# ECONOMIA CIRCULAR VOLTADA AO DESENVOLVIMENTO DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS PARA MOBILIDADE URBANA

**Palavras-Chave: Resíduos sólidos, propriedades mecânicas, materiais sustentáveis**

**Autores:**

**Guilherme Naidhig Quirino, FT - UNICAMP**

**Victor Mira di Mambro, FT - UNICAMP**

**Daniel Augusto Oliveira Massolla, FT - UNICAMP**

**Dra. Gisleiva C. S. Ferreira (orientadora), FT/FECFAU – UNICAMP**

**Camila Rodrigues Moura, FT – UNICAMP**

**Ivair José Sbroio, FT - UNICAMP**

## INTRODUÇÃO:

A areia descartada de fundição (ADF) é um resíduo proveniente da indústria de fundição, que em muitos casos, é descartada em aterros sanitários industriais, sem antes verificar o seu uso em outros setores produtivos, o que poderia aumentar a visa útil desses aterros (Bhardwaj e Kumar, 2017; Dyer et al., 2022). No Brasil, o setor de fundição produz cerca de 3 milhões de toneladas de ADF por ano (ABIFA, 2023). Já no cenário internacional, destacam-se os EUA e a China, com um parque industrial de aproximadamente 3.000 empresas desse setor, resultando na geração anual de 10 milhões de toneladas.

Considerando as diversas opções de uso da ADF em outras atividades, destaca-se a construção civil e, mais especificamente, os materiais cimentícios (concretos, argamassas e pré-moldados de concreto) (CANDIAN FILHO et al., 2022; DOMINGUES et al., 2025). Devido a composição química de 90% de sílica (areia), os lotes de ADF podem ser utilizados como agregado miúdo, principalmente em argamassas devido não haver exigências de propriedades estruturais (FERREIRA et al., 2023; CASALI et al., 2018). Casali et al. (2018) estudaram argamassas com ADF e concluíram que o teor máximo de substituição da areia é de 30%, comparando com a resistência à compressão da argamassa referência (0%ADF). Essa restrição deve-se principalmente pela maior finura da ADF, o que demanda maior relação água/material seco, para a manter a trabalhabilidade das argamassas.

Conforme a NBR 13281-1 (ABNT, 2023), o módulo de elasticidade dinâmico (Ed) é um dos parâmetros mais importantes para a classificação de argamassas de revestimento. Para isso, é necessário realizar ensaios de ultrassom para se obter a velocidade do pulso ultrassônico (VPU) e, consequentemente, obter o Ed (NBR 15630, 2008).

Segundo o estudo de Massolla et al. (2025), a substituição de 30% de areia por ADF resultou em argamassas com menor rigidez, o que é benéfico quando o uso é direcionado para o revestimento de paredes externas. apresentou impacto no Ed de argamassas de revestimento comprometida significativamente.

Portanto, esse trabalho tem como objetivo principal determinar o Ed de argamassas com ADF, além de obter a correlação entre os valores de VPU e Rc. Com isso, espera-se viabilizar a produção e uso de argamassas de revestimento com ADF, contribuindo para a economia circular nos dois setores diretamente envolvidos, além de reduzir os impactos ambientais oriundos da deposição deste tipo de resíduo em aterros sanitários. Agregar valor aos resíduos industriais é condição essencial para viabilizar a produção de produtos que utilizam recursos naturais.

## METODOLOGIA:

Os principais materiais utilizados nesta pesquisa estão descritos na Tabela 1, com suas respectivas origens e localizações. As argamassas foram moldadas conforme a norma NBR 13281 (2023), dessa forma, variou-se o teor de ADF (30, 50 e 70%), gerando 3 traços diferentes. Foram realizados ensaios de densidade no estado endurecido, determinação da velocidade do pulso ultrassônico (VPU), resistência à tração na flexão (Rt) e à compressão (Rc), conforme normas NBR 13279 (ABNT, 2005) e NBR 15630 (ABNT, 2016), respectivamente.

| Material | Sigla | Origem/tipo | Localização |
|---|---|---|---|
| Cimento Portland | CP II-E-40 RS | Cimento TUPI-Indústria de cimento (Brasil) | Região de Mogi das Cruzes, SP. |
| Cal hidratada | CH | Votorantim | Limeira, SP |
| Areia quartzosa | AQ | Construvaz | Limeira, SP |
| Areia descartada de fundição) | ADF | Industria de fundição | Eng.Coelho, SP. |
| Água | - | Rede de abastecimento | Limeira, SP |

Tabela 1. Materiais utilizados na confecção das argamassas e siglas, além das respectivas origens.

Fonte: Arquivo pessoal dos autores

## RESULTADOS E DISCUSSÃO:

Os resultados preliminares envolvem a determinação das propriedades no estado endurecido das argamassas com ADF e a referência (Rt e Rc), os quais estão apresentados na Tabela 2. Além disso, estão apresentados os dados da análise estatística descritiva e classificação das argamassas, com base na Rt e Rc, conforme NBR 13281 (ABNT, 2023). Na tabela 3 se encontra os dados do modulo de elasticidade dinâmico (Ed), conforme NBR 15630 (ABNT, 2008).

| Traço | Densidade | Classe NBR 13281 | Rt | DP | CV | Classe NBR 13281 | Rc | DP | CV |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | (kg/m$^3$) | | (MPa) | (MPa) | (%) | | (MPa) | (MPa) | (%) |
| T 0 | 1941,10 | DE4 | 1,57 | 0,08 | 0,05 | R2 | 5,67 | 0,55 | 0,10 |
| T 30 | 1892,59 | DE4 | 0,58 | 0,30 | 0,52 | R2 | 2,89 | 0,29 | 0,10 |
| T 50 | 1801,16 | DE4 | 0,71 | 0,32 | 0,45 | R2 | 1,44 | 0,53 | 0,37 |
| T 70 | 1694,53 | DE3 | 0,37 | 0,10 | 0,26 | R2 | 3,20 | 0,23 | 0,07 |

*Rt: resistência à tração na flexão média; Rc: resistência à compressão média; DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação.*

*Tabela 2. Resultados das propriedades das argamassas no estado endurecido e classificação conforme requisitos da NBR 13281 (ABNT, 2023). Valores da análise estatística descritiva.*

*Fonte: dos autores*

| Traço | Densidade | VPU | Ed | DP | CV | Classe |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | (kg/m$^3$) | (mm/ µs) | (GPa) | | (%) | |
| T 0 | 1941,10 | 2,75 | 13,24 | 0,70 | 0,05 | E1 |
| T 30 | 1892,59 | 2,32 | 9,17 | 0,39 | 0,04 | E2 |
| T 50 | 1801,16 | 2,32 | 7,18 | 0,46 | 0,06 | E3 |
| T 70 | 1694,53 | 2,10 | 4,96 | 0,26 | 0,05 | E4 |

*Tabela 3 – Valores de densidade, VPU e Ed dos traços de argamassas estudados. Análise estatística descritiva (DP e CV) das argamassas.*

De acordo com os resultados apresentados nas tabelas 2 e 3, verifica-se que as propriedades mecânicas das argamassas apresentaram reduções significativas com o aumento do teor de ADF. resistência mecânica das argamassas reduziu com o aumento do teor de ADF. Entretanto, as argamassas mantiveram a mesma classificação segundo a densidade e Rt (DE4 e R2, respectivamente).

Em relação ao Ed (tabela 3), parâmetro mais importante às argamassas de revestimento, as reduções significativas em relação ao T0 (31 a 62%), podem ser consideradas benéficas, pois esse tipo de argamassa deve apresentar menor rigidez, ou seja, menor Ed, para absorver tensões resultantes das deformações oriundas das variações térmicas, evitando fissuras e desplacamentos (SILVA et al., 2008; MARQUES et al., 2019; MASSOLLA et al., 2024).

A figura 1 apresenta o coeficiente de determinação ($R^2$= 0,68), obtido a partir da regressão linear entre a VPU e Rc. Com isso, é possível afirmar que é possível estimar a Rc destas argamassas a partir dos valores de VPU, com esse tipo de regressão e idade de cura (28 dias). Vale ressaltar que outros pesquisadores também utilizar esse tipo de correlação para argamassas mistas com resíduos industrias (SOARES et al., 2023).

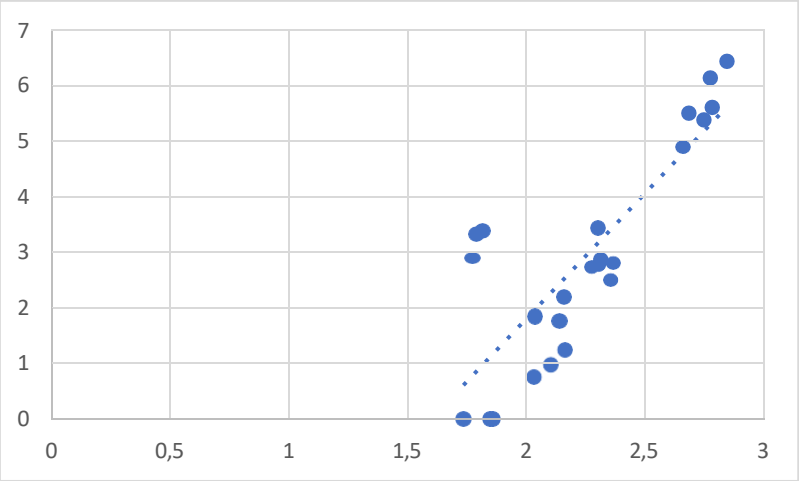


*Figura 1 – Correlação entre os valores de VPU e Rc das argamassas estudadas.*

*fonte: dos autores*

## CONCLUSÕES:

De acordo com os estudos, conclui-se que, a ADF pode ser usada para substituir a areia convencional até o teor de 30%, com perdas nas propriedades mecânicas pouco significativas. Esse comportamento pode ser justificado pelo aumento da relação água/materiais secos das argamassas para se manter a trabalhabilidade obtida com o traço T0. Mas vale salientar que mesmo assim, as argamassas foram igualmente classificadas, conforme a NBR 13281, considerando a Rt e densidade no estado endurecido.

Os valores de Ed apresentaram redução significativa com o aumento do teor de ADF nas argamassas, o que pode ser considerado positivo, haja vista a necessidade de menor rigidez para revestimentos de paredes externas (melhor capacidade de absorção das deformações por expansão e retração do substrato).

## BIBLIOGRAFIA

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FUNDIÇÃO - **ABIFA. Boletim informativa de desempenho** - Julho de 2023. Índices setoriais.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13281 - **Argamassas inorgânicas** - Requisitos e métodos de ensaios. Rio de Janeiro, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15630: Argamassa e concreto – **Determinação da velocidade de propagação de pulso ultrassônico**. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

BHARDWAJ, Bavita; KUMAR, Pardeep. Waste foundry sand in concrete: A review. **Construction and Building Materials**, v. 156, p. 661-674, 15 dez. 2017.

DYER, . P. O. L.; COPPIO, . L.; SILVA, . A.; CIVIDANES, . S.; KLINSKY, . M. G.; DE LIMA, . G. **ARTEFATOS COM AREIA DESCARTADA DE FUNDIÇÃO E SUA VIABILIDADE**. **MIX Sustentável**, *[S. l.]*, v. 8, n. 4, p. 97–106, 2022. DOI: 10.29183/2447-3073.MIX2022.v8.n4.97-106. Disponível em: https://ojs.sites.ufsc.br/index.php/mixsustentavel/article/view/4966. Acesso em: 1 ago. 2025.

LIMA, T. G.; FERREIRA, G. C. S. **Desempenho de argamassas com areia descartada de fundição**. XXIX Congresso de Iniciação Científica da UNICAMP, 2021.

MASSOLA, D. A. O.; et al. **Resistência de aderência de argamassas cimentícias com areia descartada de fundição**. IBRACON 65° Congresso Brasileiro do concreto, 2024, Maceió- AL.

MASSOLA, D. A. O.; FERREIRA, G. C. S.; MOURA, C. R.; SBROIO, I. J.; CARNIN, R. L.P.; PIRES, M. S. G. **Propriedades mecânicas de argamassas com areia descartada de fundição**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 15., 2025. Anais [...]. [S. l.], 2025. DOI: 10.46421/sbta.v15.6827. Disponível em: https://eventos.antac.org.br/index.php/sbta/article/view/6827.

CASALI, Juliana Machado; MIGUEL, Thainá Fortunato; FELIZARDO, Caroline Castanhetti; MEIRA, Natacha dos Santos; DOMINGUINI, Lucas; BETIOLI, Andrea Murillo. **Caracterização e influência do teor do resíduo de areia de fundição fenólica em argamassas de revestimento**. Gestão & Produção, São Carlos, v. 25, n. 1, p. 16-31, 2018. DOI: https://doi.org/10.1590/s1678-86212018000100220.

FERREIRA, G. C. S.; ASSIS, G. M.; MELO, R. C. **Comportamento mecânico de argamassas com areia de descartada de fundição (ADF)**. In: VII Encontro de Sustentabilidade em Projeto (ENSUS), Florianópolis, 8 de maio de 2019.

SILVA, N. G.; CAMPITELI, V. C. **Correlação entre módulo de elasticidade dinâmico e resistências mecânicas de argamassas de cimento, cal e areia**. **Ambiente Construído**, *[S. l.]*, v. 8, n. 4, p. 21–35, 2008. Disponível em: https://seer.ufrgs.br/index.php/ambienteconstruido/article/view/6386. Acesso em: 1 ago. 2025.

MARQUES, Ana Isabel et al. Módulo de elasticidade dinâmico de argamassas. Revista Construindo, Belo Horizonte, v. 11, ed. especial: Congresso Test&e Portugal, p. 63–78, 2019. Disponível em: http://www.fumec.br/revistas/construindo/index. Acesso em: 01 ago. 2025.