

### III-1398 – PROPRIEDADES MECÂNICAS DE ARGAMASSAS COM AREIA DESCARTADA DE FUNDIÇÃO

**Talles Gomes de Lima<sup>(1)</sup>**

Graduando em Engenharia de Transportes (FT/UNICAMP).

**Gisleiva C. S. Ferreira (2)**

Profa. Dra. Faculdade de Tecnologia (FT/UNICAMP).

**Marta Guilherme Siviero Pires(2)**

Profa. Dra. Faculdade de Tecnologia (FT/UNICAMP).

**Raquel Luísa Carnin Pereira(3)**

Pesquisadora Colaboradora Faculdade de Tecnologia (FT/UNICAMP).

**Endereço<sup>(2)</sup>:** Av. Paschoal Marmo, 1888 – Jd. Nova Itália - Limeira - SP - CEP: 30310-760 – Brasil.

E-mail: [gisleiva@unicamp.br](mailto:gisleiva@unicamp.br)

#### RESUMO

A Areia Descartada de Fundição é classificada como Resíduo Classe II A - Resíduo Não Perigoso, Não Inerte, pela NBR 10.004 (ABNT, 2004). A possibilidade do aproveitamento da areia descartada de fundição como agregado para a produção de argamassas cimentícias, pode contribuir tanto para reduzir o volume de material descartado em aterro industrial, quanto para atender à demanda na construção civil, contribuindo para o desenvolvimento sustentável. Mas ainda há poucos estudos específicos sobre o uso da ADF como agregado miúdo em argamassas cimentícias. Com isso, o objetivo desse estudo foi determinar as propriedades mecânicas de argamassas cimentícias com substituição da areia por ADF. A metodologia experimental incluiu a caracterização físico-química do lote de ADF estudado, além de ensaios no estado fresco e endurecido. Em relação aos resultados mecânicos (resistência à tração na flexão e à compressão), os mesmos foram analisados estatisticamente através dos métodos ANOVA e Tukey. Após tais análises, concluiu-se que a substituição máxima da areia por ADF deve ser 30%, considerando valores das propriedades estatisticamente iguais ao traço referência (0% ADF).

**PALAVRAS-CHAVE:** resíduo industrial, materiais cimentícios, coproduto, índice de absorção.

#### INTRODUÇÃO

Vários resíduos industriais já são estudados como matéria-prima na construção civil, entre eles se destaca a areia descartada de fundição (ADF), resíduo gerado no setor de fundição durante os processos de moldagem de peças metálicas. De acordo com a NBR 15702 (2009), a ADF é definida como areia proveniente do processo produtivo da fabricação de peças fundidas (areias de macharia, de moldagem, “areia verde”, preta, despoeiramento, de varrição). No Brasil, são gerados aproximadamente 3 milhões de toneladas de ADF por ano, sendo as regiões Sul e Sudeste com maior volume (ABIFA, 2023). Nos EUA são gerados anualmente cerca de 10 milhões de toneladas de ADF, sendo que 50% desse volume é destinado a agricultura, construção de rodovias, recobrimento de tubos, fabricação de cimento e concreto e cobertura de aterros sanitários (USEPA, 2010).

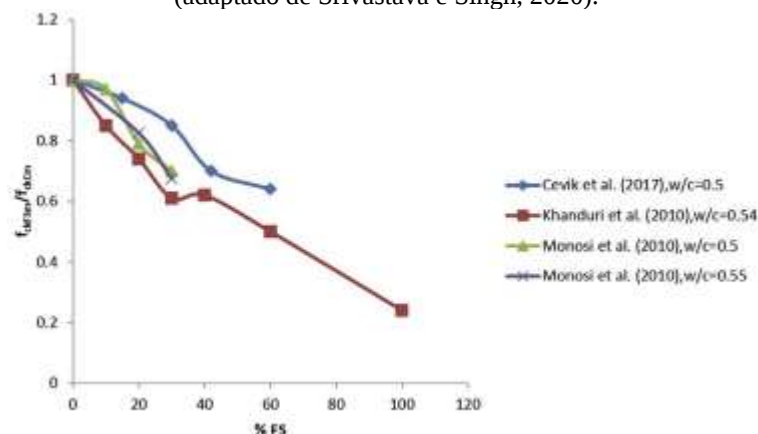
No Brasil, há regulamentações que permitem o uso da ADF na construção civil (Decisão de Diretoria CETESB nº 152/2007; NBR 15702:2009; Diretriz Técnica FEPAM nº 01/2010; Deliberação Normativa COPAM/2014 nº 196; Lei SC nº 17.479/2018; Lei PR nº 21.023). Em vista disso, as indústrias de fundição tentam incluir esse resíduo como um coproduto, utilizável no setor da construção civil, o que vem de encontro com o que menciona a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010), ou seja, redução dos impactos ambientais e a extração de recursos naturais associados aos seus processos, (MACHADO et al., 2023; BERALDO, 2020).

Algumas ações individuais, relacionadas ao uso da ADF na construção, têm demonstrado êxito, tanto nos aspectos técnicos, quanto ambientais (CARNIN et al., 2022). Esses autores relatam que a disposição final da ADF em aterros sanitários, reduz o ciclo de vida de recursos naturais como a areia, além da necessidade de observar normas operacionais específicas para evitar danos à saúde pública e ao meio ambiente. Entretanto, ainda são insipientes, quando focamos nos aspectos de contaminação ambiental (ar, água e solo), pois não há informações suficientes para se definir a possibilidade de toxicidade dos seres vivos.

As principais aplicações da ADF envolvem materiais cimentícios (concretos, argamassas e pré-fabricados), obras geotécnicas e no setor de pavimentação (camadas estruturais e misturas asfálticas). Os resultados desses estudos indicam viabilidade técnica, além de aspectos de durabilidade compatíveis aos materiais convencionais (CANDIAN FILHO et al., 2022; DOMINGUES et al., 2022; CARNIN et al., 2022; MAVROULIDOU e LAWRENCE, 2019; FERREIRA et al., 2014;).

Entretanto, estudos específicos sobre o uso da ADF em argamassas ainda são poucos, apesar da maior viabilidade devido às características físicas da ADF (granulometria), compatíveis principalmente com as especificações técnicas das argamassas de revestimento. Os poucos estudos sobre esse tipo de utilização confirmam a viabilidade técnica (SABOUR et al., 2022; GHISLENI e LIMA, 2021; FEIJOO et al., 2021; MARAN et al., 2021; MATOS et al., 2020; SRIVASTAVA e SINGH, 2020; ÇEVİK et al., 2017; CECCHIN et al., 2016). Cechin et al. (2016) estudaram o uso de ADF em argamassas de revestimento nos teores de 10% a 100%, analisando o comportamento mecânico. Os resultados de resistência à compressão (após 28 dias de cura) indicaram que a ADF não prejudicou a resistência das argamassas em relação ao traço referência. Já Çevik et al. (2017) realizaram um estudo sobre o uso de ADF em argamassas, com substituição da areia por ADF entre 10 e 60%. Os estudos indicaram que até 15% a presença da ADF não prejudicou as propriedades mecânicas das argamassas estudadas, o que foi justificado pelo maior envolvimento das partículas pela pasta cimentícia. Mas os resultados publicados não são coerentes entre si, mesmo com iguais teores de ADF, conforme figura 1 (SRIVASTAVA e SINGH, 2020), o que pode ser explicado pela variabilidade dos aspectos físico-químicos dos lotes de ADF utilizados.

Figura 1. Resistência à compressão de argamassas com variação dos teores de ADF (adaptado de Srivastava e Singh, 2020).



Portanto, o objetivo desse estudo foi determinar as propriedades mecânicas de argamassas cimentícias com substituição da areia por ADF, a fim de verificar a viabilidade técnica das argamassas estudadas com esse tipo de resíduo industrial.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Os principais materiais utilizados nesta pesquisa foram reia quartzosa, proveniente de rocha britada (Limeira, SP), Cimento Portland CP II E-32 (NBR 16697: 2018) e amostra de ADF proveniente do processo de moldagem identificado como “areia verde” (figura 2). Esse tipo de ADF é composto areia, argila (bentonita) e pó de carvão mineral, classificada como Resíduo Classe II-A (não perigoso e não inerte) conforme parâmetros da NBR 10004 (ABNT, 2004). Os ensaios de caracterização dos materiais citados

compreendem Fluorescência de Raios X (FRX), Difração de Raios X (DRX), massa específica e granulometria (Tabelas 1 e 2).

Figura 2. Características visuais da amostra de ADF utilizada nas argamassas.



Tabela 1. Composição química da ADF e do CP II-F, conforme análises de Fluorescência de Raios X - FRX

| Amostra | Elementos químicos (%) |                  |      |                                |      |                 |    |   |    |      | PF (%) |
|---------|------------------------|------------------|------|--------------------------------|------|-----------------|----|---|----|------|--------|
|         | CaO                    | SiO <sub>2</sub> | MgO  | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CrO  | SO <sub>3</sub> | Si | K | Ca | Al   |        |
| ADF     | -                      | 90               | -    | 2,37                           | 1,25 | -               | -  | - | -  | 2,71 | -      |
| CP II-F | 63,4                   | 12,4             | 2,83 | 3,86                           | -    | 2,76            | -  | - | -  | -    | 10,8   |

Tabela 2. Caracterização Física das Amostras de Areia Quartzosa (AQ) e ADF, Fonte: Autores.

| Parâmetros                               | AQ         | ADF              |
|------------------------------------------|------------|------------------|
| Massa Unitária [Kg/m <sup>3</sup> ]      | 1499       | 1429             |
| Massa Específica [g/cm <sup>3</sup> ]    | 2,62       | 2,50             |
| Massa Esp. Aparente [g/cm <sup>3</sup> ] | 2,58       | 2,45             |
| Módulo de Finura (MF)                    | 2,03       | 1,2              |
| Classificação*                           | Areia fina | Areia muito fina |
| Diâmetro Máximo [mm]                     | 2,4        | 1,5              |
| Absorção de Água (%)                     | 0,4064     | 0,7685           |

\*Classificação granulométrica de acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2009).

Os teores de ADF das argamassas foram definidos em função das pesquisas desenvolvidas por Ferreira et al. (2016), onde foram estudados traços de argamassas com substituição da areia quartzosa por ADF nos teores de 30%, 50% e 100%. A proporção foi de 1:3,2 (CP:areia), sendo que os valores da relação água/cimento (a/c) de cada traço foram obtidos a partir dos ensaios de consistência (Flow Table), conforme metodologia e especificação das normas NBR 16606 (ABNT, 2018) e NBR 13276 (ABNT, 2016). Os resultados foram analisados estatisticamente com Software R, aplicando os testes ANOVA e de Tukey.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

A tabela 3 apresenta os resultados das argamassas, relacionando ensaios no estado fresco (índice de consistência, retenção de água e densidade, necessários à classificação conforme requisitos descritos na NBR 13281 (ABNT, 2005). Conforme classificação, verifica-se que a presença da ADF nas argamassas não alterou as classes em relação ao traço referência (T0).

Tabela 3. Resultados dos ensaios de índice de consistência, retenção de água, densidade e relação a/c dos traços.

| Traço | Índice de Consistência (mm) | Retenção de água (%) | Classe | Densidade (Kg/m <sup>3</sup> ) | Classe | Relação a/c |
|-------|-----------------------------|----------------------|--------|--------------------------------|--------|-------------|
| T 0   | 261                         | 83                   | U3     | 2110                           | D6     | 0,68        |
| T 30  | 261                         | 83                   | U3     | 2146                           | D6     | 0,71        |
| T50   | 262                         | 85                   | U3     | 2141                           | D6     | 0,75        |
| T100  | 261                         | 83                   | U3     | 2126                           | D6     | 0,81        |

A tabela 4 apresenta os requisitos descritos na NBR 13281 (ABNT,2005) para determinar as propriedades das argamassas no estado endurecido, e respectivas classes. Para as classes das argamassas conforme a densidade aparente no estado endurecido, observa-se uma redução dos valores, os quais não foram suficientes para alterar tal requisito, quando comparadas com o traço T0. Há uma redução na resistência à tração por flexão, com o aumento do teor de substituição da areia por ADF. Entretanto, os traços T50 e T100 apresentaram valores estatisticamente iguais entre si. Em relação à resistência à compressão, a redução é mais significativa (27% entre os traços T0 e T50; 46% entre os traços T0 e T100). Isso pode ser justificado pelo módulo de finura da ADF (1,5), o que a classifica como areia muito fina, apresentando maior área superficial e, portanto, necessitando de maior consumo de CP para manter a mesma relação da areia convencional (MARAN et al., 2021). Para melhorar as propriedades mecânicas das argamassas com ADF é necessário ajustar a relação água/material seco, além de propor o uso de adições e/ou aditivos.

Tabela 4. Resultados dos ensaios das argamassas no estado endurecido e respectivas classes, segundo NBR 13281 (ABNT, 2005).

| Traço | Densidade (kg/m <sup>3</sup> ) | Classe | Rt (MPa) | DP (MPa) | CV (%) | Classe | Rc MPa | DP (MPa) | CV (%) | Classe |
|-------|--------------------------------|--------|----------|----------|--------|--------|--------|----------|--------|--------|
| T 0   | 2190                           | M6     | 4,47     | 0,23     | 0,05   | R6     | 18,85  | 0,79     | 0,04   | P6     |
| T 30  | 2156                           | M6     | 3,92     | 0,24     | 0,06   | R6     | 17,71  | 0,78     | 0,04   | P6     |
| T50   | 2116                           | M6     | 3,21     | 0,005    | 0,001  | R5     | 13,78  | 2,18     | 0,15   | P6     |
| T100  | 2071                           | M6     | 3,21     | 0,32     | 0,09   | R5     | 10,18  | 2,32     | 0,23   | P6     |

Os valores da determinação do coeficiente de capilaridade foram obtidos conforme metodologia e especificação da norma NBR 15259 (ABNT, 2005) e estão apresentados na tabela 5. Os resultados indicam que o coeficiente de capilaridade das argamassas diminui com o aumento do teor de ADF, o que pode ser justificado pela sua classificação granulométrica (areia muito fina). Esta propriedade foi o suficiente para alterar a classe das argamassas com teores de 50% e 100% ADF.

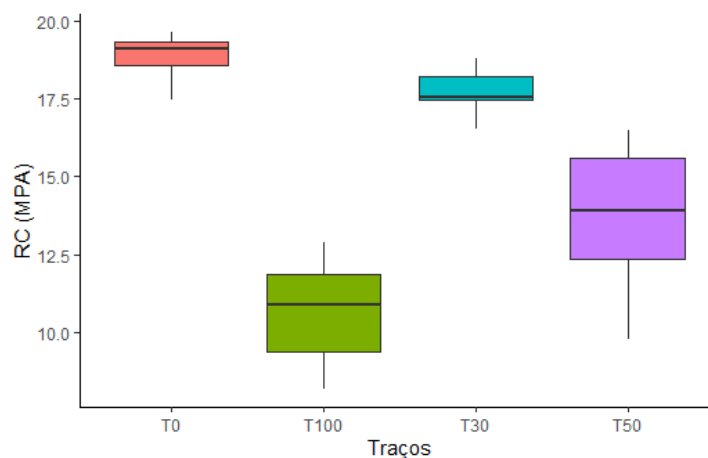
Tabela 5. Resultados dos ensaios de coeficiente de capilaridade e dados estatísticos (DP; CV).

| Traço | Coeficiente de capilaridade | Classe NBR 13281 | DP   | CV (%) |
|-------|-----------------------------|------------------|------|--------|
| T0    | 1,16                        | C2               | 0,17 | 0,03   |
| T30   | 1,12                        | C2               | 0,46 | 0,21   |
| T50   | 0,84                        | C1               | 0,27 | 0,07   |
| T100  | 0,83                        | C1               | 0,10 | 0,09   |

DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação.

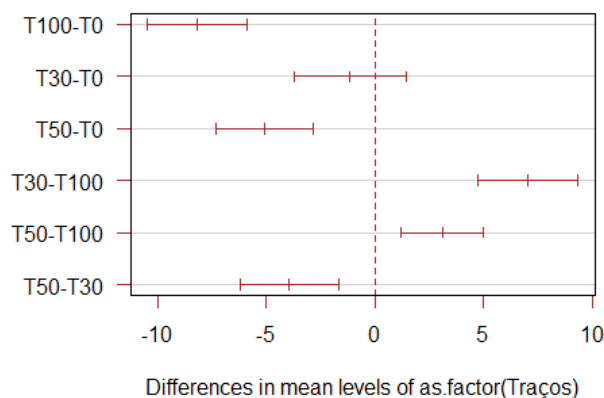
As análises estatísticas dos resultados de Rt e Rc estão apresentadas nas figuras 3 a 6. Os testes ANOVA e Tukey foram aplicados para se obter através de hipóteses, a comparação das médias de 3 ou mais amostras.

Figura 3. Teste ANOVA para obter os valores médios e intervalos (máx. e mín.) dos resultados de resistência à compressão dos traços de argamassas.



A figura 4 apresenta uma análise sobre a igualdade estatística entre os traços de argamassas, conforme resistência à compressão. Tal análise indica que há uma interação entre o traço T30 e o traço T0, ou seja, esses traços são iguais estatisticamente. Já os demais traços (T50 e T100) apresentam diferenças estatisticamente significativas entre eles e em relação ao T0.

Figura 4. Teste de Tukey para os resultados de resistência à compressão



As figuras 5 e 6 apresentam as mesmas análises estatísticas anteriores, entretanto, sobre os resultados de resistência à tração na flexão. O teste de Tukey indicou que ocorreu interação estatística apenas entre os traços T50 e T30, ou seja, são iguais estatisticamente. Portanto, para a  $R_t$  todos os traços com ADF apresentaram diferença estatística significativa, quando comparados com o traço T0. Isso indica que a ADF interferiu na  $R_t$  das argamassas, prejudicando seu comportamento mecânico. Entretanto, tal alteração não significa necessariamente um problema, pois as argamassas precisam apresentar maior deformação do que rigidez para suportar movimentações térmicas e do substrato.

Figura 5. Variação dos valores de resistência à tração na flexão, considerando os traços T0, T30 e T50.

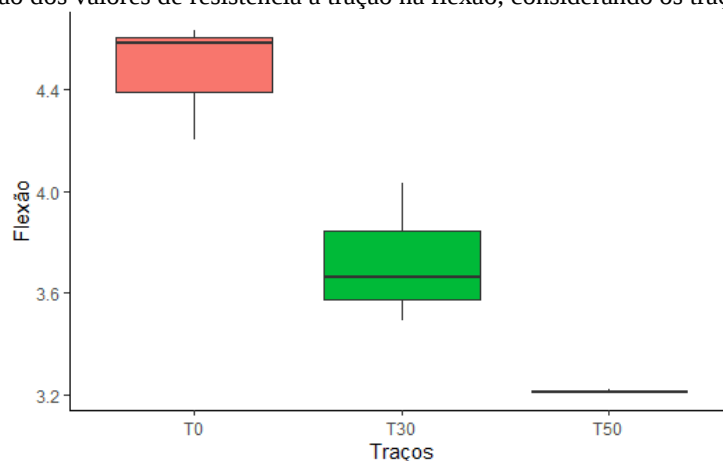
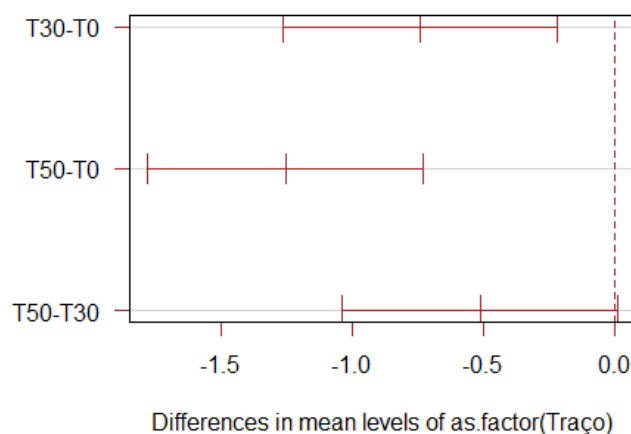


Figura 6. Variação dos valores de resistência à tração na flexão, considerando os traços T0, T30 e T50.



Portanto, com base nas propriedades mecânicas apresentadas e respectivas análises estatísticas, verifica-se que o teor de substituição da areia por ADF pode ser até 30% para os traços de argamassa e lote de ADF estudados. Ainda deve-se destacar que a redução não implica em inviabilizar e sim em direcionar a aplicação para argamassas de assentamento, que podem apresentar menor  $R_c$ .

## CONCLUSÕES

Com base no trabalho realizado, concluiu-se que:

- O teor máximo de ADF nas argamassas, considerando as propriedades mecânicas ( $R_t$  e  $R_c$ ), é de 30%, comparando com o traço T0;
- Em relação aos parâmetros no estado fresco, as argamassas com ADF não apresentaram alterações nas classes, segundo requisitos da NBR13281 (2005), comparado ao traço T0;
- Em relação aos parâmetros no estado endurecido (índice de capilaridade), as argamassas com 50% e 100% de ADF foram classificadas de forma diferente ao traço T0, o que pode ser justificado pela maior presença de finos na ADF.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. NBR 15.702: Areia descartada de fundição - Diretrizes para aplicação em asfalto e em aterro sanitário. Rio de Janeiro, 2009.
2. ABNT-NBR NM 45:2006. Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro.
3. ABNT-NBR NM 52:2009. Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro.
4. ABNT-NBR NM 248:2003. Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro.
5. ABNT-NBR 10004:2004. Resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro.
6. ABNT-NBR 16606:2018. Cimento Portland - Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro.
7. ABNT-NBR 13276:2016. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro.
8. ABNT-NBR 13277:2005. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos- Determinação da retenção de água. Rio de Janeiro.
9. ABNT-NBR 13278:2005. Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos- Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro.
10. ABNT-NBR 13279:2005. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro.
11. ABNT- NBR 13281:2005. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Requisitos. Rio de Janeiro.
12. USEPA – U.S. Environmental Protection Agency. Predicting the Toxicities of Chemicals to Aquatic Animal Species. OPP.;Washington, 2010.
13. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FUNDIÇÃO (ABIFA) (2019). Acesso em 09/04/2023. <https://www.abifa.org.br/>
14. RESOLUÇÃO CETESB-Decisão de diretoria nº 152/2007/C/E, de 08 de agosto de 2007.
15. RESOLUÇÃO CONAMA nº 307, de 5 de julho de 2002: Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil.
16. RESOLUÇÃO CONSEMA 011/2008.Critérios para a utilização da Areia Descartada de Fundição de materiais ferrosos na produção de concreto asfáltico e artefatos de concreto sem função estrutural.
17. MACHADO, D. M.; GAMBALONGA JR. B.; SIMÃO L.; RIBEIRO, M. J.; MONTEDO, O. R. K.; PAUPP-PEREIRA, F.; ARCARO, S. Valorization of Brazilian waste foundry sand from circular economy perspective. Journal of Cleaner Production,, 2023.
18. BERALDO, A. L. (organizador). Utilização de resíduos agroindustriais na construção. São Paulo: UNICAMP. ISBN 9786586253337. 2020.
19. CANDIAN FILHO, E. L.; FERREIRA, G. C. S.; NOGAROTTO, D. C.; POZZA, S. A. Pervious concrete with waste foundry sand: mechanical and hydraulic properties. Revista Matéria, v. 27, n. 1, 14 p., 2022.
20. DOMINGUES, L. G. F.; FERREIRA, G. C. S.; PIRES, M. S. G. Physicochemical and microbiological characteristics of waste foundry sand used in landfills. Environment Monitoring and Assessment, 194-725, 14 p., 2022.
21. CARNIN, R. L. P.; FERREIRA, G. C. S.; PIRES, M. S. G. Avaliação de risco sobre a utilização da areia descartada de fundição na construção civil. Revista ABIFA, p. 34-40, abril, 2022.
22. LAWRENCE, D., MAVROULIDOU, M. *Properties of concrete containing foundry sand*. In: 11th International Conference on Environmental Science and Technology, Concrete, 2009.
23. FERREIRA, G. C. S.; BUENO, G.
24. SABOUR, M. R.; DERHAMJANI, G.; AKBARI, M. Mechanical, durability properties and environmental assessment of geopolymer mortars containing waste foundry sand. Environmental Science and Pollution Research, v. 29, p. 24322-24333, 2022.

25. GHISLENI, G.; LIMA, G. T. S. Produção de pisos intertravados com incorporação de areia de fundição. 7º ENARC – Encontro Nacional de Aproveitamento de Resíduos na Construção Civil, e-5 nov., Porto Alegre, RS, 2021.
26. FEIJOO, B. A.; TOBÓN, J. I.; RESTREPO-BAENA, O. J. Substitution of aggregates by waste foundry sand: effects on physical properties of mortars, *Materiales de Construcción*, v. 71, edição 343, jul-sep., 2021.
27. MARAN, A. P.; BARRETO, M. F. M.; MASUERO, BORGES, A. DAL MOLIN, D. C. C. Reutilização de areia de fundição em argamassas. 7º ENARC – Encontro Nacional de Aproveitamento de Resíduos na Construção Civil, e-5 nov., Porto Alegre, RS, 2021.
28. MATOS, P. R.; PILAR, R.; BROMERCHENKEL, L. H.; SCHANKOSKI, R. A.; GLEIZE, P. J. P.; BRITO, J. Self-compacting mortars produced with fine fraction of calcined waste foundry sand (WFS) as alternative filler: fresh-state, hydration and hardened-state properties, v. 253, 16 p., 2020.
29. SRIVASTAVA, A.; SINGH, S. K. Utilization of alternative sand for preparation of sustainable mortar: a review. *Journal of Cleaner Production*, v. 253, 16 p., 2020.
30. ÇEVIK, S.; MUTUK, T.; OKTAY, B. M.; DEMIRBAS, A. K. Mechanical and microstructural characterization of cement mortars prepared by waste foundry sand. *Journal A Ceramic Society*, v. 53, p. 829-837, 2017
31. CECHIN, L., TOKARSKI, B. R., TRENTO, T.P.W., MATOSKI, A. Utilização de areia industrial em argamassa de revestimento. *Divulgação Científica e tecnológica do IFPB*, nº 29. Revista Principia. Paraíba 2016.