

XVI ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO

Desafios e Perspectivas da Internacionalização da Construção
São Paulo, 21 a 23 de Setembro de 2016

COMPORTAMENTO ELÁSTICO DE ARGAMASSAS COM AREIA DESCARTADA DE FUNDIÇÃO¹

**FERREIRA, G. C. S.(1); SARRO, W. S.(2); ROCHA, H. L.(3); BUENO, G. M.(4);
CARNIN, R. L. P.(5)**

(1) UNICAMP, e-mail: gisleiva@ft.unicamp.br; (2) UNICAMP, e-mail: lely.sarro@hotmail.com; (3) UNICAMP, e-mail: hlr.henriquelim@gmail.com; (4) UNICAMP, e-mail: biel_5a@hotmail.com; (5) UDESC, e-mail: raquel@tupy.com.br

RESUMO

Atualmente há vários esforços governamentais, privados e da comunidade científica em reduzir o impacto ambiental do setor da construção civil. Neste contexto, estão inseridas as argamassas, material com grande consumo de recursos naturais não renováveis (areia, cimento Portland, cal, terra). Para contribuir na mitigação dos impactos causados por este setor produtivo e ainda minimizar os impactos oriundos de outros setores industriais, o objetivo deste trabalho foi viabilizar a incorporação do resíduo areia descartada de fundição (ADF) em argamassas, considerando parâmetros elásticos. Foram considerados traços de argamassas de assentamento com incorporação de duas amostras distintas de ADF nos teores de 0% (referência), 50% e 80%. Os resultados obtidos indicaram a melhoria da deformação destas argamassas com base nos valores de módulo de elasticidade da argamassa referência, sendo esta propriedade um dos parâmetros mais importantes na avaliação do desempenho de argamassas. Este trabalho relata os estudos parciais deste grupo de pesquisa, o qual pode contribuir na melhoria da gestão dos recursos naturais e resíduos sólidos gerados pelos setores produtivos correlatos. O Desenvolvimento deste trabalho obteve apoio da maior fundição do Brasil, localizadas em Joinville, SC e CNPq.

Palavras-chave: Resíduos Sólidos. Sustentabilidade. Desempenho.

ABSTRACT

There are currently various government, private efforts and the scientific community to reduce the environmental impact of the construction industry. In this context, mortar, material with high consumption of non-renewable natural resources are embedded (sand, Portland cement, lime, soil). To help mitigate the impacts of this productive sector while minimizing the impacts arising from other industrial sectors, the objective was to enable the incorporation of waste discarded sand casting (ADF) in mortars, considering elastic parameters. They were considered laying mortar incorporating features from two different samples in ADF content of 0% (reference), 50% and 80%. The results indicated an improvement of the deformation of these mortars based on modulus of elasticity reference values, this property being one of the most important parameters for evaluating the performance of mortars. This paper reports the partial studies of this research group, which can contribute to improving the management of natural resources and solid waste generated by the related productive sectors. The development of this work received support from the largest foundry in Brazil, located in Joinville, SC and CNPq.

¹ FERREIRA, G. C. S *et al.* Comportamento elástico de argamassas com areia descartada de fundição. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 16., 2016, São Paulo. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, 2016.

Keywords: *Solid Waste. Sustainability. Performance.*

1 INTRODUÇÃO

A utilização de resíduos sólidos em áreas que apresentam alto consumo de recursos naturais não renováveis é uma tarefa que compreende todo o planeta. Neste contexto está inserido o setor da construção civil, que atualmente consome praticamente 50% dos recursos minerais retirados da crosta terrestre (CBCS, 2016). Diversas empresas deste setor já realizam a inserção de vários tipos de resíduos com potencial de reaproveitamento, por exemplo, a indústria cimenteira (ABCP, 2016).

Neste sentido, há diversos estudos para viabilizar a substituição da areia quartzosa, uma das matérias-primas mais consumidas durante uma construção e já escassa em diversas regiões, por resíduos de origem mineral. De encontro com a problemática exposta, há pesquisas atuais sobre a viabilidade da utilização da areia descartada de fundição (ADF) como agregado em matrizes cimentícias, principalmente em concretos e artefatos de concreto (SIDDIQUE et al., 2015; MASTELLA et al., 2014; WATANABE et al., 2006).

Entretanto, a aplicação deste resíduo em argamassas de assentamento e revestimento, um dos materiais mais utilizados nos sistemas construtivos brasileiros, ainda necessita de estudos aprofundados. Para isso, é necessário identificar o desempenho de argamassas com incorporação da ADF, considerando fatores ambientais, técnicos e econômicos, para que as indústrias deste setor forneçam este tipo de material ao mercado.

A areia descartada de fundição, resíduo oriundo da fundição de peças metálicas, pode apresentar características físico-químicas e ambientais distintas, dependendo do processo de fundição que lhe deu origem. Isto ocorre porque as indústrias de fundição utilizam alguns tipos de adições à areia, dependendo do tipo de liga metálica e complexidade da peça a ser moldada, as quais podem ser de origem inorgânica ou orgânica (KLINSKY et al., 2012).

Alguns estudos sobre ADF em argamassas confirmam a viabilidade na incorporação deste resíduo neste tipo de matriz cimentícia, entretanto, todos destacam a necessidade de também verificar aspectos ambientais (FERREIRA et al., 2014; PHILIPPSEN, 2010; SILVA et al., 2011; PEREIRA et al., 2000). Considerando esta particularidade, o resíduo ADF é indicado para matrizes cimentícias, pois possibilitam o encapsulamento do mesmo, evitando a possibilidade de contaminação de seres humanos e do ambiente (PIMRAKSA et al., 2013).

Portanto, para resolver as pendências que ainda existem para a produção em escala industrial de argamassas de assentamento e revestimento utilizando a ADF como agregado, são necessários muitos estudos. Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi determinar o comportamento elástico de argamassas com ADF a partir do módulo de elasticidade. A norma brasileira que descreve os requisitos necessários às argamassas de

assentamento e revestimento (NBR 13281:2005), não insere nos seus requisitos o módulo de elasticidade, propriedade essencial para prever o comportamento deste material como revestimento em vários tipos de substratos (tijolos cerâmicos, blocos de concreto, paredes de concreto, etc). Esta deficiência é destacada por importantes pesquisadores desta área (ALVES et al., 2010).

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Caracterização física dos materiais

A amostra de Areia Descartada de Fundição (ADF) empregada neste estudo é um resíduo industrial proveniente de empresa de fundição sediada no estado de Santa Catarina. As duas amostras de areia (ADF e comum) foram submetidas a ensaios de caracterização física (tabela 1). A amostra de ADF também foi classificada conforme parâmetros ambientais (classificação de resíduos sólidos e toxicidade) e determinada a sua composição química (tabela 1).

Tabela 1 – Ensaios para caracterização físico-química e ambiental dos materiais.

Ensaios	ADF	Areia Comum
Fluorescência de Raios X (FRX)	X	
Classificação ambiental (NBR 10004:2004)	X	
Toxicidade Microtox (L5.227-CETESB, 2001 e NBR 15411-3:2012)	X	
Massa específica e Massa específica aparente (NBR NM 52:2009)	X	X
Massa específica unitária (NBR NM45:2006)	X	X
Curva granulométrica (NBR NM248:2003)	X	X

2.2 Estudo de Dosagem

O traço aplicado na moldagem dos corpos de prova de referência (0%) foi de 1: 3,2: 0,5 (cimento : areia : a/m) com adição de aditivo incorporador de ar (2 ml por kg de cimento) e ajuste da relação água/material seco (a/m) para manter o índice de consistência e trabalhabilidade das argamassas quando da adição do resíduo ADF. Os teores de substituição da areia normal por ADF foram 50% e 80%, conforme resultados obtidos por pesquisadores que utilizaram outras amostras de ADF na produção de argamassas (SILVA et al., 2011; FERREIRA et al., 2014; SARRO et al., 2015).

2.3 Moldagem

Para atingir os objetivos propostos, obter os módulos de elasticidade (E), foram moldados dois tipos de corpos de prova: prismáticos (40 mm de seção

transversal e 160 mm de comprimento), conforme NBR 13279:2005 e cilíndricos com 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura (NBR 7215:1996). Assim foi possível obter **E** a partir de ensaios de tração à flexão e de compressão simples (figuras 1 e 2). Para cada teor de substituição (0%, 50% e 80%), idade (7, 28, 56 e 120 dias) e tipo de corpo de prova, foram moldadas 3 repetições, totalizando 72 copos de prova.

Figura 1 – Fôrmas para os corpos de prova prismáticos



Figura 2 – Fôrmas para os corpos de prova cilíndricos



2.4 Caracterização Mecânica

Para verificar as características das argamassas ainda no estado fresco, foram realizados ensaios pelo método Flow table (NBR 13276:2005), a qual determina a consistência normal das argamassas, o que pode ser traduzido como a trabalhabilidade apresentada pelas mesmas durante a aplicação. Neste trabalho optou-se por manter a consistência das argamassas, variando a relação água/material seco conforme teor de ADF.

Após 7, 28, 56 e 120 dias de cura, os corpos de prova cilíndricos e prismáticos foram submetidos aos ensaios de compressão simples (NBR 7215:1996) com determinação do módulo de elasticidade E (NBR 8522:1982) e tração à flexão e compressão, segundo a NBR 13279:2005, com determinação do módulo de deformação na ruptura (MOR). Para a realização destes ensaios foi utilizada a máquina universal de ensaios modelo DL 30000 (EMIC) (Figura 3 e 4) que permite a medição das deformações e deslocamento verticais com sensores acoplados aos corpos de prova. Os cálculos dos módulos de elasticidade (E) e módulos de ruptura (MOR), foram realizados segundo as equações 1 e 2, respectivamente.

Após a realização dos ensaios, os resultados foram analisados estatisticamente com o auxílio de um Software (Statgraphics Centurion, versão XV).

Figura 3 – Compressão simples em corpos de prova cilíndricos com determinação da deformação.



Figura 4 – Tração à flexão em corpos de prova prismáticos com determinação do deslocamento vertical.



$$E_{compressão} = \frac{(\sigma_{30\%P_{rup}} - 0,5MPa)}{(\varepsilon_{30\%P_{rup}} - \varepsilon_{0,5MPa})} \quad (1)$$

$$E_{flexão} = \frac{(P_{rup} \times L^3)}{(4 \times f \times b^4)} \quad (2)$$

Onde:

P_{rup} = Carga de Ruptura (N)

L = Vão livre durante o ensaio (100 mm)

f = Deslocamento vertical do corpo de prova durante o carregamento (mm)

b = Largura do corpo de prova (40 mm)

$\sigma_{30\%}$ = 30% da carga de ruptura

$\sigma_{30\%}$ e $\sigma_{0,5MPa}$ = Deformação específica, respectivamente, 30% da carga de ruptura e carga de ruptura igual a 0,5 MPa.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

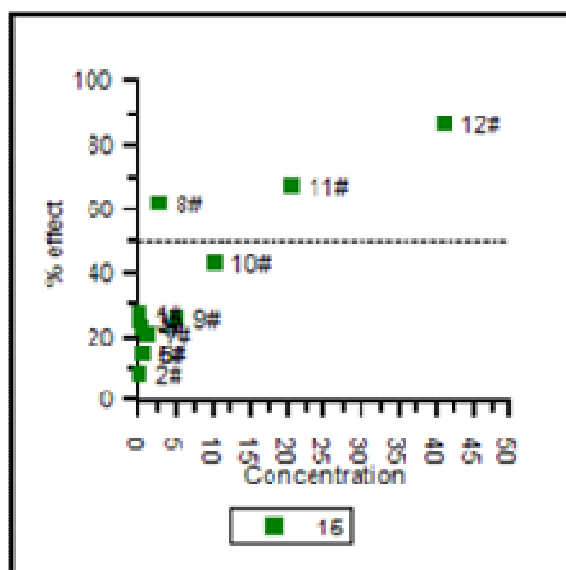
3.1 Caracterização físico-química e ambiental dos materiais

Sobre parâmetros ambientais, segundo a NBR 10004:2004, a amostra de ADF foi classificada como II-A (não perigoso e não inerte), o que viabiliza a aplicação em argamassas. Segundo Ferreira et al., (2014), a legislação internacional sobre limites de alguns metais em águas e solos, indica limites superiores aos encontrados na amostra de ADF estudada.

Para obter todos os parâmetros exigidos por órgãos ambientais, foram realizados ensaios de toxicidade, utilizando a metodologia de análise do teste de toxicidade aguda Microtox™ (L5.227-CETESB, 2001), a qual estabelece que a redução de acima de 20% da emissão de luz pela bactéria bioluminescente *Vibrio fischeri* é um indicativo de toxicidade da amostra (Figura 5). Os resultados indicaram que a amostra de ADF em

questão pode apresentar toxicidade, isto é, contaminação aos seres vivos. Entretanto, são necessários mais estudos, por exemplo, a determinação dos teores de metais pesados para confirmar estes resultados. Também é importante salientar que os ensaios foram realizados na massa bruta (amostra pura), situação que não se mantém nas argamassas, nas quais foram utilizadas no máximo 80% de ADF. Além disso, a matriz cimentícia neutraliza as possibilidades de contaminação por lixiviados devido o efeito de encapsulamento (PIMRAKSA et al., 2013; SIDIQUE et al., 2014).

Figura 5 – Resultados dos ensaios de toxicidade Microtox



No ensaio de FRX (Fluorescência de Raios X) obteve-se a composição química quantitativa da amostra (tabela 2). Com os resultados verifica-se que a amostra de ADF é composta basicamente por elementos químicos presentes em material quartzoso, isto é, sílica (SiO_2), com 72%. Ao compararmos estes resultados com Siddique et al. (2010), apresentados também na tabela 2, observa-se a identificação dos mesmos elementos químicos, sendo os teores bem próximos.

Tabela 2 – Composição química da amostra de ADF a partir do ensaio de FRX realizado na amostra bruta.

Elemento	ADF (%)	ADF*
SiO_2	71,46	87,91
Al_2O_3	18,38	4,70
SO_3	2,35	0,09
Fe_2O_3	2,25	0,94
CaO	1,02	0,14
Cr_2O_3	0,73	—
K_2O	0,20	0,25
TiO_2	0,18	0,15

*Resultados do ensaio de FRX de Siddique et al. (2010)

Os resultados obtidos na caracterização física da ADF e areia comum descritos na tabela 3 indicaram que a ADF pode ser considerada, segundo aspectos físicos, como agregado miúdo para argamassas. Os valores dos índices físicos foram praticamente iguais, apresentando diferença acentuada em relação à massa específica da ADF (2,85 g/cm³). Este valor pode ser justificado pela presença de óxidos de ferro e alumínio, com teores de 2,3% e 18,4%, respectivamente (tabela 2).

Em relação à massa unitária, os dois materiais (areia comum e ADF) podem ser consideradas iguais (tabela 3). Este resultado também corrobora as pesquisas de Siddique et al. (2010), que caracterizaram 17 amostras distintas de ADF, obtendo valores para a massa unitária entre 1,05 e 1,55 g/cm³.

Tabela 3 – Caracterização Física das amostras de ADF e Areia Comum

Ensaio	Massa específica (g/cm ³)	Massa Esp. Aparente seca (g/cm ³)	Massa unitária (g/cm ³)
ADF	2,85	2,57	1,48
Areia comum	2,63	2,58	1,50

Em relação à granulometria dos agregados miúdos utilizados (areia comum e ADF) (Tabela 4), verifica-se que os dois materiais obtiveram a mesma classificação granulométrica (zona utilizável inferior), o que contribui para viabilizar a aplicação desta amostra de resíduo como agregado miúdo em argamassas. Outros autores classificaram igualmente as amostras de ADF utilizadas nas respectivas pesquisas (FERREIRA et al., 2014; SILVA et al., 2011).

Tabela 4 – Caracterização granulométrica das amostras de areia comum e ADF.

Material	Módulo de Finura (MF)	Dimensão máxima (mm)	Classificação
ADF	1,31	0,6	Zona utilizável inferior
AREIA COMUM	1,7	1,2	Zona utilizável inferior

3.2 Caracterização das argamassas no estado fresco e endurecido

3.2.1 Índice de Consistência

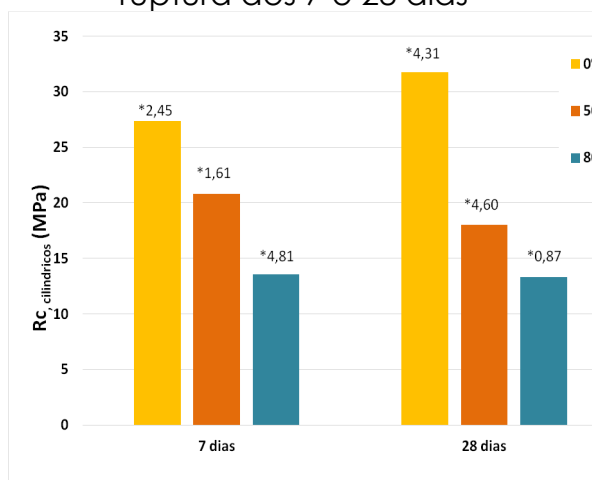
Admitindo-se que o índice de consistência normal de uma argamassa deve ser 260 mm, com variação de ± 10 mm (NBR 13276:2005), apenas o traço com 0% ADF (referência), manteve a relação água/material seco em 0,5. Os traços com incorporação de ADF tiveram esta relação alterada para 0,8. Isto ocorreu devido à granulometria apresentada pela amostra de ADF, com maior porcentagem de finos, o que representa maior área superficial dos grãos, resultando na necessidade de maior volume de água para envolvê-los (MEHTA e MONTEIRO, 2008). Segundo relato de outros autores, esta propriedade depende também da origem do resíduo, que está ligada ao

tipo de peça fundida e processo de fundição (GUNEY et al., 2010; ETXEBERRIA et al., 2010)

3.2.2 Ensaios de resistência mecânica

Conforme o tipo de corpo de prova, foram realizados os ensaios para determinar o comportamento mecânico das argamassas com ADF. As figuras 6 a 9 apresentam os resultados de resistência á compressão média dos corpos de prova cilíndricos e respectivos módulos de elasticidade.

Figura 6 – Resistência a compressão dos corpos de prova cilíndricos para ruptura aos 7 e 28 dias



*Desvio Padrão (MPa)

Figura 7 – Módulo de elasticidade dos corpos de prova cilíndricos para ruptura aos 7 e 28 dias

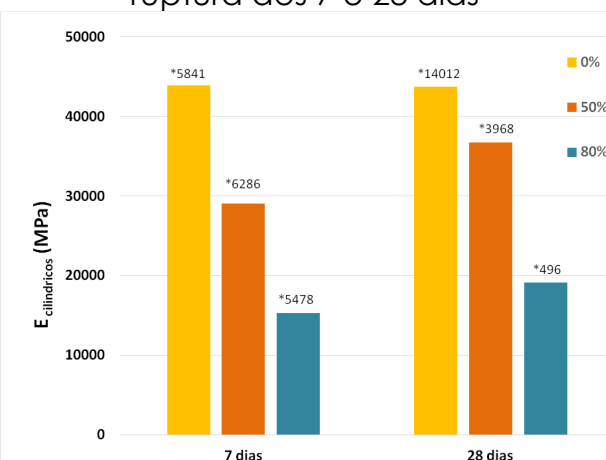
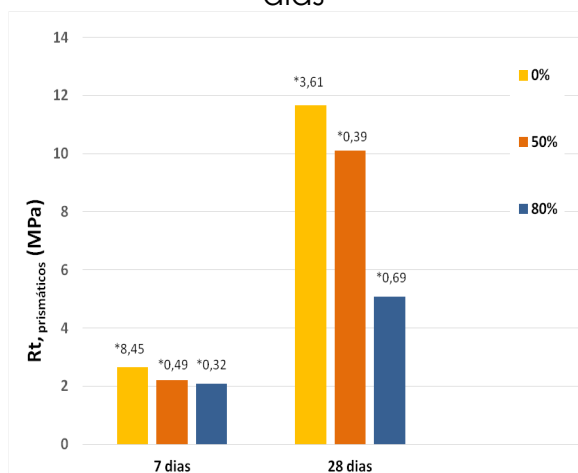
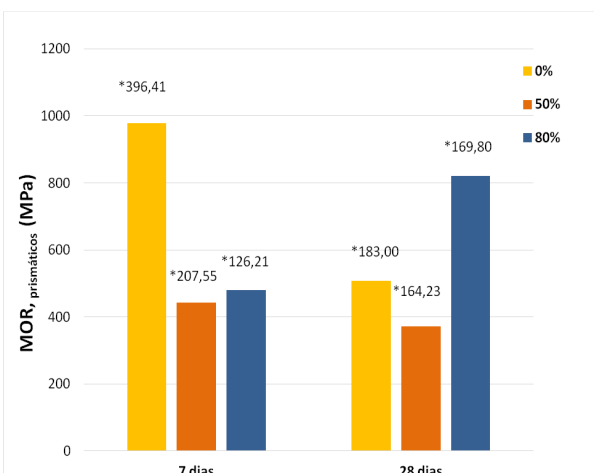


Figura 8 – Resistência à tração na flexão (Rt) dos corpos de prova prismáticos para ruptura aos 7 e 28 dias



*Desvio Padrão

Figura 9 – Módulo de ruptura (MOR) dos corpos de prova prismáticos para ruptura aos 7 e 28 dias



Conforme os requisitos descritos na NBR 13281:2005, os traços com incorporação de ADF (50% e 80%) foram classificados como argamassas tipo III ($R_c \geq 8$ MPa) para a idade de 28 dias, mesma classificação do traço referência (0% de ADF). Entretanto, tanto nos corpos de prova cilíndricos como dos prismáticos, verifica-se uma redução na resistência conforme o aumento do teor de ADF. A principal justificativa para este comportamento é a necessidade do aumento da relação água/materiais secos para manter a trabalhabilidade das argamassas com ADF (0,5 para 0,8), o que prejudica o comportamento mecânico devido à redução na proporção cimento:material seco, aumento do teor de vazios e redução da densidade das argamassas.

Como consequência, os módulos de elasticidade (corpos de prova cilíndricos) e de ruptura (corpos de prova prismáticos) dos traços com ADF também apresentaram valores menores. Este comportamento não pode ser considerado como prejudicial se avaliarmos que estes tipos de argamassas (assentamento de alvenarias e revestimento de paredes e tetos) são expostas às deformações excessivas durante sua vida útil, consequência das largas faixas de variações térmicas e de acomodação do substrato. Tal comportamento exige maiores deformações em um mesmo intervalo de tensões, o que resulta em módulos de elasticidade menores.

4 CONCLUSÕES

Com este trabalho verificou-se que até o teor de 50%, é possível substituir a areia comum por areia descartada de fundição (ADF), considerando as características ambientais da amostra do resíduo utilizado e os requisitos mecânicos citados na NBR 13281:2005. A incorporação desta ADF em argamassas de assentamento e revestimento reduziu os valores dos módulos de elasticidade (E) e de ruptura (MOR), entretanto, tal efeito pode ser considerado benéfico se avaliarmos o desempenho das mesmas às variações térmicas e intempéries.

REFERÊNCIAS

- _____. **NBR NM 45:** Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.
- _____. **NBR NM 52:** Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.
- _____. **NBR NM 53:** Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa aparente e absorção da água. Rio de Janeiro, 2009.
- _____. **NBR NM 248:** Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 13279**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 10004**: Resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 15411**: Ecotoxicologia aquática — Determinação do efeito inibitório de amostras aquosas sobre a emissão da bioluminescência de *Vibrio fischeri* (ensaio de bactéria luminescente) – Parte 3: Método utilizando bactérias liofilizadas. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 7215**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1997.

_____. **NBR 7215**: Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2008.

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland. <<http://www.abcp.org.br/>>. Acesso em: ABR de 2016.

ALVES, A.; CARASEK, H.; CASCUDO, O. Influência da umidade do revestimento na resistência superficial avaliada por diferentes métodos de ensaio. In: **3 Congresso Português de Argamassas de Construção**, Lisboa, 13 p., 2010.

CBCS – Conselho Brasileiro da Construção Sustentável. <<http://www.cbcs.org.br/>>. Acesso em: ABR de 2016.

CETESB. L5.227 - Teste de toxicidade com a bactéria luminescente *Vibrio fischeri*: Método de ensaio, 2001.

ETXEBERRIA, M.; PACHECO, C.; MENESES, J. M.; BERRIDI, I. Properties of concrete using metallurgical industrial by-products as aggregates. **Construction and Building Material**, v. 24, p.1594–600, 2010.

FERREIRA, G.C.S.; BUENO, G. M.; DOMINGUES, L. G. F. Bedding mortar with waste foundry sand (WFS). In: **4th International Conference on Industrial and Hazardous Waste Management**, 2014, p. 1-9.

KLINSKY, L. M. G.; BARDINI, V. S. S.; FURLAN, A. P.; FABRI, G. T. P. (2012). Reaproveitamento de areia de fundição residual em misturas de areia asfalto usinada a quente. **Transportes**, v. 20 – 4, p. 27-34.

MASTELLA, M. A.; GISLON, E. S.; PELISSER, F.; RICKEN, C.; SILVA, L.; ANGIOLETTI, E.; MONTEDO, O. R. K. (2014). Mechanical and toxicological evaluation of concrete artifacts containing waste foundry sand. **Waste Management**, v. 34, p. 1495-1500.

MEHTA, P. K. ; MONTEIRO, P. J. M. Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais. São Paulo: **Editora Pini**, 2008.

PEREIRA, R.L.; SCHMIDT, A.E.; ALMEIDA, N.H.C.; VERRAN, G.O. Utilização de resíduo de areia verde de fundição na preparação de argamassa para aplicação na construção civil. In: **Congresso em Ciência de Materiais**, 2000, Joinville. Anais. Joinville: 2000. 53

PHILIPPSEN, R. E LUZ, C. A. Utilização da areia artificial e areia de fundição em argamassas. In: **XIV SICITE - Simpósio de Iniciação Científica e Tecnológica**, 06 a 08 de outubro de 2010, Cornélio Procopio, PR.

PIMRAKSA, K.; CHINDAPRASIRT, P.; HUANJIT, T.; TANG, C.; SATO, T. (2013). Cement mortars hybridized with zeolite and zeolite-like materials made of lignite bottom ash for heavy metal encapsulation. **Journal of Cleaner Production**, v. 41, p. 31-41.

SARRO, W. S.; CARDOSO, S. M. ; DOMINGUES, L. G. F. ; ROCHA, H. L. ; BUENO, G. M. ; FERREIRA, G. C. S. . Parâmetros Ambientais e Mecânicos de Argamassas com ADF. **IV SIRS – Simpósio sobre resíduos sólidos** da USP São Carlos, 2015.

SIDDIQUE, R.; SINGH, G. Utilization of waste foundry sand (WFS) in concrete manufacturing. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 55, Issue 11, p. 885-892, ISSN 0921- 3449, 2011.

SIDDIQUE, R.; SINGH, G.; BELARBI, R.; AIT-MOKHTAR, K.; KUNAL. (2015). Comparative investigation on the influence of spent foundry sand as partial replacement of fine aggregates on the properties of two grades of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 83, p. 216-222.

SILVA, W. R. L.; TOCHETTO, E.; PRUDÊNCIO JR., L. R.; OLIVEIRA, A. L. Influência do emprego de areia de fundição residual nas propriedades no estado fresco e endurecido de misturas cimentícias. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, v. 4, nº 4, p. 642-662, 2011.

STATPOINT TECHNOLOGIES – Statgraphics Centurion, versão VI, software estatístico. <http://www.statgraphics.com/>.

WATANABE, F. A.; NASCIMENTO, M. R.; GEMELLI, E.; CAMARGO, N. H. A. (2006). Caracterização de pavimentos de concreto fabricados em equipamentos industriais com a adição de areia de fundição. In: **17 CBECIMat – Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**, 13 p., 15 a 19 nov., Foz do Iguaçu, PR.