building Materials*, v. 26, n. 1, p. 416-422, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.06.041>
- SWAPNA, S. S.; PATIL, S. G. Utilization of Foundry Waste sand as a Masonry Mortar. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, v. 12, n. 6, p. 49-54, 2015. <http://dx.doi.org/10.9790/1684-12664954>
- TORRES, A.; BARTLETT, L.; PILGRIM, C. Effect of foundry waste on the mechanical properties of Portland Cement Concrete. *Construction and Building Materials*, v. 135, p. 674-681, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.028>
- ULUBEYLI, G. C.; ARTIR, R. Sustainability for Blast Furnace Slag: Use of Some Construction Wastes. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, v. 195, p. 2191-2198, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.06.297>
- VAN GENUCHTEN, M. T. A close form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, v. 44, p. 892-898, 1980.
- VIJAYARAGHAVAN, J.; JUDE, A. B.; THIVYA, J. Effect of copper slag, iron slag and recycled concrete aggregate on the mechanical properties of concrete. *Resources Policy*, v. 53, p. 219-225, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2017.06.012>
- YAZOGHLI-MARZOUK, O.; VULCANO-GREULLET, N.; CANTEGRIT, L.; FRITEYRE, L.; JULLIEN, A. Recycling foundry sand in road construction-field assessment. *Construction and Building Materials*, v. 61, p. 69-78, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.02.055>

