

Análise comparativa e comportamento temporal da areia descartada de fundição incorporada em matrizes cimentícias

Comparative analysis and temporal behavior of discarded foundry sand incorporated into cementitious matrices

Natália Salamoni 

Gustavo Gutierrez de Oliveira 

Abrahão Bernardo Rohden 

Eduarda Fraga Olivo 

João Lucas Nicolini 

Fabiano Raupp Pereira 

Resumo

A reutilização de resíduos industriais é crucial para práticas sustentáveis na indústria da fundição. Este estudo caracteriza a areia descartada de fundição (ADF), comparando-a com a areia comum (CS) e avaliando seu comportamento temporal e variação dimensional em matrizes cimentícias. Foram realizados ensaios de granulometria, massa específica e unitária, índice de vazios, absorção de água, MEV, classificação do resíduo sólido, análise de fenóis no extrato lixiviado, perda ao fogo, TGA, FTIR, GC-MS, EDS e toxicidade aguda. A análise temporal mostrou uma redução nos valores de carbono com o tempo de armazenamento, atribuída à alteração química dos compostos orgânicos. Ensaios de perda ao fogo e TGA corroboraram as concentrações de fenol detectadas, enquanto análises por FTIR indicaram decomposição parcial da resina fenólica no processo industrial. A variação dimensional da argamassa no estado fresco foi avaliada, destacando a importância de utilizar moldes de 20 cm com discos indicadores para medição precisa. Os resultados sugerem que a ADF pode ser utilizada como matéria-prima na construção civil, conforme a legislação vigente.

Palavras-chave: Areia de fundição fenólica uretânica. Caracterização físico-química. Caracterização ecotóxica. Variação dimensional.

Abstract

The reuse of industrial waste is crucial for sustainable practices in the foundry industry. This study characterizes discarded foundry sand (WFS), comparing it with common sand (CS) and evaluating its temporal behavior and dimensional variation in cementitious matrices. Granulometry tests, fine material content, specific and bulk density, void ratio, water absorption, MEV, solid waste classification, phenol analysis in leachate extract, loss on ignition, TGA, FTIR, GC-MS, EDS, and acute toxicity tests were conducted. Temporal analysis showed a reduction in carbon values over storage time, attributed to the chemical alteration of organic compounds. Loss on ignition and TGA tests corroborated the detected phenol concentrations, while FTIR analysis indicated partial decomposition of the phenolic resin during the industrial process. The dimensional variation of fresh mortar was assessed, highlighting the importance of using 20 cm molds with indicator discs for precise measurement. The results suggest that WFS can be used as a raw material in the construction industry, in accordance with current legislation.

Keywords: Phenolic urethane foundry san. Physicochemical characterization. Ecotoxicological characterization. Dimensional variation.

¹Natália Salamoni
¹Universidade Regional de Blumenau
Blumenau - SC - Brasil

²Gustavo Gutierrez de Oliveira
²Universidade Regional de Blumenau
Blumenau - SC - Brasil

³Abrahão Bernardo Rohden
³Universidade Regional de Blumenau
Blumenau - SC - Brasil

⁴Eduarda Fraga Olivo
⁴Universidade do Extremo Sul
Catarinense
Criciúma - SC - Brasil

⁵João Lucas Nicolini
⁵Universidade do Extremo Sul
Catarinense
Criciúma - SC - Brasil

⁶Fabiano Raupp Pereira
⁶Universidade do Extremo Sul
Catarinense
Criciúma - SC - Brasil

Recebido em 06/06/24
Aceito em 15/10/24

Introdução

Com uma longa tradição e forte presença em diversos segmentos industriais, a fundição no Brasil se destaca como um dos pilares da produção de bens de consumo duráveis, máquinas e equipamentos. Com uma produção superior a 180 mil toneladas/mês, o país se destaca pela geração de mais de 60 mil empregos em toda a cadeia produtiva (ABIFA, 2022). Ainda conforme o relatório disponibilizado pela Associação Brasileira de Fundição (ABIFA) em dezembro de 2022, a distribuição regional do setor apresenta maior produção de produtos de fundição na Região Sul, com 44% da produção, seguidos por São Paulo e pela região de Minas Gerais, cada uma com cerca de 25% da produção. Entretanto, a produção em larga escala de fundidos acaba resultando na geração de resíduos sólidos que, por vezes, podem retornar à produção como matéria-prima, como materiais metálicos, escória e areia descartada de fundição (ADF) (Moraes *et al.*, 2014; Ying-Min; Tian-Shu; Wei-Hua, 2018; Ahmad *et al.*, 2022).

A ADF é proveniente da mistura de agregado miúdo (areia) com aglomerante, sendo utilizada para a confecção de moldes de areia usados para a fundição de metais ferrosos, ferro e aço (Casotti; Bel Filho; Castro, 2011). Para cada tonelada de metal fundido, é necessário de 0,8 a 1 tonelada de areia de fundição para a fabricação dos moldes, sendo que parte dessa areia pode ser reaproveitada. No entanto, mesmo com o reaproveitamento, cerca de 15% dela acaba sendo descartada (Casotti; Bel Filho; Castro, 2011; Prabhu; Hyun; Kim, 2014). Considerando uma produção mensal de 180 mil toneladas de fundidos, das quais 92% são compostas por ferro e aço (ABIFA, 2022), estima-se que pelo menos 20 mil toneladas de ADF sejam geradas mensalmente, representando um enorme desafio em termos de gestão de resíduos e impactos ambientais deste setor, já que este material é destinado à aterros sanitários e industriais.

A areia de fundição quimicamente aglomerada é constituída por aglomerantes orgânicos, como resinas epóxi, fenólicas uretânicas e furânicas (ASTM, 2018a; Dyer *et al.*, 2021; Gupta; Siddique; Belarbi, 2021). É comum o uso de areias aglomeradas com resinas fenólicas uretânicas de cura fria em processos de fabricação de machos e moldes para fundição de ligas de aço e alumínio. A resina é composta por dois elementos principais: polímero de fenol-formaldeído e isocianato polimérico (poliisocianato), os quais são misturados com solventes e aditivos. Esses componentes reagem com um catalisador gasoso, como trietilamina ou dimetilaminotrietilamina, resultando na formação de um polímero de uretano sólido (poliuretano) (Svidró *et al.*, 2017; Mhamane; Rayjadhav; Shinde, 2018).

Na própria composição da areia utilizada na fundição, além da presença predominante de sílica (SiO₂), podem ser encontrados outros elementos em menor proporção (Torre, 1975; Gupta; Siddique; Belarbi, 2021). Essa diversidade de elementos na sua composição ressalta a complexidade do material e influencia diretamente nas propriedades do molde e da peça fundida. Além disso, os resíduos resultantes do processo de fundição podem conter vestígios de metais provenientes do processo de fundição, que entram em contato direto com a areia, ficando retidos, assim como os metais presentes na matéria-prima (Dungan; Dees, 2009; Pace *et al.*, 2017).

Diante da diversidade na composição das misturas de areia de moldagem na indústria de fundição, os resíduos resultantes desse processo apresentam propriedades físico-químicas distintas (Siddique *et al.*, 2015), desafiando a gestão sustentável da ADF. A complexidade dessas composições requer uma análise cuidadosa dos possíveis impactos negativos sobre a saúde humana e o meio ambiente. Portanto, é crucial avaliar a ADF antes de sua reutilização, reciclagem ou descarte, a fim de promover práticas sustentáveis de gestão de resíduos e mitigar seus impactos adversos.

O panorama legislativo referente à reutilização e reciclagem da ADF abrange uma variedade de regulamentações em diferentes países. No Brasil, a legislação referente à gestão dos resíduos sólidos, em particular a Lei Federal nº 12.305/2010, estabelece diretrizes gerais para o manejo dos resíduos (Brasil, 2010), enquanto Leis Estaduais como a Lei nº 17.479/2018 (Santa Catarina, 2018), a Lei nº 21.023/2022 (Paraná, 2022) e a Lei nº 16.130/2024 (Rio Grande do Sul, 2024) tratam especificamente da utilização das ADF em concreto asfáltico; concreto e argamassa para artefatos de concreto; fabricação de telhas, tijolos e outros artigos de barro cozido para artigos em cerâmica; assentamento de tubulações e de artefatos para pavimentação; base, sub-base, reforço de subleito para execução de estradas, rodovias, vias urbanas; e cobertura diária em aterro sanitário. Essas leis regulamentam a destinação ambientalmente adequada da ADF, determinando critérios como classificação do resíduo (Resíduo não perigoso classe II-A ou II-B), pH (entre 5,5 e 10,0), toxicidade (menor que 8 para aplicações de assentamento e recobrimento de tubulações; menor que 16 para outras aplicações), conformidade com normas técnicas aplicáveis e autorização ambiental para uso da ADF (Santa Catarina, 2018; Paraná, 2022; Rio Grande do Sul, 2024). Projetos de lei, como o Projeto de Lei Federal nº 1.676/2022, visam expandir o uso da ADF na construção civil, seguindo diretrizes semelhantes às Leis Estaduais (Brasil, 2022). Outros estados brasileiros também estão formulando diretrizes quanto à utilização

da ADF, como é o caso de Minas Gerais, que com a Lei Estadual nº 24.444 (Minas Gerais, 2023) prioriza a utilização da ADF em obras públicas de construção e conservação de rodovias e cobertura de aterros sanitários (Minas Gerais, 2023).

Quanto às normas técnicas brasileiras, são descritas algumas condições de utilização e destinação adequada da ADF. A NBR 15702 (ABNT, 2009) define procedimentos para a utilização da ADF como matéria-prima em concreto asfáltico e cobertura diária em aterro sanitário, enquanto a NBR 15984 (ABNT, 2011) estabelece diretrizes para o projeto, construção e operação de áreas destinadas ao recebimento e processamento da ADF, visando seu reuso, reciclagem ou disposição adequada. Entre as diretrizes estabelecidas, as normas especificam que a ADF seja classificada como resíduo não perigoso, classe II, contendo em seu extrato aquoso o limite máximo de 3,0 mg/L de fenol total.

Nos Estados Unidos e na Austrália, agências ambientais desempenham um papel crucial na regulamentação da ADF. A Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (United States Environmental Protection Agency - U.S. EPA) estabelece diretrizes para o uso da ADF proveniente da fundição de ferro, aço e alumínio em solos e estradas (U.S. EPA, 2022), enquanto as normas técnicas fornecem especificações para seu emprego como material de enchimento estrutural e de aterro (ASTM, 2018a) e em misturas asfálticas (ASTM, 2018b). Já na Austrália, a Agência de Proteção Ambiental de New South Wales (New South Wales Environment Protection Agency - NSW EPA) estabelece critérios químicos para a aplicação da ADF em obras de construção e estradas, reconhecendo seu potencial como corretivo do solo (NSW EPA, 2014).

Em relação à ADF quimicamente aglomerada com resina fenólica, a legislação francesa permite sua aplicação em diversas áreas. A Ordem relativa à eliminação de areias de fundição na França permite seu uso em estradas e produtos com ligantes hidráulicos, desde que o teor de fenol seja inferior a 5 mg/kg de areia em relação à matéria seca no extrato lixiviado (França, 1991). Essas regulamentações refletem a preocupação global com a gestão sustentável de resíduos industriais, buscando promover a reutilização e reciclagem da ADF enquanto se protege o meio ambiente e a saúde pública.

Ainda, referente à incorporação da ADF em argamassas, os estudos de Silva *et al.* (2011) e Oliveira (2014) identificaram, de forma ocasional, a expansão de misturas contendo o resíduo. Essa propriedade expansiva ainda carece de estudos mais aprofundados para que possa ser melhor entendida, ensaiada e controlada.

Ao considerar a urgência crescente em abordar questões ambientais e promover práticas sustentáveis, o objetivo deste estudo foi analisar as propriedades físicas, químicas e ecotóxicas da ADF fenólica uretânica. Além disso, este trabalho realiza uma análise periódica do resíduo frente à caracterização química. A variação dimensional da argamassa no estado fresco também foi avaliada periodicamente, buscando aprimorar sua metodologia. Pretende-se, assim, contribuir para práticas de gestão sustentáveis de resíduos industriais, fornecendo informações essenciais que possam embasar políticas públicas, diretrizes empresariais e ações individuais voltadas para a mitigação dos impactos ambientais decorrentes da produção e descarte da ADF.

Metodologia

Materiais

A ADF utilizada neste trabalho é proveniente do processo de fundição de ligas de aço em moldes de areia quimicamente aglomerada com resina fenólica uretânica de cura a frio. Conforme informações da indústria em que foram coletadas as amostras, a mistura de areia para moldagem de peças fundidas foi composta por areia de sílica, resina (fenol), isocianato polimérico (metileno diisocianato), catalisador (solvente orgânico e imidazol), cromita e pó de carvão. Entretanto, tanto a frequência com que cada areia é utilizada antes de ser descartada quanto a quantidade de materiais presentes na mistura de cada areia para moldagem variam de acordo com a peça que será moldada. Como, no fim, todo material de desmolde é misturado, resultando na ADF, este resíduo pode apresentar propriedades distintas em cada lote descartado.

Para este estudo foram realizadas três coletas de amostras de ADF em períodos distintos (Figura 1), conforme a NBR 10007 (ABNT, 2004a).

Ainda, foram utilizados ainda outros materiais, como areia comum (CS) empregada como agregado miúdo na construção civil, com granulometria modificada para se tornar semelhante a granulometria média das ADFs, cimento Portland composto de filer calcário CP II - F 32, com massa específica de 3,03 g/cm³, e água proveniente da rede pública de abastecimento.

Figura 1 - Amostras de ADF coletada



Métodos

As três amostras de ADFs coletadas, denominadas ADF1, ADF2 e ADF3, foram caracterizadas por meio de ensaios físicos, químicos e ecotóxico (Figura 2). Exceto pelos ensaios de classificação do resíduo sólido e toxicidade aguda, que foram realizados apenas com uma das amostras coletadas (ADF1). Alguns ensaios também foram conduzidos com a CS para permitir comparações de resultados.

Adicionalmente, a ADF1 foi investigada quanto ao tempo e modo de armazenamento, bem como sua incorporação em matriz cimentícia, por meio do ensaio de variação dimensional da argamassa no estado fresco.

Caracterização física

O ensaio de granulometria seguiu a norma NBR NM 248 (ABNT, 2003), utilizando um peneirador mecânico e a série normal do conjunto de peneiras. Para a determinação do teor de material pulverulento, conforme a norma NBR 16973 (ABNT, 2021a), foi utilizada apenas a peneira de abertura 0,075 mm. É importante observar que a quantidade de material mais fino que a abertura de malha dessa peneira foi determinada por lavagem, o que remove materiais solúveis em água, como argila e outros materiais dispersivos, das partículas de ADF e CS.

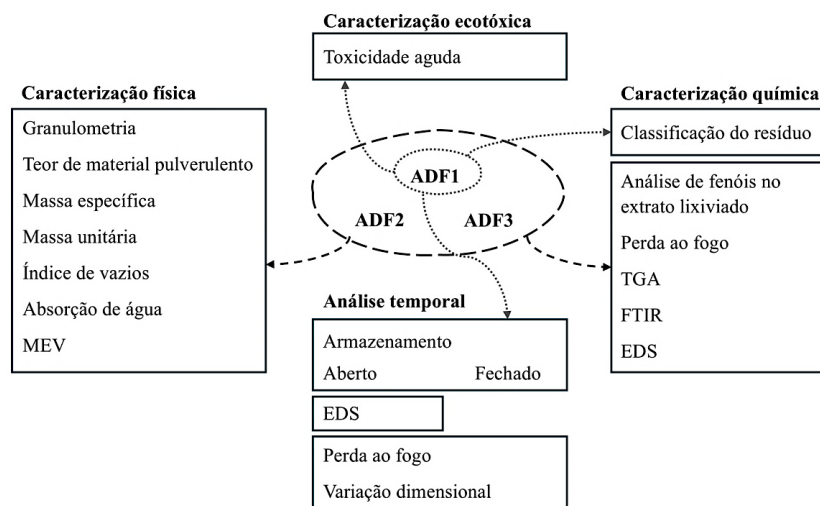
Foram realizados ainda ensaios de massa específica, conforme a norma NBR 16916 (ABNT, 2021b), massa unitária e índice de vazios, conforme a NBR 16972 (ABNT, 2021c), e absorção de água, conforme a NBR 16916 (ABNT, 2021b).

Para a análise das partículas por microscopia eletrônica de varredura (MEV), os grãos de ADF e CS foram dispersos em suportes e fixados com fita de carbono. Posteriormente, foram metalizados com ouro usando o equipamento Quorum Q150R ES, com uma corrente de 20 mA, por um período de 120 segundos, para garantir a condutividade da amostra. As imagens foram obtidas em um equipamento de MEV da Tescan, operando com uma voltagem de 10 kV e magnificações de até duas mil vezes.

Caracterização químicas

A classificação da ADF quanto aos riscos à saúde pública e ao meio ambiente foi realizada conforme a norma NBR 10004 (ABNT, 2004b). Além da avaliação da corrosividade, reatividade e patogenicidade, os resíduos foram expostos aos ensaios de lixiviação (ABNT, 2004c) e solubilização (ABNT, 2004d).

Figura 2 - Fluxograma metodológico



Também foram quantificados os fenóis totais presentes no extrato lixiviado do resíduo através do espectrofotômetro de colorimetria, segundo o método HACH nº 8047. Ao lixiviado destilado foram adicionados a solução tampão, os reagentes fenol Pp e fenol 2 Pp e clorofórmio. As fases da solução foram separadas, e a fase com clorofórmio foi transferida para a cubeta, que foi acoplada ao espectrofotômetro para leitura da amostra padrão e amostra com ADF.

Para o ensaio de perda ao fogo, conforme NBR NM 18 (ABNT, 2012), as amostras foram levadas ao forno tipo mufla à temperatura de 950 °C, durante 50 minutos.

As análises do comportamento da perda de massa das amostras frente a uma variação linear de temperatura foram realizadas por meio de Termogravimetria (TGA) utilizando o equipamento DTG 60 da Shimadzu. O procedimento envolveu uma variação de temperatura de 20 a 800 °C, com uma rampa de aquecimento de 20 °C/min e atmosfera de Argônio. A partir da TGA, foi derivada a termodiferencial (DTG), que forneceu picos mais nítidos, permitindo a identificação precisa da temperatura de início e fim de cada etapa da variação de massa durante o ensaio.

As análises quantitativas dos grupos funcionais presentes nas partículas de ADF e CS foram realizadas por meio dos espectros de absorção no infravermelho de transformada de Fourier (FTIR), utilizando o modo de reflexão total atenuada (ATR). Foi utilizado um espectrofotômetro da fabricante Bruker, modelo Vertex 70, em uma faixa de análise de 4000 a 400 cm⁻¹.

Visando a identificação dos possíveis compostos presentes nas amostras ADF e CS, estas foram analisadas por cromatografia gasosa acoplada ao espectrômetro de massas (GC-MS), utilizando o equipamento QP2010 Plus da Shimadzu, com gás de arraste de Hélio, fluxo 1 mL/min, split 1:20, temperatura do forno inicial 60 °C, com aquecimento 6 °C/min até 250 °C, faixa do detector 30 à 750 m/z e coluna cromatográfica RTX 5 MS, com dimensões de 30 m x 0,25 mm x 0,25 µm e composição de 5% de difenil e 95% de dimetilpolisiloxano. Para a coleta de 50 µL do gás, inicialmente a amostra foi aquecida à 100 °C por 30 min, para depois o gás ser injetado manualmente no equipamento.

Para concluir os ensaios químicos, a identificação dos elementos presentes no resíduo e CS foi conduzida por meio da técnica de espectroscopia por energia dispersiva (EDS), utilizando a mesma amostra preparada anteriormente para o ensaio de MEV. Os espectros de EDS foram adquiridos por um acessório da Oxford, acoplado ao MEV, registrando espectros pontuais a uma distância de trabalho de 15 mm, com tempo de aquisição de 180 segundos e intervalo de energia de 20 keV.

Caracterização ecotóxicas

O ensaio de toxicidade aguda com o microcrustáceo *Daphnia* foi conduzido de acordo com a norma NBR 12713 (ABNT, 2022). No ensaio, foi observada a mobilidade dos organismos-teste, microcrustáceos *Daphnia magna*, expostos a soluções contendo o resíduo em concentrações predefinidas, durante 48 horas.

Análise temporal

Com o objetivo de avaliar possíveis alterações químicas nos resíduos armazenados em sacos abertos e fechados, uma vez que a resina fenólica é um composto orgânico, logo após a primeira coleta, foram realizadas análises periódicas no EDS e ensaios de perda ao fogo na ADF1.

Apenas a amostra armazenada em sacos abertos foi analisada por EDS, conforme metodologia já abordada, visando à obtenção da composição química das amostras ao longo do tempo. Foram realizadas sete análises em um período de 263 dias.

Com as amostras da ADF1 armazenadas em sacos abertos e fechados, foi realizado o ensaio de perda ao fogo, com 14 análises em um período de 260 dias, conforme metodologia também já abordada.

Ainda, foi realizado o ensaio de variação dimensional no estado fresco de misturas de argamassa contendo ADF1 acondicionada em sacos abertos e fechados, com o intuito de avaliar o comportamento da matriz cimentícia com o resíduo até sua cura. O traço foi 1:3, proporção de cimento para ADF, e relação água-cimento de 0,50. A variação dimensional foi realizada durante um período de 126 dias, totalizando 11 análises. Além da avaliação sobre o armazenamento e tempo de ensaio após coleta dos resíduos, este ensaio ainda serviu para validação da metodologia proposta de medição da variação dimensional.

Após a preparação de cada argamassa, foram moldados corpos de prova cilíndricos com diâmetro de 5 cm e alturas de 10, 20 e 30 cm em quatro camadas com 20 golpes cada, em triplicata. Para obter uma medição de expansão mais precisa, foram escolhidas três alturas dos corpos de prova. Após a moldagem, um disco indicador de papel sulfite com seis furos para medição do laser foi posicionado no centro da superfície de cada molde (Figura 3). Como resultado, cada medição foi realizada sempre nos mesmos pontos.

A fim de medir a distância vertical entre o laser e os seis pontos indicados no disco indicador, uma trena laser com capacidade mínima de medição de 1 mm foi colocada acima da amostra. Para evitar interferências externas, a posição do laser foi mantida fixa durante todo o ensaio (Figura 4). Após a avaliação dos seis pontos, foi calculada uma média simples que representou a real altura do corpo de prova. Essa média foi utilizada para calcular a variação dimensional e analisar estatisticamente, com o objetivo de reduzir os erros associados aos fatores postos.

O ensaio de expansão no estado fresco foi adaptado do método utilizado por Bella e Graybeal (2014) e Lavarga e Graybeal (2015), uma modificação da C827 (ASTM, 2010), em que também utiliza um medidor a laser para medir a distância vertical expandida.

Resultados e discussão

Caracterização física

Através da determinação da curva granulométrica das ADFs coletadas (Figura 5), constatou-se que as partículas eram predominantemente finas, especialmente aquelas que passaram pela peneira com abertura de 0,3 mm, representando aproximadamente 89,9% do material total. A granulometria da CS foi modificada para ficar semelhante à granulometria média encontrada para o resíduo.

Ainda, foi possível observar que o resíduo apresentava impurezas, como restos de aglomerados rígidos de areia de moldagem com resina e restos de metais (Figura 6), também apontadas em outros estudos (Casali *et al.*, 2018).

Figura 3 - Disco indicador para medição a laser

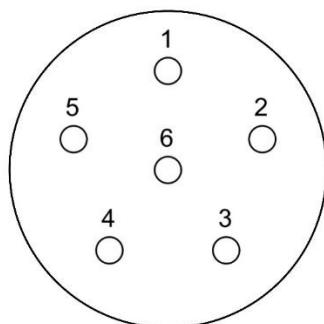


Figura 4 - Medição das amostras com trena laser



Figura 5 - Granulometria

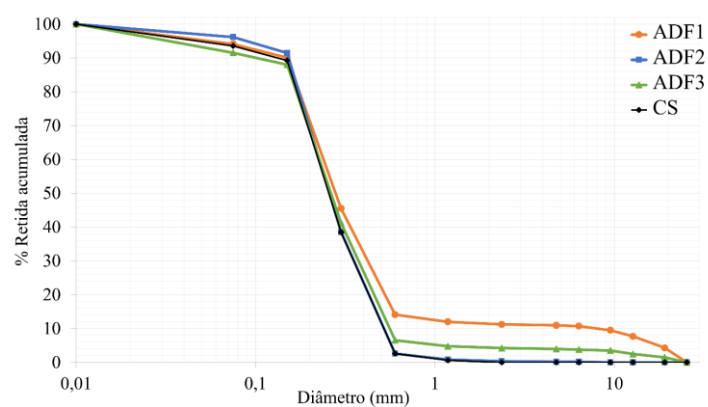


Figura 6 - Impurezas da ADF



Dessa forma, para posterior incorporação em argamassa, optou-se por restringir a utilização do resíduo com granulometria inferior a 2,36 mm, descartando cerca de 2% do material coletado.

O teor de material pulverulento, massa específica, massa unitária, índice de vazios, absorção de água e perda ao fogo estão representados na Tabela 1.

Em relação à massa específica, massa unitária e índice de vazios, foram encontrados resultados semelhantes para as coletas de resíduo. Comparando com a CS, os resíduos apresentaram massa específica e índice de vazios inferiores, mas massa unitária superior. Esta diferença pode estar relacionada à porosidade, absorção de água, elementos constituintes do resíduo, ligantes, aditivos e impurezas metálicas (Paul *et al.*, 2021; Mehta, 2024). Ainda, os resultados foram semelhantes aos valores encontrados por outros autores para ADFs, de 1,97 a 2,79 g/cm³ para massa específica e 1,5 a 1,7 g/cm³ para massa unitária (Mehta, 2024).

A diferença nos resultados encontrados para as três ADFs, sobretudo no teor de material pulverulento e absorção de água, pode ser atribuída a duas causas. A primeira está relacionada ao número de vezes que a mistura de areia foi usada como molde para a fundição do metal, e a segunda pelo fato de que o resíduo continha misturas de areia de moldagem com diferentes dosagens entre seus constituintes, como areia de sílica, resina fenólica, isocianato polimérico, catalisador, cromita e pó de carvão.

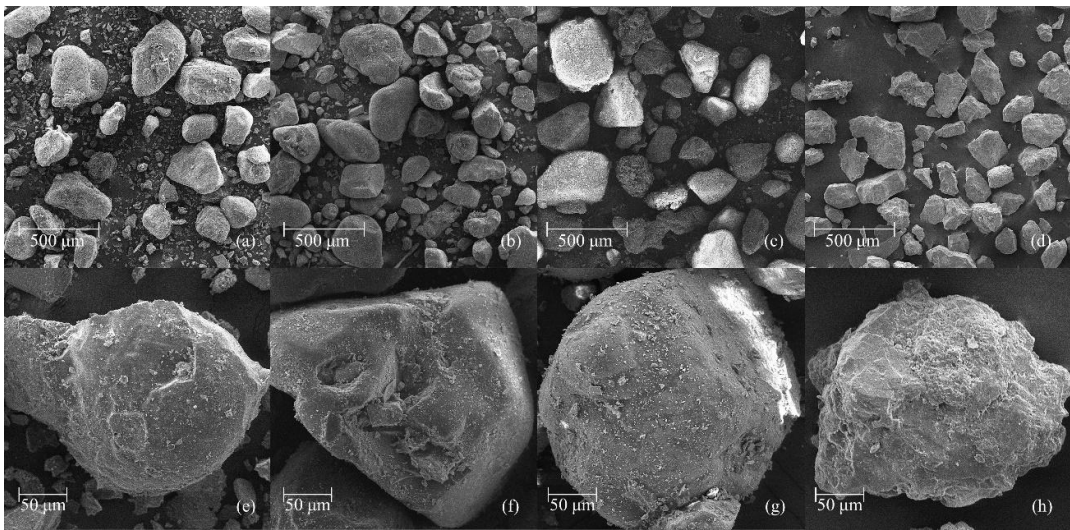
Ainda, é possível observar que a ADF3 foi o resíduo que apresentou maior teor de material pulverulento e maior absorção de água entre os resíduos, o que corrobora com a hipótese de que a maior presença de materiais finos, como, por exemplo, o pó de carvão, pode levar ao aumento da absorção de água por essas partículas. A taxa de absorção de água inferior a 1% é menor do que aquela encontrada para CS, mas coerente com os valores encontrados em outros estudos de 0,42 a 5,0% para ADFs verdes e aglomeradas quimicamente, assim como o teor de material pulverulento superior a 1,8% (Mehta, 2024). Esta baixa absorção de água ainda pode ser atribuída ao revestimento das partículas de ADF pela resina, criando uma barreira impermeável em torno dos grãos, o que dificulta a penetração da água nas partículas.

Para complementar a caracterização física do resíduo, a morfologia dos mesmos ainda foi analisada em MEV através de imagens das partículas das três ADFs com ampliações de 125 e 750 vezes (Figura 7).

Tabela 1 - Resultados dos ensaios físicos

Ensaio/parâmetro	ADF1	ADF 2	ADF 3	CS
Massa específica (g/cm ³)	2,38	2,29	2,34	2,64
Massa unitária (g/cm ³)	1,39	1,40	1,39	1,25
Índice de vazios (%)	41,6	38,8	40,8	52,70
Teor de material pulverulento (%)	6,68	3,86	8,75	6,49
Absorção de água (%)	0,68	0,56	0,92	2,09

Figura 7 - Morfologia em MEV



Nota: Legenda: ADF1 125x (a); ADF2 125x (b); ADF3 125x (c); CS 125x (d); ADF1 750x (e); ADF2 750x (f); ADF3 750x (g); e CS 750x (h).

A partir das imagens, foi possível observar uma morfologia semelhante entre os grãos, tanto de ADF quanto de CS, apresentando partículas irregulares, com formas angulares e arredondadas. Além disso, as ADFs exibem acumulações de partículas menores e uma superfície lisa, que podem estar correlacionadas ao material pulverulento e à cobertura superficial das partículas do resíduo pela resina (Perondi *et al.*, 2013; Sua-Iam *et al.*, 2019; Paul *et al.*, 2021), enquanto a CS apresenta uma superfície mais porosa, fato este correlacionado com a absorção de água

Caracterização química

Classificação do resíduo sólido e fenol no extrato lixiviado

Para a classificação do resíduo sólido, apenas a amostra de ADF1 foi avaliada. Referindo-se à inflamabilidade e patogenicidade, o resíduo foi determinado como não inflamável e não patogênico, pois não exibiu as características estipuladas pela NBR 10004 (ABNT, 2004b). Para a avaliação da corrosividade, a solução resultou em um pH de 8,07, indicando que o resíduo não é corrosivo, uma vez que o pH obtido está dentro do limite estabelecido pela mesma norma. Assim, o resíduo também foi classificado como não perigoso neste teste.

No que diz respeito à reatividade, foram examinados os íons CN⁻ e S²⁻ presentes no resíduo (Tabela 2). Constatou-se que o resíduo é não reativo, pois não contém íons cianeto e sulfeto em concentrações que ultrapassem os limites estabelecidos pela NBR 10004 (ABNT, 2004b). Portanto, também foi classificado como não perigoso neste ensaio.

Tabela 2 - Classificação de reatividade e toxicidade

Parâmetro	Resultado (mg/kg)	VMP (mg/kg)	LQ (mg/kg)
Resíduo			
Ácido cianídrico (HCN)	<0,0003	250	<0,003
Ácido Sulfídrico (H ₂ S)	<40	500	40
Extrato lixiviado			
Arsênio	<0,01	1,00	0,01
Bário	0,18	70,00	0,01
Cádmio	<0,005	0,500	0,005
Chumbo	<0,01	1,00	0,01
Cromo Total	0,02	5,00	0,01
Fluoreto	0,7	150,00	0,1
Mercúrio	<0,001	0,100	0,001
Prata	<0,01	5,00	0,01
Selênio	<0,01	1,00	0,01
Extrato solubilizado			
Alumínio	0,1	0,20	0,1
Arsênio	<0,01	0,01	0,01
Bário	0,09	0,70	0,01
Cádmio	<0,005	0,005	0,005
Chumbo	<0,01	0,01	0,01
Cianeto	<0,0003	0,0700	0,0003
Cloreto	24,77	250,00	5,00
Cobre	<0,01	2,00	0,01
Cromo Total	<0,01	0,05	0,01
Fenóis Totais	0,041	0,010	0,005
Ferro	0,07	0,30	0,05
Fluoreto	5,1	1,50	0,1
Manganês	0,19	0,10	0,01
Mercúrio	<0,0002	0,0010	0,0002
Nitrato (N)	<0,1	10,00	0,1
Prata	<0,01	0,05	0,01
Selênio	<0,01	0,01	0,01
Sódio	19,9	200,00	0,1
Sulfato (SO ₄)	8,55	250,00	5,00
Surfactantes	0,2	0,50	0,1
Zinco	0,02	5,00	0,01

Nota: Legenda: valor máximo permitido (VMP); limite de quantificação (LQ).

Quanto à toxicidade, os extratos lixiviado e solubilizado foram analisados (Tabela 2), com o pH do extrato lixiviado medido em 5,02 e o pH do extrato solubilizado variando de 7,30 a 7,41. Os parâmetros analisados no extrato lixiviado não excederam os limites máximos permitidos (ABNT, 2004b), o que classifica o resíduo como não tóxico e não perigoso (classe II) neste teste. No entanto, alguns parâmetros do extrato solubilizado, como Fenóis Totais, Fluoreto e Manganês, apresentaram concentrações superiores ao valor máximo permitido, caracterizando o resíduo como não inerte (classe II-A). Esses resultados atendem aos critérios de classificação do resíduo e ao pH estabelecido pelas leis aplicáveis (Santa Catarina, 2018; Brasil, 2022; Paraná, 2022; Rio Grande do Sul, 2024).

Em outro ensaio, analisando apenas o fenol presente no extrato lixiviado das três ADFs foram reveladas quantidades de fenóis totais de 0,198 mg/L, 0,092 mg/L e 0,533 mg/L, em um limite de quantificação inferior a 0,002 ou 3,96 mg/kg, para a ADF1, ADF2 e ADF3, respectivamente.

Enquanto a norma NBR 10004 (ABNT, 2004b) não estabelece um valor máximo permitido para os fenóis no extrato lixiviado, sua versão anterior, a NBR 10004 (ABNT, 1987), determinava um limite máximo de 10 mg/kg de fenol para que o resíduo fosse considerado não perigoso. No entanto, a norma atual ainda considera o fenol como uma substância potencialmente perigosa e tóxica. Mas para ser classificada como resíduo perigoso, o fenol precisa passar por uma avaliação de sua toxicidade, conforme indicado no ensaio de toxicidade na água deste trabalho. Por outro lado, a mesma norma classifica o resíduo da areia de fundição como não perigoso, conforme descrito em seu anexo.

Em uma abordagem diferente, a Resolução CONAMA n° 430 (Brasil, 2011), que regula as condições de lançamento de efluentes, permite um valor máximo de 0,5 mg/L para fenóis totais. Por outro lado, a Resolução CONSEMA n° 011 (Santa Catarina, 2008), juntamente com a NBR 15702 (ABNT, 2009), que orientam a aplicação da ADF em diversas aplicações, autorizam o uso da ADF com uma concentração máxima de fenol no extrato aquoso de 3,0 mg/L, sem especificar um limite para o extrato lixiviado.

É importante destacar que a metodologia de obtenção do extrato aquoso, definida na Resolução CONSEMA n° 011 (Santa Catarina, 2008), é semelhante à proposta pela NBR 10005 (ABNT, 2004c) para o extrato lixiviado, com a única diferença sendo a solução ácida de extração, substituída por água deionizada.

Apenas a ADF3 ultrapassa a concentração de fenol de 0,5 mg/L para descarte de efluentes (Brasil, 2011). Entretanto nenhuma amostra excede o teor de 3,0 mg/L para uso em concreto asfáltico e artefatos de concreto sem função estrutural, mesmo que este limite seja estabelecido para soluções aquosas (Santa Catarina, 2008; ABNT, 2009).

Além disso, outros países, como a França, estabelecem limites específicos para o fenol na reutilização da ADF. Na França, por exemplo, o resíduo ser usado na fabricação de produtos à base de ligantes hidráulicos, como o cimento, se o teor de fenol for inferior a 5 mg/kg de areia com base na matéria seca, com medições realizadas no extrato lixiviado (FRANÇA, 1991). Isso sugere que a ADF poderia ser empregada na fabricação de produtos de matriz cimentícia, apesar de ser formada por uma resina sintética à base de fenol. Com base nos ensaios realizados, os teores de fenol encontrados para a ADF1, ADF2 e ADF3 seriam de 3,96 mg/kg, 1,84 mg/kg e 10,66 mg/kg, respectivamente. Com isso, na França, apenas a ADF3 não poderia ser usada na fabricação de produtos cimentícios.

Esta alteração do teor de fenol pode estar correlacionada com o número de vezes que a areia de moldagem era reutilizada, a quantidade de resina adicionada aos moldes e a temperatura que cada partícula do molde atingia quando o metal fundido era despejado sobre o molde, visto que o fenol livre sofre modificações químicas como sua degradação quando atinge altas temperaturas, reduzindo o teor de fenol presente na amostra (Cunha, 2005; Perondi *et al.*, 2013).

Perda ao fogo e Termogravimetria (TGA)

A análise de perda ao fogo está associada à redução da matéria orgânica em cada agregado, com níveis mais altos de degradação nos resíduos ADF3, alcançando 1,83%, seguido por ADF1, com 1,71%, e ADF2, com 0,73%.

Na TGA, a partir da curva de TGA do resíduo, foi possível determinar sua respectiva DTG (Figura 8), e analisar a perda de massa gradual, referente à temperatura a qual as amostras foram submetidas (Tabela 3). Observa-se que a perda total de massa durante a análise termogravimétrica foi similar aos resultados obtidos na perda ao fogo em mufla.

Figura 8 - Curva TGA e DTG

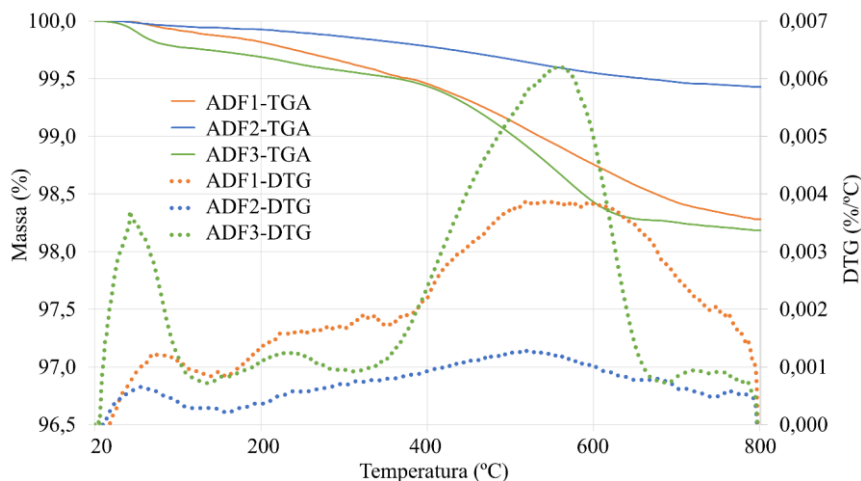


Tabela 3 - Perda de massa gradativa dos resíduos pela DTG (%)

Agregado	20 – 200 °C	200 – 400 °C	400 – 600 °C	600 – 800 °C	Total
ADF1	0,17	0,33	0,65	0,56	1,72
ADF2	0,07	0,13	0,22	0,15	0,57
ADF3	0,30	0,23	0,89	0,39	1,81

A presença de componentes como resina fenólica e pó de carvão, frequentemente adicionados à areia de moldagem na indústria de fundição, pode estar diretamente associada tanto à matéria orgânica nos resíduos quanto à tonalidade escura do material (Paul *et al.*, 2021).

A maior perda de massa foi encontrada no intervalo de próximo aos 580 °C, para todas as amostras, devido à decomposição total da resina fenólica uretânica (Wang *et al.*, 2007; Svidró *et al.*, 2017). Considerando esta temperatura, a perda de massa referente à decomposição da resina foi de 1,08% para ADF1, 0,40% para ADF2 e 1,31% para ADF3, corroborando com a ordem dos resultados apresentados pela lixiviação de fenol.

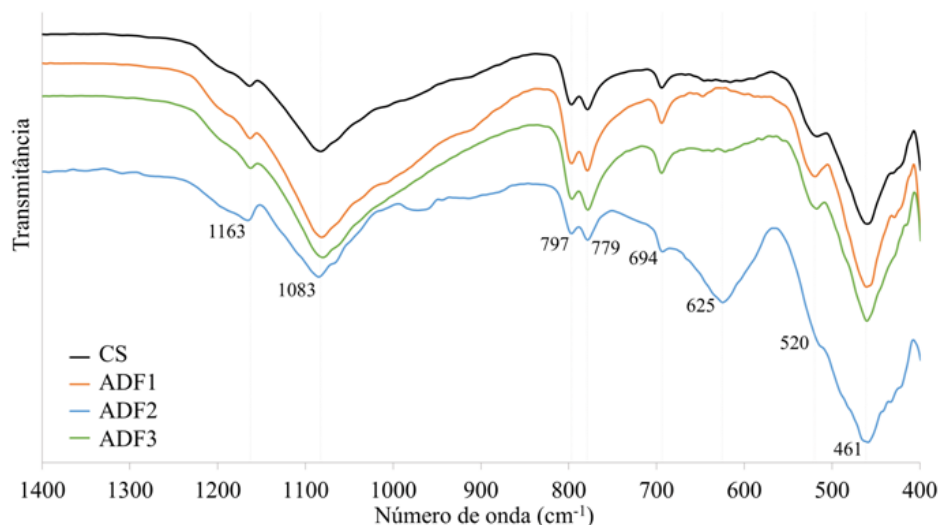
Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)

A análise de FTIR foi conduzida tanto para os três ADFs quanto para CS, resultando no espectro representado na Figura 9. Através deste ensaio, espera-se observar possíveis diferenças entre os agregados quanto a sua estrutura organizacional.

A ausência de vibrações em frequências superiores a 1200 cm⁻¹ pode ser atribuída à presença residual de matéria orgânica na ADF (Nyembwe; Makhatha; Madzivhandila, 2016). Os picos nas bandas de 1163, 1083, 797 e 779 cm⁻¹ correspondem à ligação Si-O, associada aos picos de óxido de sílica (SiO₂) na forma de quartzo (Santos; Valentina; Souza, 2015; Nyembwe; Makhatha; Madzivhandila, 2016; Martins *et al.*, 2021). As vibrações nas bandas de 694 e 520 cm⁻¹ estão relacionadas ao Al₂O₃ e às ligações Al-O (Hossiney *et al.*, 2018; Martins *et al.*, 2021). Além disso, a banda em 461 cm⁻¹ pode indicar a presença da ligação Si-O-Si (Vargas *et al.*, 2015; Hossiney *et al.*, 2018).

Observa-se semelhança entre os espectros das ADFs com CS. Com isso, é importante ressaltar que o aquecimento da resina fenólica pode resultar em sua decomposição térmica. Em um estudo conduzido por Perondi *et al.* (2013), foram analisados os espectros de FTIR de uma resina fenólica em diferentes temperaturas, variando de 20 a 380 °C. Eles observaram que a intensidade dos picos diminuiu conforme a temperatura aumentava, indicando que a resina começou a se decompor acima de 300 °C. Portanto, é provável que uma parcela significativa da resina fenólica tenha sido degradada durante o processo industrial, quando o metal fundido entrou em contato com o molde contendo a areia em altas temperaturas.

Figura 9 - Espectro de FTIR



Cromatografia gasosa acoplada ao espectrômetro de massas (GC-MS)

Através da análise por GC-MS, foram identificados os compostos presentes nas ADFs e CS (Quadro 1). Conforme esperado, não foram encontrados compostos químicos na CS. Entretanto, a presença de fenol foi detectada apenas na ADF3.

Em contrapartida, nos três resíduos foram identificados apenas dois compostos frequentemente utilizados como solventes na indústria, conforme relatado pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (U. S. EPA, 2020). Outros compostos químicos encontrados apenas na WSF3 são utilizados como matéria-prima para a fabricação de resinas, como solventes e diluentes (Cao; Man; Kruk, 2009; U. S. EPA, 2020).

Acredita-se que o fato de apenas a ADF3 ter apresentado alguns compostos, como o fenol, possa estar relacionado ao tempo de armazenamento dos resíduos antes da realização do ensaio. O ensaio GC-MS foi realizado 8, 4 e 3 meses após a coleta da ADF1, ADF2 e ADF3, respectivamente. Como o fenol foi encontrado nos extratos lixiviado e solubilizado, cujo ensaio foi realizado logo após a coleta de cada resíduo na indústria, essa descoberta enfatiza a necessidade de uma análise cuidadosa e completa dos componentes presentes no material ao longo do tempo, contribuindo para uma compreensão mais completa de sua composição e possíveis impactos ambientais. No entanto, considera-se relevante a apresentação destes resultados, uma vez que o fenol estava presente em todas as ADFs, conforme observado no ensaio de lixiviação e solubilização, mas apenas na ADF3 no ensaio de GC-MS.

Espectroscopia por energia dispersiva (EDS)

Foram quantificados por EDS os elementos químicos por óxidos presentes em vinte pontos de cada ADF e CS, e a média dos resultados obtidos está apresentada na Tabela 4.

De forma geral, os resíduos apresentaram similaridade tanto nos componentes químicos presentes quanto em suas quantidades. Apenas para a ADF1 foi quantificada a presença de manganês (Mn), zinco (Zn), enxofre (S) e cobre (Cu), denominado como “outros” na tabela de resultados, enquanto para a ADF2 foi apenas quantificada presença de Mn em “outros”, e nenhum outro elemento para a ADF3.

Os componentes encontrados foram semelhantes aos relatados em outras pesquisas (Torre, 1975; Etxeberria *et al.*, 2010; Casali *et al.*, 2018; Gupta; Siddique; Belarbi, 2021).

Como a areia utilizada nos moldes da indústria de fundição possui alto teor de sílica, nas ADFs são encontradas altas quantidades deste componente químico. Entretanto, além da sílica, outros elementos podem estar presentes na CS, como alumínio, ferro, cálcio, sódio, potássio, magnésio e titânio.

O segundo elemento com elevado teor na ADF foi o carbono. Ele está presente tanto na resina e catalisadores orgânicos quanto no pó de carvão. Alguns compostos químicos presentes na resina, conforme especificado pela indústria onde foram coletadas as ADFs, são fenol (C_6H_6O), metileno diisocianato ($C_{15}H_{10}N_2O_2$) e imidazol ($C_3H_4N_2$). Observa-se a presença de carbono e sódio, nas formulações químicas, que foram quantificados na análise por EDS.

Quadro 1 - Compostos químicos por GC-MS

Agregado	Composto químico	CAS	Fórmula
ADF1	1,3-Diisopropilbenzeno	99-62-7	C ₁₂ H ₁₈
	1,4-Diisopropilbenzeno	100-18-5	C ₁₂ H ₁₈
ADF2	1,3-Diisopropilbenzeno	99-62-7	C ₁₂ H ₁₈
	1,4-Diisopropilbenzeno	100-18-5	C ₁₂ H ₁₈
ADF3	Fenol	108-95-2	C ₆ H ₆ O
	Ácido butanodióico	106-65-0	C ₆ H ₁₀ O ₄
	Ácido pentanodioico	1119-40-0	C ₇ H ₁₂ O ₄
	1,3-Diisopropilbenzeno	99-62-7	C ₁₂ H ₁₈
	1,4-Diisopropilbenzeno	100-18-5	C ₁₂ H ₁₈
	Ácido hexanodióico	627-93-0	C ₈ H ₁₄ O ₄
	1,3,5-Triisopropilbenzeno	717-74-8	C ₁₅ H ₂₄
CS	-	-	-

Nota: Legenda: Chemical Abstracts Service (CAS); agregado miúdo convencional (AC); areia descartada de fundição (ADF).

Tabela 4 - Teor de óxidos das ADFs (%) por EDS

Resíduo	Si	C	Al	Fe	Ca	Na	K	Mg	Ti	Cr	Outros
ADF1	48,42	35,89	1,70	13,06	0,34	0,04	0,01	0,12	0,1	0,02	0,30
ADF2	44,56	30,64	9,75	6,26	0,26	0,02	0,42	1,90	0,58	5,53	0,08
ADF3	53,01	31,66	2,68	9,70	0,55	0,01	0,02	0,39	0,01	1,97	0,00
CS	83,03	-	11,42	1,53	0,81	0,98	1,60	0,49	0,14	-	-

Nota: Legenda: Sílica (Si), Carbono (C), Alumínio (Al), Ferro (Fe), Cálcio (Ca), Sódio (Na), Potássio (K), Magnésio (Mg), Titânio (Ti), Cromo (Cr) e outros (Manganês, Zinco, Enxofre e Cobre).

A presença de cromo e ferro no resíduo deve estar correlacionada com a cromita (FeCr₂O₄) adicionada à areia de moldagem. Além disso, resquícios das ligas metálicas de aço também podem estar presentes, uma vez que peças de aço eram moldadas com os moldes feitos com essa areia na indústria

Caracterização ecotóxica

Por meio do ensaio de toxicidade aguda com o microrganismo *Daphnia magna*, apenas para a WSF1, foram obtidos o fator de diluição (FD) e o fator de toxicidade (FT), conforme apresentado na Tabela 5. O FD representa a maior concentração do resíduo em que não foi observada imobilidade em mais de 10% dos organismos-teste, nas condições do método utilizado, enquanto o FT indica o número de vezes que a amostra foi diluída em relação ao valor de FD.

Os resultados obtidos pela toxicidade aguda corroboram com as diretrizes estabelecidas pelas leis estaduais e projetos de lei federais, validando a aplicação do resíduo estudado em produtos da construção civil (Santa Catarina, 2018; Brasil, 2022; Paraná, 2022; Rio Grande do Sul, 2024).

Além de estar em conformidade com os critérios estabelecidos pelas leis, o resultado encontrado foi o melhor possível, com apenas uma única diluição, demonstrando que o resíduo estudado possui baixa toxicidade aguda para o organismo *Daphnia magna*. Essa conclusão é fundamentada não apenas nos parâmetros estabelecidos pelas legislações aplicáveis, mas também na análise ecotóxica da ADF, que visa avaliar os potenciais efeitos adversos desse material sobre os ecossistemas. A observação de apenas uma diluição necessária para evitar a imobilidade dos organismos-teste sugere que a ADF possui um baixo potencial de impacto negativo sobre o ambiente aquático, reforçando a viabilidade de sua aplicação em produtos da construção civil com menor risco ambiental.

O mesmo resultado foi encontrado por Mastella *et al.* (2014) que também avaliaram a toxicidade com *Daphnia magna* de amostras de ADF contendo resina fenólica.

Tabela 5 - Ecotoxicidade da ADF1

Análise	FD	FT	VMP	LQ
Toxicidade Aguda com <i>Daphnia magna</i>	100%	1	16	1

Nota: Legenda: fator de diluição (FD); fator de toxicidade (FT); valor máximo permitido (VMP); limite de quantificação (LQ).

Análise temporal

Espectroscopia por energia dispersiva (EDS) e perda ao fogo

Por meio dos ensaios de EDS e perda ao fogo, as amostras da WSF1 foram caracterizadas quimicamente ao longo do tempo de armazenamento. Para o EDS, os óxidos presentes foram quantificados em dez pontos de cada período da WSF1 armazenada em sacos abertos, sendo a média dos resultados obtidos apresentada na Tabela 6.

Através da análise periódica do EDS, foi possível observar que o teor de carbono reduziu com o passar dos dias, possivelmente devido à alteração química de algum composto. Essa considerável redução nos valores do carbono com base no tempo foi comprovada por meio de análise estatística de variância (ANOVA) com fator único e nível de significância de 95%, resultando em diferença significativa para este caso ($p < 0,05$). Já a mesma análise para os outros compostos não apresentou diferença estatística significativa entre cada composto químico relacionado ao tempo ($p > 0,05$). Embora não tenha sido observada diferença significativa para esta análise estatística, identificaram-se valores extremos nos teores de óxido de ferro aos 188 e 194 dias. Examinando os dez valores individuais obtidos, nota-se que, para ambas as datas, houve apenas uma medição que ultrapassou em 97% e 100% o teor do composto químico obtido nas análises.

O ensaio de perda ao fogo foi realizado nas amostras de ADF1 armazenadas em sacos abertos e fechados (Figura 10).

Nota-se que, com o passar dos dias, os resultados de perda ao fogo começaram a apresentar certa uniformidade, com valores inferiores aos da coleta. Como a perda ao fogo diz respeito à porcentagem de matéria orgânica que a amostra possui, observa-se sua redução, que pode estar relacionada à resina fenólica, sustentando os resultados obtidos no EDS e os apresentados anteriormente na GC-MS.

Com o intuito de verificar diferenças significativas entre os resultados de perda ao fogo para os modos de armazenamento do resíduo e o tempo de ensaio após coleta, realizou-se uma análise estatística do tipo ANOVA de fator duplo com duas repetições.

Através dessa análise, foi identificada diferença significativa apenas entre o tempo de ensaio após a coleta do resíduo ($p < 0,05$). Tanto a relação entre o tipo de armazenamento e a perda ao fogo quanto sua interação entre o tipo de armazenamento com o tempo não apresentaram diferença estatística significativa em um nível de significância de 95% ($p > 0,05$).

Variação dimensional da argamassa

Finalizando os resultados da análise temporal do resíduo, para o ensaio de variação dimensional da argamassa foram moldados três corpos de prova para cada tratamento, com a medição de seis pontos em cada corpo de prova, resultando em uma média. A variação dimensional no estado fresco foi medida logo após a moldagem dos moldes e o posicionamento do disco indicador, e após a cura da argamassa. A diferença entre estas duas medições correspondeu à variação dimensional da amostra confinada no molde cilíndrico (Figura 11).

Foi realizada ainda o ensaio de variação dimensional apenas com o molde de 20 cm, sem a adição de ADF, com o objetivo de obter o resultado do ensaio de uma argamassa referência, obtendo a variação dimensional negativa (retração) de 0,88%. A partir desse resultado foi possível observar que todos os resultados observados periodicamente com a ADF1 foram superiores à referência, sendo ainda variações dimensionais positivas, representando a expansão das argamassas.

Avaliando os resultados da variação dimensional média ao longo do tempo, apenas das argamassas com ADF, é possível observar que, mesmo havendo certa variação, os valores dos primeiros ensaios com os últimos ensaios parecem apresentar semelhança. A fim de aprimorar a análise dos resultados, foram realizadas análises estatísticas ANOVA e teste de Tukey ($p > 0,05$), considerando três fontes de variação: tempo de armazenamento, altura dos corpos de prova e forma de armazenamento.

Tabela 6 - Teor de óxidos da ADF1 por EDS periódico (%)

Tempo (dias)	Si	C	Al	Fe	Ca	Na	K	Mg	Ti	Cr	Outros
1	21,13	75,40	1,34	1,97	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10	0,00
8	19,80	77,09	1,10	1,72	0,10	0,00	0,00	0,00	0,08	0,11	0,00
22	28,15	68,56	1,39	1,67	0,04	0,00	0,04	0,00	0,05	0,10	0,00
55	45,38	51,72	1,64	0,91	0,02	0,05	0,08	0,00	0,00	0,00	0,20
188	27,89	55,08	1,09	15,35	0,09	0,05	0,05	0,31	0,00	0,00	0,09
194	45,60	29,22	4,57	20,36	0,00	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,18
263	43,66	47,95	2,73	4,55	0,41	0,09	0,01	0,23	0,18	0,04	0,15

Nota: Legenda: Sílica (Si), Carbono (C), Alumínio (Al), Ferro (Fe), Cálcio (Ca), Sódio (Na), Potássio (K), Magnésio (Mg), Titânio (Ti), Cromo (Cr) e outros (Manganês, Zinco, Bromo e Cobre).

Figura 10 - Perda ao fogo periódica (%)

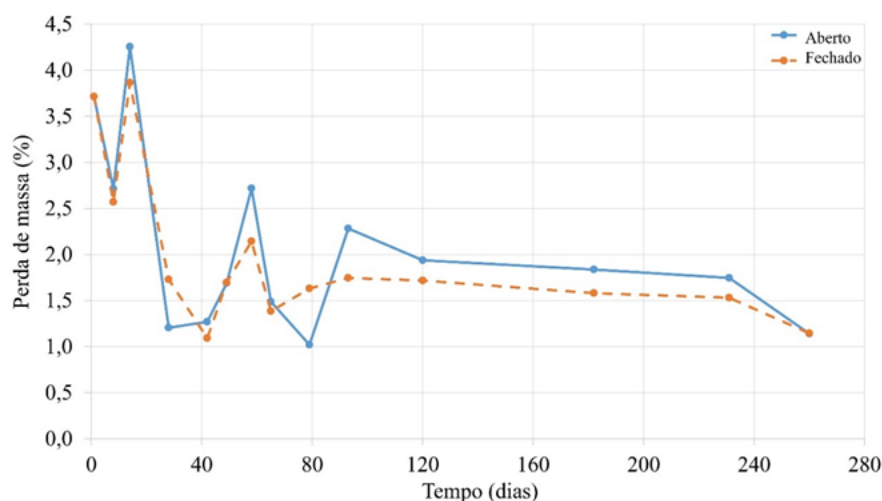
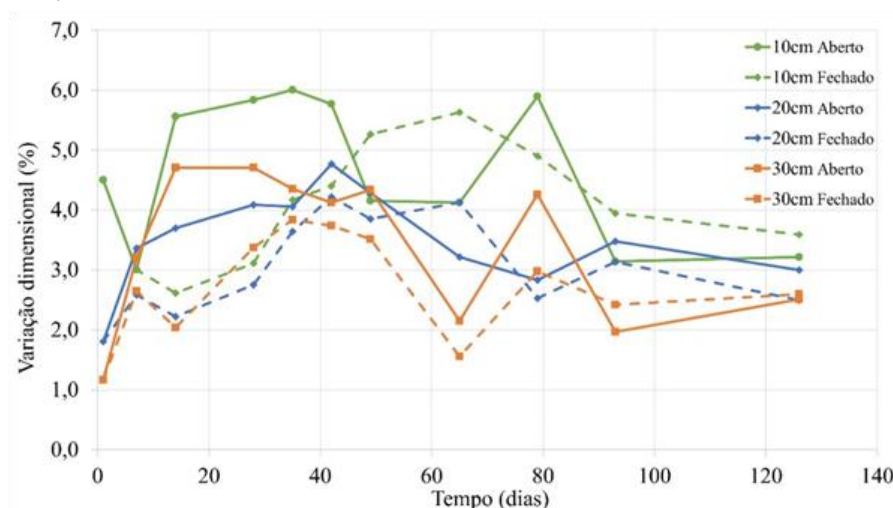


Figura 11 - Variação dimensional periódica (%)



Com a análise, foi possível observar que há diferença estatística significativa entre quase todas as fontes de variação, exceto na interação entre os fatores altura e armazenamento e entre os três fatores: tempo, altura e armazenamento. A partir disso, foram realizadas duas análises. A primeira referente à variação dimensional temporal e a segunda referente à altura dos corpos de prova.

Para a análise temporal, foram correlacionados os fatores tempo e armazenamento. Através da diferença mínima significativa de 2,243 obtida por meio do teste de Tukey para comparação múltipla de médias, foi

possível constatar que o tipo de armazenamento (aberto ou fechado) teve diferença apenas no ensaio realizado em 14 dias após a coleta do resíduo. Após esta data, não houve mais diferença entre o tipo de armazenamento.

Referente às alturas dos corpos de prova, nota-se que há diferença estatística através da ANOVA, com valores de expansão dimensional superiores para o molde de 10 cm e valores inferiores para o molde de 30 cm. Através da comparação múltipla de médias, com diferença mínima significativa de 0,587 para nível de significância de 95%, observa-se que apenas o molde de 10 cm apresenta diferença frente aos demais, sendo o molde de 20 cm e 30 cm estatisticamente similares.

Esse fato ainda pode estar diretamente relacionado ao erro associado à medição com a trena a laser, cuja precisão é da ordem de 1 mm. Como a expansão da argamassa ocorre em razão de sua diferença de altura, o erro associado à medição feita com a trena seria de 1,00% para o CP com 10 cm de altura, 0,50% para o CP com 20 cm de altura e 0,33% para o CP com 30 cm de altura. Dessa forma, quanto maior a altura do CP a ser analisado, maior a redução do erro associado. Entretanto, mesmo com o erro associado sendo superior no CP de 20 cm, quando comparado ao CP de 30 cm, ambos apresentam resultados semelhantes.

Ainda sobre o ensaio de variação dimensional, como a metodologia adotada foi testada, seguem algumas considerações sobre o ensaio.

As seis medições realizadas com o disco indicador auxiliaram na homogeneização dos resultados devido a vários fatores, como o fato de a expansão ou retração das argamassas não ocorrer de forma homogênea em toda a superfície do molde. Ainda, mesmo tomando cuidado durante o arrasamento da superfície do molde, ela pode continuar apresentando irregularidades devido aos grãos de areia ou pequenos vazios.

Como a posição do molde permaneceu fixa e apenas a trena foi movimentada durante o ensaio, a exatidão entre uma medição e outra exatamente no mesmo ponto pode ser comprometida, e pequenas irregularidades podem ser suficientes para alterar o resultado.

Por fim, como já observado com o auxílio da análise estatística, a realização do ensaio de variação dimensional da argamassa no estado fresco com moldes de 20 cm ou 30 cm de altura não apresentou diferença estatisticamente significativa. Dessa forma, a fim de reduzir o consumo de materiais no ensaio, é aconselhável a utilização dos moldes com 20 cm de altura.

Além disso, observa-se que a utilização da ADF apresenta variação dimensional no estado fresco, especialmente em relação à expansão. Ainda, o tempo de armazenamento também pode influenciar suas propriedades químicas. Entretanto, destaca-se que mais estudos são necessários para compreender melhor essas variações químicas temporais que ocorrem no resíduo que podem estar relacionadas a alterações nos teores de fenol presentes no resíduo.

Conclusões

A ADF gerada na indústria de fundição apresenta alto teor de sílica devido à CS utilizada em sua composição. Apesar disso, grandes volumes desse resíduo são mensalmente descartados em aterros sanitários industriais. Dessa forma, a reutilização da ADF em matriz cimentícia pode contribuir para a redução da degradação ambiental, diminuindo a necessidade de extração de recursos naturais e os custos associados à extração e disposição final em aterros sanitários. Este estudo permitiu caracterizar a ADF, comparar algumas propriedades físicas e químicas do resíduo com a CS, analisar periodicamente o comportamento químico da ADF, além de verificar periodicamente a variação dimensional do resíduo incorporado em matriz cimentícia, aprimorando a metodologia deste ensaio.

Comparando alguns aspectos físicos entre CS e ADF, a ADF apresentou menor absorção de água, possivelmente devido ao revestimento superficial das partículas pela resina, também observado em MEV. A diferença de massa específica e índice de vazios, maior para a CS, deve estar relacionada aos materiais constituintes do resíduo.

Com as três coletas do resíduo, percebeu-se que a ADF apresenta partículas predominantemente finas, inferiores a 0,3 mm, e partículas maiores relacionadas a restos de aglomerados rígidos de areia de moldagem e restos de metais. Além disso, foram encontrados resultados diferentes quanto ao teor de material pulverulento e absorção de água, que podem estar correlacionados ao número de vezes que a mistura de areia foi usada como molde para a fundição do metal e ao fato de que o resíduo continha misturas de areia de moldagem com diferentes dosagens entre seus constituintes.

Algumas normas e leis nacionais já possuem diretrizes para a reutilização da ADF em outros materiais. Frente aos parâmetros da legislação, classificação do resíduo sólido, pH e fator de toxicidade, a ADF estudada poderia

ser utilizada na construção civil como matéria-prima em materiais como concreto asfáltico, artefatos de concreto, telhas, tijolos, base, sub-base e subleito de pavimentações, além de cobertura diária em aterros sanitários (Santa Catarina, 2018; Brasil, 2022; Paraná, 2022; Rio Grande do Sul, 2024). Aliado a essas leis, no Brasil ainda há resoluções e normas que impõem limites no teor de fenol em soluções aquosas que podem estar presentes na ADF para sua utilização em concreto asfáltico e artefatos de concreto sem função estrutural. Este trabalho avaliou o teor de fenol no extrato lixiviado, ácido e não aquoso. Entretanto, encontrou concentrações de fenol inferiores ao máximo estabelecido por essas normas, possibilitando novamente a sua reutilização em produtos da construção civil.

Os ensaios de perda ao fogo e TGA corroboraram as concentrações de fenol do extrato lixiviado quando a maior perda de massa ocorreu próximo aos 580 °C, temperatura em que houve a decomposição total da resina fenólica uretânica. Ainda, com base nas análises por FTIR, acredita-se que uma parcela da resina tenha sido decomposta ainda no processo industrial, em temperatura de cerca de 300 °C, com seu aquecimento a partir do contato com o metal fundido.

Como a GC-MS apresentou fenol e outros compostos químicos apenas na WSF3, mas o fenol já havia sido determinado no ensaio de lixiviação, percebe-se que esta alteração dos compostos químicos presentes nos resíduos coletados pode estar associada ao tempo de armazenamento antes da realização do ensaio. A análise química temporal da ADF1 ocorreu periodicamente ao longo de 263 dias. Através dos ensaios de EDS e perda ao fogo, foi possível identificar uma redução nos valores de carbono com o aumento do tempo de armazenagem. Como o carbono está presente no fenol, composto orgânico, este resultado pode justificar a não identificação deste composto na GC-MS. Ainda foram comparados o armazenamento do resíduo em sacos abertos e fechados, que não apresentaram diferença estatisticamente significativa frente aos resultados de perda ao fogo encontrados para o período analisado.

Por fim, o ensaio de variação dimensional da argamassa no estado fresco permitiu observar uma pequena alteração entre as expansões causadas pela mistura com ADF ao longo do tempo e ainda validar este método de ensaio com três alturas dos moldes. Quanto à validação do método, através de análise estatística e dos erros associados à medição, considerou-se a utilização dos moldes de 20 cm, destacando a importância da utilização dos discos indicadores para medição de vários pontos periodicamente.

Frente ao exposto, este estudo destaca a importância da caracterização detalhada das ADFs para promover práticas sustentáveis na gestão de resíduos industriais. A análise abrangente das propriedades físicas, químicas e ecotóxicas das amostras fornece informações essenciais para identificar oportunidades de reutilização eficiente e reciclagem desses materiais, contribuindo para a redução do impacto ambiental e para a promoção da economia circular na indústria de fundição.

Referências

- AHMAD, J. *et al.* Waste foundry sand in concrete production instead of natural river sand: a review. **Materials**, v. 15, n. 7, p. 2365, 2022.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C827**: standard test method for change in height at early ages of cylindrical specimens of cementitious mixtures. West Conshohocken, 2010.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D7765**: standard practice for use of foundry sand in structural fill and embankments. West Conshohocken, 2018a.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D8140**: standard guide for the use of foundry sand in asphalt mixtures. West Conshohocken, 2018b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FUNDIÇÃO. **Desempenho do setor de fundição - dezembro/2022**. São Paulo, 2022. Disponível em: <https://www.abifa.org.br/wp-content/uploads/2014/06/12-BOLETIM-DEZEMBRO-22-Chumbo.pdf>. Acesso em: 06 jun. 2024.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: resíduos sólidos: classificação. Rio de Janeiro, 2004b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: resíduos sólidos: classificação. Rio de Janeiro, 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10005**: procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólido. Rio de Janeiro, 2004c.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10006**: procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004d.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10007**: amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12713**: ecotoxicologia aquática: toxicidade aguda: método de ensaio com *Daphnia* spp (Crustacea, Cladocera). Rio de Janeiro, 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15702**: areia descartada de fundição: diretrizes para aplicação em asfalto e em aterro sanitário. Rio de Janeiro, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15984**: areia descartada de fundição: Central de processamento, armazenamento e destinação (CPAD). Rio de Janeiro: ABNT, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16916**: agregado miúdo: determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2021b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16972**: agregados: determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro, 2021c.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16973**: agregados: determinação do material fino que passa pela peneira de 75 µm por lavagem. Rio de Janeiro, 2021a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 18**: cimento Portland: análise química: determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: agregados: determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.
- BELLA, C.; GRAYBEAL, B. A. Volume stability and cracking potential of prebagged, cement-based nonshrink grouts for field-cast connections. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 2441, n. 1, p. 6-12, 2014.
- BRASIL. **Lei Federal nº 12.305**, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 2010. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm. Acesso em: 06 jun. 2024.
- BRASIL. **Projeto de Lei Federal nº 1.676**, de 15 de junho de 2022. Dispõe sobre a utilização de Areia Descartada de Fundição. Câmara dos deputados: Brasília, DF, 2020. Disponível em: <https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/fichadetramitacao?idProposicao=2329147>. Acesso em: 06 jun. 2024.
- BRASIL. **Resolução CONAMA nº 430**, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 2011. Disponível em: <http://www.mma.gov.br>. Acesso em: 06 jun. 2024.
- CAO, L.; MAN, T.; KRUK, M. Synthesis of ultra-large-pore SBA-15 silica with two-dimensional hexagonal structure using triisopropylbenzene as micelle expander. **Chemistry of Materials**, v. 21, n. 6, p. 1144-1153, 2009.
- CASALI, J. M. *et al.* 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.
- CASOTTI, B. P.; BEL FILHO, E. D.; CASTRO, P. C. Indústria de fundição: situação atual e perspectivas. **BNDES Setorial**, v. 33, p. 121-162, mar. 2011.
- CUNHA, A. de B. **Estudo da contaminação por compósitos fenólicos de uma área impactada por resíduos de areia de fundição**. Porto Alegre, 2005. Dissertação (Mestrado Acadêmico em Engenharia) – Escola de engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.
- DUNGAN, R. S.; DEES, N. H. The characterization of total and leachable metals in foundry molding sands. **Journal of Environmental Management**, v. 90, n. 1, p. 539-548, 2009.
- DYER, P. P. O. L. *et al.* O emprego de resíduos de areia de fundição (RAF) em concreto asfáltico: uma alternativa para a sustentabilidade na pavimentação. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 26, n. 1. 2021.
- ETXEBERRIA, M. *et al.* Properties of concrete using metallurgical industrial by-products as aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 9, p. 1594-1600, 2010.

- FRANÇA. **Ordem de 16 de julho de 1991**, relativa à eliminação de Areias de Fundição contendo aglutinantes orgânicos sintéticos. Paris, França, 1991.
- GUPTA, N.; SIDDIQUE, R.; BELARBI, R. Sustainable and Greener Self-Compacting Concrete incorporating Industrial By-Products: a review. **Journal of Cleaner Production**, v. 284, p. 124803, 2021.
- HOSSINEY, N. *et al.* In-plant production of bricks containing waste foundry sand: a study with Belgaum foundry industry. **Case Studies in Construction Materials**, v. 9, p. 1-13, 2018.
- LAVARGA, I.; GRAYBEAL, B. A. Dimensional stability of grout-type materials used as connections between prefabricated concrete elements. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 27, n. 9, p. 04014246, 2015.
- MARTINS, M. A. B. *et al.* Physical and chemical properties of waste foundry exhaust sand for use in self-compacting concrete. **Materials**, v. 14, n. 19, p. 5629, 2021.
- MASTELLA, M. A. *et al.* Mechanical and toxicological evaluation of concrete artifacts containing waste foundry sand. **Waste Management**, v. 34, n. 8, p. 1495-1500, 2014.
- MEHTA, V. Abordagens sustentáveis na produção de concreto: uma revisão aprofundada da utilização de areia de fundição de resíduos e considerações ambientais. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 31, p. 23435–23461, 2024.
- MHAMANE, D. A.; RAYJADHAV, S. B.; SHINDE, V. D. Analysis of chemically bonded sand used for molding in foundry. **Asian Journal of Science and Applied Technology**, v. 7, n. 1, p. 11-16, 2018.
- MINAS GERAIS. **Lei Estadual nº 24.444**, de 18 de setembro de 2023. Determina a utilização preferencial de areia descartada de fundição nas obras públicas de construção e conservação de rodovias e de cobertura de aterros sanitários no Estado. Assembleia Legislativa do Estado de Minas Gerais, 2023. Disponível em: [https://www.epa.nsw.gov.au/~media/EPA/Corporate%20Site/resources/waste/rre14-foundry-sand.ashx](https://www.almg.gov.br/legislacao-mineira/LEI/24444/2023/#:~:text=Determina%20a%20utiliza%C3%A7%C3%A3o%20preferencial%20de,d e%20aterros%20sanit%C3%A1rios%20no%20Estado. Acesso em: 06 jun. 2024.</p><p>MORAES, C. A. M. <i>et al.</i> Elaboração de plano de gerenciamento de resíduos sólidos de empresas de fundição de ferro fundido de pequeno porte. Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração, v. 10, n. 4, p. 296-302, 2014.</p><p>NEW SOUTH WALES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Resource Recovery Exemption under Part 9, Clauses 91 and 92 of the Protection of the Environment Operations (Waste) Regulation 2014. Australia: NSW EPA. 2014. Disponível em: <a href=). Acesso em: 06 jun. 2024.
- NYEMBWE, K. J.; MAKHATHA, M. E.; MADZIVHANDILA, T. Physico-chemical characterization of South African waste moulding sands. **Engineering Journal**, v. 20, n. 5, p. 35-48, 2016.
- OLIVEIRA, D. F. **Caracterização dos finos de areia de uma fundição e sua incorporação em argamassa de cimento**. Bauru, 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2014.
- PACE, D. M. D. *et al.* Quantitative analysis of metals in waste foundry sands by calibration free-laser induced breakdown spectroscopy. **Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy**, v. 131, p. 58-65, 2017.
- PARANÁ. **Lei Estadual nº 21.023**, de 02 de maio de 2022. Dispõe sobre a utilização de Areia Descartada de Fundição. Assembleia Legislativa do Estado do Paraná, 2022. Disponível em: https://www.aen.pr.gov.br/sites/default/arquivos_restritos/files/documento/2022-05/pl_31.2020_-_lei_21.023_1.pdf. Acesso em: 06 jun. 2024.
- PAUL, P. *et al.* Comprehensive Characterization of spent chemical foundry sand for use in concrete. **Sustainability**, v. 13, n. 22, p. 12881, 21 nov. 2021.
- PERONDI, D. *et al.* Degradação térmica da resina polimérica presente na areia de fundição. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS, 12., Florianópolis, 2013. **Anais [...]** Florianópolis: Abpol, 2013.
- PRABHU, G. G.; HYUN, J. H.; KIM, Y. Y. Effects of foundry sand as a fine aggregate in concrete production. **Construction and Building Materials**, v. 70, p. 514-521, nov. 2014.

RIO GRANDE DO SUL. **Lei Estadual nº 16.130**, de 21 de maio de 2024. Dispõe sobre a utilização das Areias Descartadas de Fundição - ADF. Assembleia Legislativa do Estado do Rio Grande do Sul, 2024. Disponível em: <https://www.diariooficial.rs.gov.br/materia?id=1000163>. Acesso em: 20 abr. 2024.

SANTA CATARINA. **Lei Estadual nº 17.479**, de 15 de janeiro de 2018. Dispõe sobre a utilização das Areias Descartadas de Fundição (ADF). Diário Oficial do Estado de Santa Catarina, 2018. Disponível em: http://leis.alesc.sc.gov.br/html/2018/17479_2018_lei.html. Acesso em: 06 jun. 2024.

SANTA CATARINA. **Resolução CONSEMA nº 011**, de 26 de agosto de 2008. Estabelece critérios para a utilização da Areia Descartada de Fundição de materiais ferrosos na produção de concreto asfáltico e artefatos de concreto sem função estrutural. Conselho Nacional do Meio Ambiente, 2008. Disponível em: https://fundai.sc.gov.br/files/legislacoes/legislacao_103.pdf. Acesso em: 06 jun. 2024.

SANTOS, C. C.; VALENTINA, L. V. O. D.; SOUZA, R. O. Caracterização do resíduo pó de exaustão de fundição na indústria da construção civil. **Espacios**, v. 36, n. 5, p. 9-24. 2015.

SIDDIQUE, R. *et al.* 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, 2015.

SILVA, W. R. L. *et al.* 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, n. 4, p. 642-662, 2011.

SUA-IAM, G. *et al.* Workability and compressive strength development of self-consolidating concrete incorporating rice husk ash and foundry sand waste: a preliminary experimental study. **Construction and Building Materials**, v. 228, p. 116813, 2019.

SVIDRÓ, J. T. *et al.* The effect of different binder levels on the heat absorption capacity of moulding mixtures made by the phenolic urethane cold-box process. **Journal of Thermal analysis and Calorimetry**, v. 130, n. 3, p. 1769-1777, 2017.

TORRE, J. **Manual prático de fundição e elementos de prevenção da corrosão**. São Paulo: Hemus, 1975.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Beneficial uses of spent foundry sands**. 2022. Disponível em: <https://www.epa.gov/smm/beneficial-uses-spent-foundry-sands>. Acesso em: 06 jun. 2024.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **CDR Data**. 2020. Disponível em: <https://www.epa.gov/chemical-data-reporting>. Acesso em: 06 jun. 2024.

VARGAS, A. S. *et al.* Argamassas geopoliméricas à base de cinzas volantes álcali-ativadas contendo areia de fundição. **Cerâmica**, v. 61, n. 359, p. 317-322, 2015.

WANG, Y. *et al.* Characterization of hydrocarbon emissions from green sand foundry core binders by analytical pyrolysis. **Environmental Science & Technology**, v. 41, n. 22, p. 7922-7927, 2007.

YING-MIN, L.; TIAN-SHU, W.; WEI-HUA, L. Research on regeneration methods of animal glue waste sand for foundry. **Royal Society Open Science**, v. 5, n. 5, p. 172270, 2018.

Agradecimentos

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

Natália Salamoni

Investigation, Writing.

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental | Universidade Regional de Blumenau | Rua São Paulo, 3250, Itoupava Seca | Blumenau - SC - Brasil | CEP 89030-000 | Tel.: (47) 3221-6077 | E-mail: nasalamoni@gmail.com

Gustavo Gutierrez de Oliveira

Investigation.

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental | Universidade Regional de Blumenau | E-mail: ggorodrigues@furb.br

Abrahão Bernardo Rohden

Writing, Supervision.

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental | Universidade Regional de Blumenau | E-mail: abrcivil@gmail.com

Eduarda Fraga Olivo

Investigation.

Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais | Universidade do Extremo Sul Catarinense | AV. Universitária, 1105, Universitário | Criciúma - SC - Brasil | CEP 88806-000 | Tel.: (48) 3444-3715 | E-mail: eduardaolivo@unesc.net

João Lucas Nicolini

Investigation.

Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais | Universidade do Extremo Sul Catarinense | E-mail: joaolucasnicolini@gmail.com

Fabiano Raupp Pereira

Resources, Supervision.

Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais | Universidade do Extremo Sul Catarinense | E-mail: fraupp@unesc.net

Editores: **Marcelo Henrique Farias de Medeiros e Eduardo Pereira**

Ambiente Construído

Revista da Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído

Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º andar, Centro

Porto Alegre - RS - Brasil

CEP 90035-190

Telefone: +55 (51) 3308-4084

www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido

www.scielo.br/ac

E-mail: ambienteconstruido@ufrgs.br



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License.