

Avaliação da areia descartada de fundição (ADF), tratada como componente na produção de concreto usado na construção civil¹

Evaluation of waste foundry sand (WDF) treated as a component in the production of concrete used in the civil construction

João Vitor Castanho de Freitas²
Matheus Oliveira da Silva³
Vinícius Pellenz Colombo⁴
Maria Angélica Thiele Fracassi⁵

Resumo

A areia descartada de fundição é o principal resíduo proveniente da indústria de fundidos, sendo as possibilidades para seu descarte bastante irregulares, o que afeta o meio ambiente e traz baixas econômicas. Juntamente, destaca-se o seu reaproveitamento em argamassas, auxiliando na redução da extração de recursos naturais. Diante disso, o projeto teve como objetivo avaliar o desempenho da substituição parcial da areia natural por ADF, na mistura do concreto. Este artigo relata uma pesquisa experimental, na qual foram produzidos corpos de prova com substituições de 5%, 12,5% e 20%, os quais foram submetidos a ensaios mecânicos e físicos. Os resultados apontaram para viabilidade do uso do resíduo, sendo que a substituição de 12,5% é a mais satisfatória, por apresentar melhor desempenho e diminuição de descarte. Portanto, vê-se necessária a implementação desses recursos por parte da indústria na busca de soluções mais sustentáveis.

Palavras-chave: areia de fundição; concreto; reaproveitamento.

Abstract

The waste foundry sand is the main waste from the foundry industry, and the possibilities for its disposal are quite irregular, which affects the environment and brings economic losses. At the same time, the re-use of waste in mortars stands out, helping to reduce the extraction of natural resources. Therefore, the current project aimed to evaluate the performance of partial replacement of natural sand by WFS in the concrete mix. This article reports on an experimental study in which specimens with 5%, 12.5% and 20% substitutions were produced and subjected to mechanical and physical tests. The results pointed to the feasibility of using the residue, with the replacement of 12.5% being the most satisfactory for presenting better performance and greater reduction in waste. Therefore, the implementation of these resources by the industry is necessary in the search for more sustainable solutions.

Keywords: foundry sand; concrete; recycling.

1 Agradecimentos à HidroJet Equipamentos Hidráulicos Ltda. e Britasinos Concretos pelo apoio técnico com materiais e estrutura para ensaios. Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso técnico de Química da Fundação Escola Técnica Liberato Salzano Vieira da Cunha (FETLSVC), Novo Hamburgo, RS, Brasil, sob orientação da Me. Maria Angélica Thiele Fracassi.

2 Acadêmico do curso técnico de Química da FETLSVC. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-3416-4509>. E-mail: joaovitorcastanho138@gmail.com

3 Acadêmico do curso técnico de Química da FETLSVC. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-4171-5227>. E-mail: math.sil.oli@gmail.com

4 Acadêmico do curso técnico de Química da FETLSVC. ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-1231-7706>. E-mail: vinicius.pellenz.collombo@gmail.com

5 Mestre em Microbiologia Agrícola e do Meio Ambiente e licenciada em Ciências Biológicas pela Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), São Leopoldo, RS, São Leopoldo, RS. Professora da FETLSVC. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1729-6509>. E-mail: angelica@iberato.com.br

Artigo recebido em 17.04.2023 e aceito em 25.09.2023.



1 Introdução

O aumento da geração de resíduos e a necessidade de uma adequada disposição dos mesmos ocorre concomitante ao desenvolvimento e progresso industrial. Com isso, cada vez mais, dá-se relevância à sustentabilidade no âmbito industrial, que traz consigo a necessidade de desenvolvimento de pesquisas, com o propósito de encontrar uma forma mais ambientalmente correta de destinação desses materiais. Nesse prisma, tem-se que a areia descartada de fundição (ADF) é um dos principais resíduos sólidos produzidos pelo setor industrial e o de maior descarte no setor de fundição, mundialmente falado (Marcon, 2013). O Brasil é atualmente o nono (9º) maior produtor de fundidos do mundo, originando cerca de dois milhões de toneladas do resíduo ao ano, com a geração de, aproximadamente, uma tonelada do resíduo para cada tonelada de metal produzido (Industry, 2023, p. 33-37).

Atualmente, a principal forma de descarte da ADF se dá em aterros industriais, que, além de gerar altos custos para as empresas produtoras, também pode se tornar um grande passivo ambiental. Quando descartado irregularmente, o resíduo é visto como contaminante do solo e lençóis freáticos, principalmente em decorrência do seu elevado volume de descarte. Por outro lado, há também problemas econômicos e ambientais que são vistos na construção civil, responsável por utilizar cerca de 50% dos recursos naturais extraídos da natureza e ser um dos setores que mais impactam o meio ambiente por meio de suas atividades (John, 2017). Entre suas ações, vale destacar a extração da areia usada, como agregado em seus processos que, de acordo com Santos (2015), é uma atividade insustentável e causadora de impactos ambientais como: alteração e assoreamento dos cursos d'água, destruição da flora e fauna, alteração dos processos geológicos, entre outros.

Diante disso, pode ser avaliado o reaproveitamento da ADF, na fabricação do concreto, fazendo-se por meio da substituição parcial da areia fina pela mesma. Dessa forma, contribui para remediar os diversos problemas advindos do seu descarte, além de gerar economia de areia e amenizar a necessidade de sua extração, que é também bastante agressiva ao meio ambiente. Por conseguinte, esta pesquisa buscou verificar se um concreto produzido, a partir da ADF, apresenta propriedades favoráveis à aplicações na construção civil, também contemplando avaliações quanto à sua resistência, trabalhabilidade e absorção de água.

2 Desenvolvimento

2.1 Areia de fundição

A areia de fundição, também chamada de areia de moldagem, é utilizada dentro das caixas de moldagem, para dar forma à peça desejada, durante o processo de fundição. Ela é fundamentalmente produzida de material refratário, composto de areia base (SiO_2) e aglomerante. Nessa mistura, cada componente apresenta sua função específica. A areia base é seu principal componente e tem como função resistir a altas temperaturas, enquanto o aglomerante, que pode ser argila bentonítica (bentonita) ou outros ligantes químicos, apresenta função de coergir os grãos de areia entre si e formar uma massa mais uniforme e plástica para a aplicação em moldes (Pinto, 2013).

Adiciona-se também água à mistura, para ativar a ligação da argila na areia e aumentar sua plasticidade. Pode-se acrescentar ainda um aditivo carbonáceo (composto de pós de carvão), para evitar a fusão da areia na superfície de vazamento, melhorando o acabamento e facilitando a desmoldagem. Essa composição é elaborada em misturadores de areia, onde a mistura é feita de forma homogênea e garante uma hidratação uniforme.

Dependendo da aplicação, usam-se diferentes proporções dos componentes na mistura, a fim de atingir diferentes equilíbrios de moldabilidade, acabamento e resistência para o molde. A areia de fundição pode ser reutilizada algumas vezes, se for adicionada a ela areia nova, porém, após muitos usos, apresenta resquícios contaminantes que afetam a qualidade do metal. Após, o processo é descartada, denominada, então, como areia de fundição residual (Marcon, 2013).

É constatado, segundo Santos *et al.* (2016), que cerca de três milhões de toneladas de resíduos chegam por ano aos aterros industriais no País, sendo a ADF o material industrial mais descartado no país. Esse resíduo, mesmo que, às vezes, não apresente periculosidade, conforme as normas, continua sendo um sério problema ambiental, em decorrência de seu elevado volume de produção.

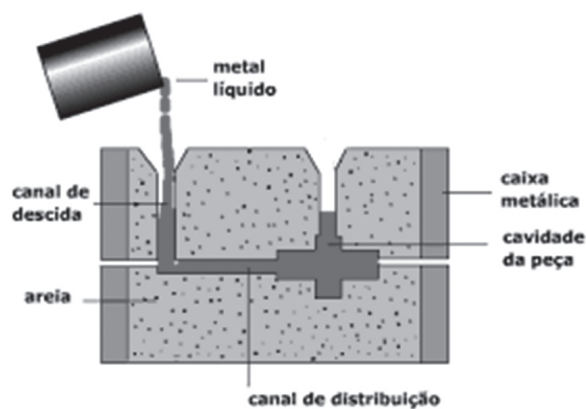
2.1.1 Processo de fundição

A fundição é um processo de fabricação de peças metálicas que consiste essencialmente em preencher com metal fundido (líquido) a cavidade de um molde com formato e medidas correspondentes aos da peça a ser fabricada e conseqüente desmoldagem, após solidificação do metal. Dessa forma, compreende-se

como um método de conformação mecânica do metal a ser utilizado. O processo, utilizando moldagem em areia verde, é o mais barato e mais utilizado, seguindo as etapas descritas a seguir:

- I. Inicialmente, é feita a confecção de um modelo que servirá para a construção do molde, conferindo as determinadas dimensões da peça. Para a confecção do molde, o modelo é posicionado na caixa que, então, é recheada com a areia de moldagem e compactada. Após a retirada do modelo, podem ser adicionados machos no molde que formam os vazios, superfície interna e reentrâncias da peça (Menezes; Romeiro; Müller, 2020).
- II. Com o molde já pronto, parte-se para a fusão do metal a ser utilizado e consequente vazamento/enchimento do molde. Em seguida, depois da solidificação, é feita a desmoldagem de forma manual ou mecanizada. Por fim, ainda é feito um acabamento e limpeza da peça, para retirar canais de alimentação (por onde o molde é preenchido), rebarbas e imperfeições na sua superfície (Menezes; Romeiro; Müller, 2020).

Figura 1 – Processo de moldagem de peças metálicas



Fonte: Menezes (2020).

A fundição é bastante difundida e bastante antiga, apresentando diversas vantagens como: possibilidade de fazer peças de diferentes complexidades, em padrões variados, com diferentes dimensões e possibilita grande economia de peso, já que permite a obtenção de paredes com espessuras quase ilimitadas (Menezes; Romeiro; Müller, 2020).

2.1.2 Tipos de areia de fundição

As areias de moldagem mais utilizadas são: a areia verde e a areia quimicamente ligada, diferenciando-se basicamente pelo processo ligante em cada uma.

A areia verde tem seu nome, decorrente do acréscimo de umidade em sua mistura e praticamente manutenção, durante o vazamento, consistindo em 85 a 95% de sílica, podendo ter de 4 até 10% de argila, 2 a 10% de adição de material carbonáceo e de 2 a 5% de água. No final da mistura, a areia apresenta cor preta, em decorrência do seu teor de carbono. A argila mais utilizada como aglomerante em sua composição é a bentonita que é um silicato de alumina hidratado (contém em sua composição silício, alumínio, ferro, cálcio, magnésio, potássio e sódio) e tem suas características alteradas, após o vazamento, exigindo uma constante reposição da mesma (Pinto, 2013).

Já a areia quimicamente ligada, consiste em 93 a 99% de sílica e 1 a 3% de ligante químico. Os ligantes químicos usados mais comumente são os uretanos fenólicos, as resinas epóxi e os silicatos sódicos. Essa areia é muito usada para fazer os machos, já que requerem maior resistência e colapsibilidade suficiente para retirada da peça fundida, após o resfriamento (Pinto, 2013).

A classificação da areia de fundição é baseada na NBR 10004:2004 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004), de acordo com o processo de moldagem e afins, podendo ser classificadas tanto como um resíduo perigoso (CLASSE I) quanto como não perigoso (CLASSE II). Essa norma tem por objetivo definir o grau de periculosidade dos resíduos sólidos, em função de suas propriedades físicas, químicas ou infectocontagiosas e ao risco que eles podem apresentar à saúde pública e/ou ao meio ambiente. Dessa forma, tem papel fundamental para a destinação e aplicações adequadas desses materiais.

Marcon refere-se à periculosidade das areias de fundição, afirmando que:

Geralmente, as areias que utilizam resinas fenólicas com aglutinante se enquadram na classificação de resíduos perigosos (Classe I) por oferecerem periculosidade ao meio ambiente e à saúde pública, pois apresentam concentrações de fenóis superiores ao limite estabelecido pela mesma norma. A concentração dos contaminantes, possivelmente presentes nas areias, é um parâmetro que pode ser determinado, através do ensaio de lixiviação prescrito na ABNT NBR 10005:2004. Já as areias que utilizam bentonita como aglutinante, podem ser classificadas como resíduos não-perigosos (Classe II), inertes (Classe IIB) ou não-inertes (Classe IIA), dependendo das concentrações em que são solubilizados os seus constituintes (Marcon, 2013, p. 29-30).

2.1.3 Reaproveitamento da ADF

Essa areia de fundição residual, mesmo não servindo mais para processos de moldagem, ainda possui vários usos que não a contaminação do meio ambiente. Como consta em Marcon (2013), o gerenciamento da areia de fundição é imprescindível para assegurar plena segurança ao meio ambiente e à saúde pública, porém, antes de qualquer medida de deposição, é importante procurar medidas para minimizar o volume de resíduo gerado.

De acordo com Pinto (2013), a reciclagem pode ser definida como um conjunto de operações pelo qual o produto final é submetido, buscando devolver-lhe características para se tornar matéria-prima em um processo produtivo novamente, podendo ser dividida em externa e interna. Por reciclagem interna, entende-se os processos de recuperação/recirculação e regeneração do material. No primeiro, a areia proveniente da desmoldagem é utilizada novamente no processo de fundição, passando apenas por processos de classificação e retirada de resíduos metálicos e torrões. Porém, conforme recirculação, a areia apresenta constantes mudanças nas propriedades e um limite de ciclos que pode ser utilizada.

Já na regeneração, o material passa por um processo de limpeza na superfície dos grãos, visando devolver as características mais próximas possíveis da areia nova. Os principais tratamentos utilizados são: mecânico, térmico, úmido e químico. Entre eles, vale destacar o tratamento úmido, em que segundo Adegas (2007 *apud* Maciel, 2017), a areia é misturada com água, a fim de solubilizar o ligante aderido à superfície dos grãos e permitir a separação posterior de um efluente líquido da areia regenerada. Esse é um método aplicável somente em areias que utilizam ligante solúvel em água, como é o caso da areia verde, porém apresenta a desvantagem de gerar resíduos líquidos.

Por outro lado, a reciclagem externa consiste na reutilização da ADF fora do processo produtivo original, podendo acontecer em diversas aplicações, como em cobertura de aterros, preparação de solos especiais, misturas asfálticas e fabricação de concreto. Aplicações essas que, atualmente, vêm ganhando cada vez mais espaço e pesquisas relacionadas, contribuindo para a elaboração de leis que permitam usos adversos da areia de fundição residual.

Como exemplo, vale destacar algumas liberações já feitas, relacionadas ao uso de ADF no Brasil:

Alguns Estados como São Paulo e Santa Catarina permitem que a areia de fundição seja usada na fabricação de asfalto e na construção de artefatos

de concreto que não tenham funções estruturais, como tijolos e lajotas para calçadas.[...] Também, em maio de 2013, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) aprovou norma que permite o uso das areias de fundição em aterros e asfalto (Santos *et al.*, 2016, p. 541-542).

2.2 Concreto

O concreto é o material de construção mais utilizado do mundo, sendo o segundo material mais empregado de todos, atrás apenas da água. Por possuir qualidades adequadas e versatilidade, aliadas ao seu relativo baixo custo, ele é um material com vantagens técnicas, econômicas e sociais difíceis de serem superadas por qualquer outro material (Isaia 2005 *apud* Marcon, 2013). É um material revolucionário para a arte de construção e projeção de estruturas incríveis e que vem sendo, cada vez mais, amplamente produzido.

O concreto é um composto heterogêneo, constituído por cimento, água, agregado miúdo (areia) e agregado graúdo (pedra ou brita). Pode também conter adições (cinza volante, pozolanas, sílica ativa etc.) e aditivos químicos, com a finalidade de melhorar ou modificar suas propriedades básicas. Nessa mistura, o componente chave é o cimento, que é um pó fino com propriedades aglutinantes e capacidade de reagir com água, e, assim, formar um bloco enrijecido, juntamente dos agregados. O cimento pode variar bastante em sua composição, dependendo do uso, mas seu principal composto e responsável por suas propriedades é o Clínquer, uma mistura de argila, de calcário e de minérios de alumínio e de ferro.

2.3 Procedimento experimental

2.3.1 Materiais e equipamentos

Para a realização dos experimentos, produziram-se corpos de prova com diferentes misturas de concreto, visando avaliar o seu comportamento quanto às propriedades, conforme crescente implemento da areia verde residual tratada na sua composição. Para a confecção dos corpos, foram utilizados os seguintes materiais: água, cimento CP II-F-40, areia natural regular (agregado miúdo), brita 0 (agregado graúdo), areia verde de fundição descartada (substituta parcial da areia natural) e plastificante polifuncional. Todos os materiais citados acima, com exceção da areia verde residual, foram providos por uma empresa de concretagem de Campo Bom, representando uma formulação, normalmente usada pela empresa. Tanto o cimento quanto o plastificante, utilizados na mistura,

apresentam como função adicional, reduzir a demanda de água e incrementar a resistência do concreto, além de representar um uso visto na área da construção civil.

A areia descartada de fundição escolhida foi a areia verde, em decorrência de ser a mais utilizada nos processos de fundição e não apresentar periculosidade, sendo fornecida por uma empresa de fundição de Porto Alegre. Com base na demanda para confecção dos corpos de prova e também possíveis perdas, durante a lavagem, foram utilizados cerca de 20 kg de areia verde residual. A parte de mistura, moldagem, cura e testes mecânicos foram todos realizados em espaços e equipamentos cedidos também pela empresa de concretagem, com auxílio e acompanhamento de seus profissionais. Já o teste de absorção de água, por capilaridade, foi realizado em laboratório na Fundação Liberato.

Referente aos equipamentos, foram utilizadas estufas para a secagem tanto da areia, após o tratamento, como também secagem dos corpos de prova destinados ao teste de absorção de umidade por capilaridade, além de uma peneira classificadora ABNT para determinar a granulagem da areia verde residual usada. Utilizou-se balanças semi-analíticas para a pesagem dos materiais a serem usados na mistura e também dos corpos de prova, durante o teste de absorção de umidade por capilaridade. Os diferentes traços do concreto foram misturados em betoneira, sendo usados tronco de cone, haste de compactação e placa base para determinação da consistência da mistura por meio do *Slump Test*, conforme a norma NBR 16889:2020 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2020).

Já para a moldagem dos corpos de prova, utilizou-se moldes metálicos cilíndricos de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura para confecção dos corpos de prova, usados para os testes de compressão e absorção, além de moldes prismáticos de 10 cm de largura por 40 cm de comprimento, para os corpos usados no teste de tração, ambos seguindo a norma NBR 5738:2015 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2015). Por fim, os ensaios mecânicos foram feitos em prensas, sendo elas específicas para realização dos testes de compressão uniaxial e tração por compressão diametral.

2.3.2 Métodos

Previamente à confecção dos corpos de prova, procedeu-se um tratamento úmido da areia verde residual que teve como principal objetivo reduzir a presença da bentonita na areia. Esse tratamento é recomendável, pois seus constituintes podem, de acordo com Neville (1997 *apud* Marcon, 2013), interferir

na hidratação e aderência da argamassa, resultando em baixas de resistência. O tratamento consistiu na lavagem da areia verde residual em uma peneira, sob constante esmagamento e agitação manual da mesma. Assim, buscou-se um maior atrito das partículas para melhor remoção do ligante e impurezas na presença da água. Após um tempo de descanso em balde, a água sobrenadante foi decantada e o rejeito que se formou entre a areia e a água também foi retirado, tendo-se apenas a areia úmida.

Em seguida, a areia passou por uma secagem em estufa a uma temperatura de 120 °C, durante três dias para retirada da umidade, a fim de que a mesma não influenciasse no traço original. A areia foi novamente triturada a nível de pó, e sua granulometria determinada por peneiras industriais, conforme ABNT, as quais podem ser visualizadas na figura 2, sendo utilizado o tamanho do grão menor do que 2 mm. Após esses processos, obteve-se a areia verde, conforme consta na figura 3.

Figura 2 – Peneira ABNT



Fonte: Os autores (2022).

Figura 3 – Areia lavada, seca e peneirada



Fonte: Os autores (2022).

Para a produção dos corpos de prova, foi empregado o traço convencional, utilizado em concretos, sendo esse de 1:2:3 em massa. Assim, a mistura é constituída de seis partes: uma de cimento, duas de areia e três de brita. A fim de dosar a quantidade de água a ser utilizada, seguiu-se uma relação água-cimento de aproximadamente 0,5, além do uso de plastificante, o qual se adotou 0,75%, em relação ao peso do cimento, empregado na mistura (conforme instruções do fabricante). A relação água-cimento adotada buscou equilibrar um maior aumento na resistência final do concreto e suficiente trabalhabilidade da mistura.

A areia verde residual foi utilizada como substituta parcial (em massa) da areia natural, seguindo quatro substituições diferentes, sendo elas de: 0% (grupo de controle), 5%, 12,5% e 20%. Tendo em vista a realização de três testes, sendo: compressão uniaxial (triplicata), tração (duplicata) e absorção de umidade (triplicata), portanto, ao todo foram confeccionados oito corpos de prova para cada substituição, totalizando trinta e dois corpos de prova.

Em conclusão às determinações, foram calculadas as quantidades necessárias dos materiais, como descrito na tabela 1.

Tabela 1 – Composição das misturas

	Brita	Cimento	Plastificante	Areia	ADF
T01 (0%)	25000 g	8333 g	62,5 g	16667 g	—
T02 (5%)	25000 g	8333 g	62,5 g	15833,6 g	833,4 g
T03 (12,5%)	25000 g	8333 g	62,5 g	14583,6 g	2083,4 g
T04 (20%)	25000 g	8333 g	62,5 g	13333,6 g	3333,4 g

Fonte: Os autores (2022).

Determinadas as quantidades necessárias de cada material, foram efetuadas as misturas correspondentes a cada substituição em betoneira, com atenção à limpeza da betoneira, ao final de cada mistura, para não interferência entre as composições. Ao término de cada uma das misturas, antes de se proceder à moldagem, foram realizados os *Slump Test* de cada uma delas. O *Slump Test* foi realizado, seguindo a norma NBR 16889:2020 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2020), onde no molde, devidamente fixado sobre a placa base, foram inseridas três camadas correspondentes a um terço do molde, as quais foram compactadas com 25 golpes, uniformemente distribuídos em cada camada, seguindo movimentos circulares e espirais até o centro. Por fim, o molde foi retirado lentamente na vertical de forma para escorrer a mistura de modo ideal, assim, permitindo a determinação do abatimento pela diferença entre a altura do molde e a altura da massa, como pode ser visto na figura 4.

Ao término das misturas, sucederam-se as moldagens em moldes cilíndricos e prismáticos, em que a argamassa foi introduzida com uso de concha de seção U, de forma a obter uma distribuição uniforme e simétrica, mostrado na figura 5.

Seguindo ao adensamento, deu-se em 1 camada de 12 golpes circulares para os moldes cilíndricos e 1 camada de 75 golpes para moldes prismáticos, seguindo a norma NBR 5738:2015 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2015), assim como posterior identificação dos corpos, conforme a figura 6.

Figura 4 – Medida do abatimento



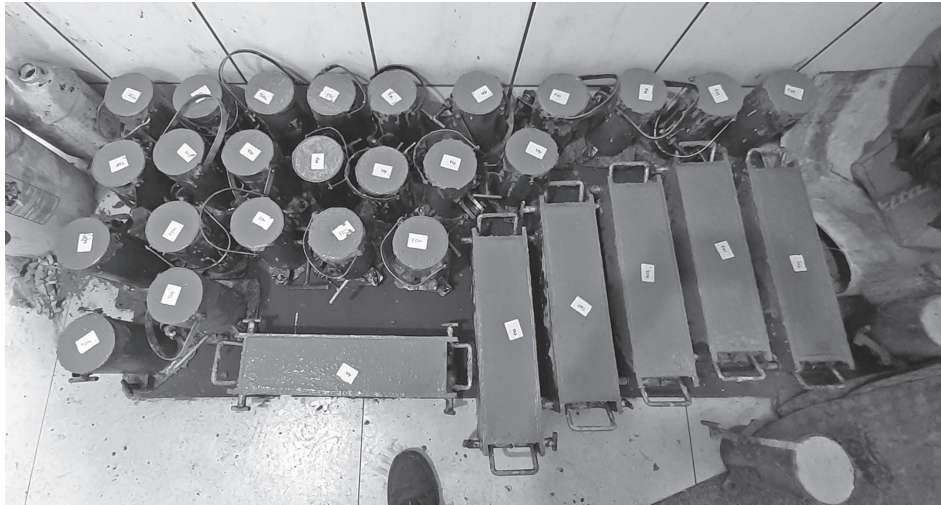
Fonte: Os autores (2022).

Figura 5 – Moldagem dos corpos



Fonte: Os autores (2022).

Figura 6 – Identificação dos corpos



Fonte: Os autores (2022)

Após 24 horas de cura inicial, foi feita a desmoldagem dos corpos, com auxílio de desmoldante, levando-os até cura imersa em solução saturada de hidróxido de cálcio por um tempo estimado de 28 dias para todos. Esse tempo de cura de 28 dias foi utilizado, porque nessa idade, o concreto atinge a maior taxa de ganho de resistência, representando uma boa média na resistência de concretos. Isso pode ser percebido em diversos projetos que analisam o concreto com tempos diferentes de cura, da mesma forma que constatado em Kumar e Sashdhar (2022).

Passado o tempo de cura, seguiu-se para as etapas experimentais, sendo caracterizadas pelos testes mecânicos e de absorção de umidade dos corpos. Os ensaios de compressão uniaxial seguiram a norma NBR 5739:2018 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2018), de maneira que sua execução se deu

logo após o término da cura, com uma tolerância de ± 20 h para manter as condições de sazonalidade que adquiriram durante a cura. Tendo as faces dos corpos e dos pratos de compressão devidamente limpos, os corpos de prova foram adequadamente centralizados verticalmente ao eixo vertical da máquina, conforme figura 7 e, então, aplicadas às cargas de ensaio com um aumento progressivo, contínuo e sem interrupções entre 0,3 MPa/s a 0,8 MPa/s até o momento de sua ruptura.

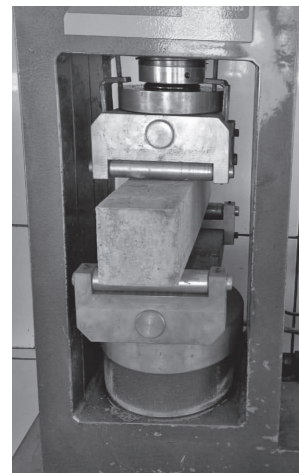
De acordo com as mesmas condições, os ensaios de tração na flexão foram realizados, seguindo a norma NBR 12142:2010 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2010), de tal forma que os corpos prismáticos foram colocados deitados sobre os apoios, paralelos a seu eixo longitudinal, conforme figura 8.

Figura 7 – Rompimento do corpo por compressão



Fonte: Os autores (2022).

Figura 8 – Rompimento do corpo por tração



Fonte: Os autores (2022).

Feito o posicionamento, sucedeu-se à aplicação das cargas, as quais foram aplicadas de forma contínua e sem interrupções, elevando-se a tensão entre 0,9 MPa/min a 1,2 MPa/min, até o momento da ruptura. O restante dos corpos de prova cilíndricos (12 corpos) foi reservado ao teste de absorção de água por capilaridade, seguindo a norma NBR 9779:2012 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2012), com exclusão da ruptura dos corpos para determinação da altura máxima de ascensão capilar.

Para o teste de absorção, inicialmente os corpos foram submetidos a uma secagem em estufa, a uma temperatura de 105 °C e, subsequentemente, resfriados à temperatura ambiente. Depois de totalmente secos, seguiram para a primeira pesagem, indicando as massas dos corpos de prova secos. Após as pesagens iniciais, eles foram colocados em recipientes plásticos, mantidos suspensos e com nível de água a 5 ± 1 mm acima da face inferior dos corpos, conforme preconiza a norma técnica e pode ser visualizado na figura 9.

Figura 9 – Montagem do ensaio de absorção



Fonte: Os autores (2022).

Foram determinadas as massas dos corpos de prova, nos intervalos de 3h, 6h, 24h, 48h e 72h, após o primeiro contato com a água, sendo previamente retirado o excesso de água com pano úmido. Após a determinação das massas, foram novamente dispostos em contato com a água, até o final do ensaio.

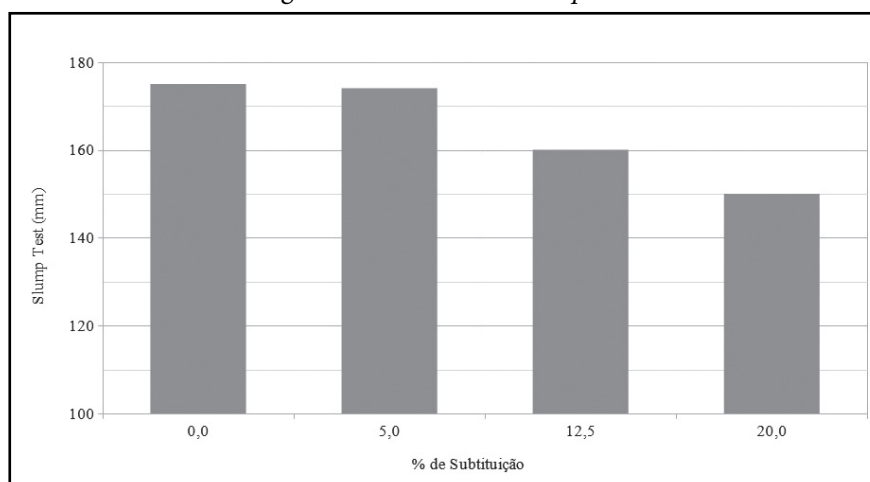
3 Resultados e discussão

3.1 Abatimento do concreto

O abatimento do concreto fresco, avaliado por meio do ensaio de abatimento de tronco de cone (*Slump Test*), buscou verificar a trabalhabilidade do concreto, obtido antes do seu endurecimento. Com isso, averiguou-se a influência da adição da ADF nas propriedades de consistência e coesão que são importantes indicativos da umidade e segregação dos materiais nas misturas. Conforme resultados expressos na figura 10, pode-se observar uma progressiva diminuição nos valores de abatimento, decorrente do aumento na substituição, com uma redução máxima de até 14,29%, na substituição de 20%.

Com isso, fica evidente que a areia verde demanda uma quantidade maior de água do que a areia natural, muito provavelmente por sua inferior granulometria e também pela presença de bentonita em sua composição, o que dificulta a homogeneização da mistura e provoca conseqüente incremento na consistência do concreto e diminuição do abatimento. Tais resultados também corroboram com outras análises feitas por Guney *et al.* (2010), Kumar e Sashdhar (2022) e Pinto (2013).

Figura 10 – Gráfico do *Slump Test*



Fonte: Os autores (2022).

3.2 Absorção de água por capilaridade

Para determinação da absorção de água por capilaridade, foi feita a montagem com os corpos de

prova já secos, conforme a figura 9. Após as sucessivas pesagens dos corpos em intervalos de 3h, 6h, 24h, 48h e 72h, em contato com a água, foram obtidos os valores descritos na tabela 2.

Tabela 2 – Massa média

	Massa inicial(g)	3h(g)	6h(g)	24h(g)	48h(g)	72h(g)
0,00%	3596,75	3629,24	3637,06	3663,50	3678,99	3688,82
5,00%	3652,54	3685,33	3693,42	3720,81	3738,84	3750,30
12,50%	3659,66	3692,33	3700,50	3728,27	3744,93	3755,05
20,00%	3634,81	3667,70	3675,68	3703,29	3719,42	3729,31

Fonte: Os autores (2022).

A partir desses valores, foi então possível determinar a absorção capilar dos corpos, mostradas na tabela 3, calculada com a seguinte equação:

$$C = \frac{(m_{sat} - m_{seco})}{S}$$

onde:

C = absorção de água por capilaridade em g/cm²;

m_{sat} = massa do corpo de prova em contato com água, durante determinado período de tempo, em gramas;

m_{seco} = massa do corpo de prova seco em temperatura ambiente;

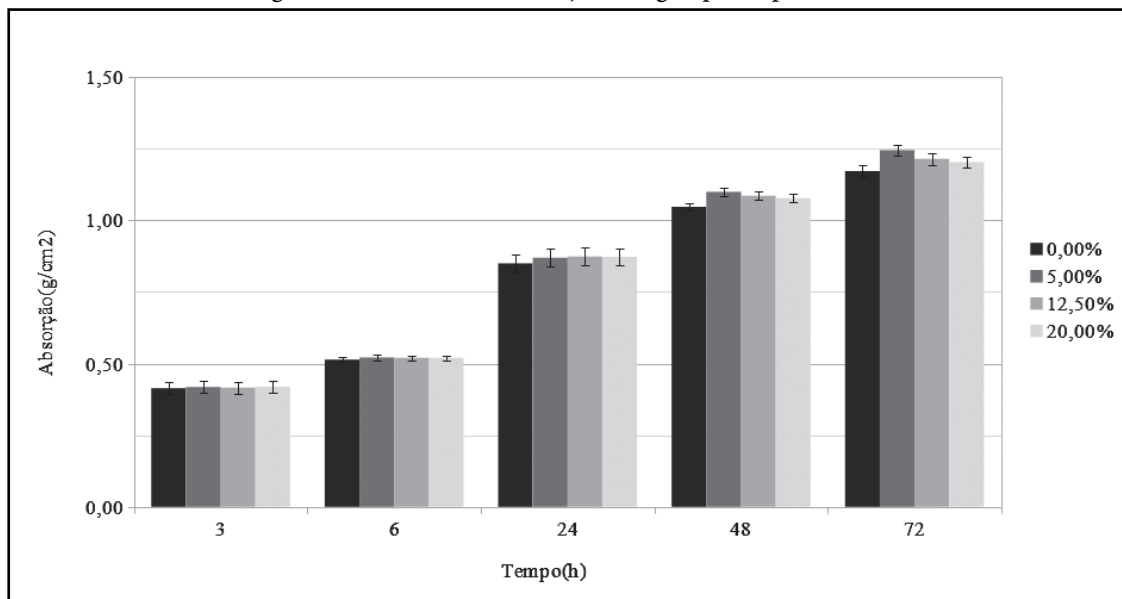
S = área da seção transversal do corpo cilíndrico em cm², nesse caso, 78,54 cm².

Tabela 3 – Absorção média

	3h(g/cm ²)	6h(g/cm ²)	24h(g/cm ²)	48h(g/cm ²)	72h(g/cm ²)
0,00%	0,41	0,51	0,85	1,05	1,17
5,00%	0,42	0,52	0,87	1,10	1,24
12,50%	0,42	0,52	0,87	1,09	1,21
20,00%	0,42	0,52	0,87	1,08	1,20

Fonte: Os autores (2022).

Figura 11 – Gráfico de absorção de água por capilaridade



Fonte: Os autores (2022).

Conforme os resultados expressos na figura 11, as argamassas apresentam comportamento muito semelhante entre si inicialmente, quase não havendo mudanças até o período de 24h. A partir desse intervalo de tempo, pode ser visto um maior incremento nas absorções, em relação à mistura de referência. Com o aumento no tempo de contato com a água, percebe-se que a substituição de 5% demonstrou maior absorção, em relação à argamassa de referência, apresentando aumento percentual de até 5,98% no tempo de 72h, enquanto as substituições de 12,5% e 20% apresentaram acréscimos de 3,42% e 2,56% respectivamente.

Para auxiliar na análise dos resultados, utilizou-se do teste T de Student, para determinar estatisticamente se houve diferenças significativas das amostras em relação ao grupo controle. O teste indicou, com 95% de confiança, que somente a substituição de 5% ao tempo de 72h apresentou diferença significativa entre as amostras. Ademais, o aumento na absorção com o implemento da areia verde foi provavelmente gerado pela maior porosidade, até certo ponto, no

concreto que está diretamente relacionada com a ascensão capilar. A porosidade, por sua vez, pode estar sendo influenciada pelo menor empacotamento das partículas e também pela maior conectividade entre os poros gerados pela presença de ADF.

3.3 Resistência à compressão

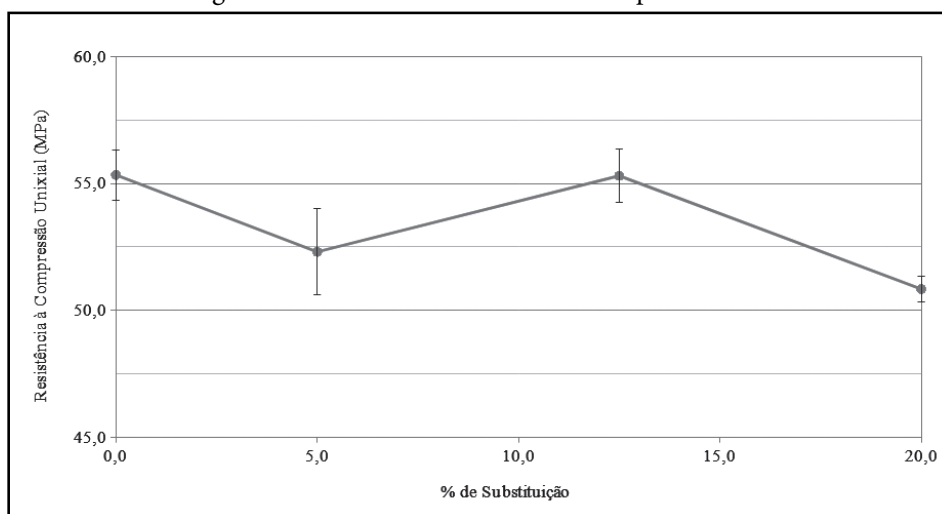
Na tabela 4, estão representados os resultados obtidos do ensaio de resistência à compressão dos corpos cilíndricos, com idade de 28 dias. Em seguida, tem-se esses resultados expressos na figura 12, juntamente do desvio padrão dos mesmos.

Tabela 4 – Resistência à compressão uniaxial

Substituição	MPa
0,00%	55,33
5,00%	52,30
12,50%	55,30
20,00%	50,83

Fonte: Os autores (2022).

Figura 12 – Gráfico de resistência à compressão uniaxial



Fonte: Os autores (2022).

Como pode ser observado, houve influência do teor de resíduo de areia verde nas resistências à compressão. Nota-se que a substituição de 12,5% apresentou resistência próxima ao grupo controle, 0,1% inferior ao mesmo, enquanto as misturas com 5% e 20% apresentaram desempenho inferior, com 5,5% e 8,1%, abaixo do grupo controle. Desse modo, os resultados coincidem com os apontamentos feitos por Pinto (2013) e especialmente por Guney *et al.* (2010), que analisou concretos com substituições de 5%, 10% e 15% de areia natural fina por areia de fundição

residual e constatou uma diminuição na resistência à compressão com o aumento da quantidade de areia de fundição. Também vale ressaltar que, segundo sua análise, um teor de 10% de ADF seria a substituição ideal, já que apresentou quase a mesma resistência que a mistura de concreto controle.

Em contrapartida, ensaios realizados por Kumar e Sashdhar (2022), demonstraram um aumento consecutivo nas resistências à compressão em substituições de até 30%. Desse modo, no presente estudo, percebe-se um melhor desempenho da mistura, com

substituição entre 10% e 12,5%, podendo indicar uma boa distribuição granulométrica nessa faixa de adição. Ademais, foi possível notar uma menor perda de resistência para as amostras testadas, em relação ao grupo controle, quando comparadas com outros trabalhos, possivelmente decorrente do pré-tratamento realizado com a areia verde residual, utilizada neste estudo.

3.4 Resistência à tração

Os resultados dos ensaios de tração na flexão foram realizados em duplicata com os corpos de prova

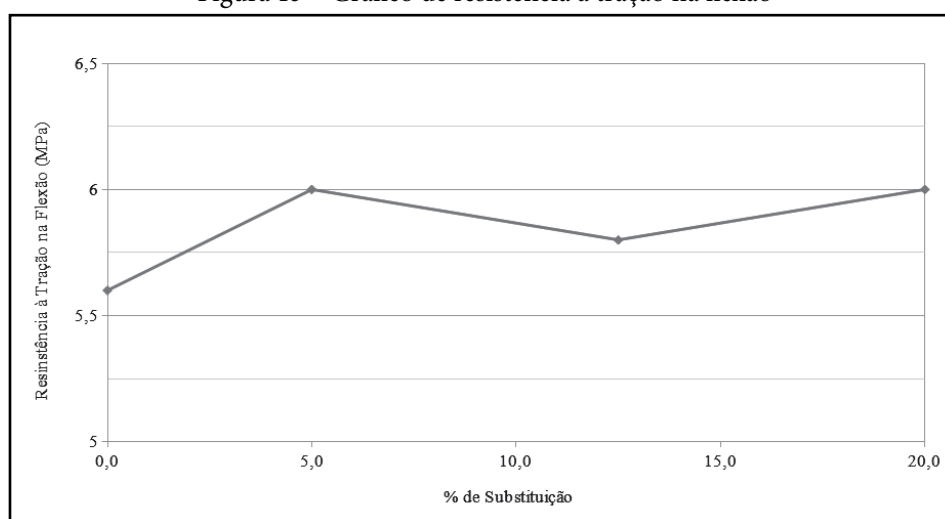
prismáticos também com idade de 28 dias, sendo expressos na tabela 5 e na figura 13.

Tabela 5 – Resistência à tração na flexão

Substituição	MPa
0,00%	5,60
5,00%	6,00
12,50%	5,80
20,00%	6,00

Fonte: Os autores (2022).

Figura 13 – Gráfico de resistência à tração na flexão



Fonte: Os autores (2022).

A análise da resistência à tração na flexão demonstrou que todas as substituições atingiram valores de resistência maiores que o traço de referência. Dessa forma, mostrou conformidade com outros ensaios realizados por Siddique *apud* Guney *et al.* (2010), que em substituições de 10%, 20% e 30% de ADF, também constatou um aprimoramento na resistência à tração, por meio de ensaios de tração diametral. Também apresentou correspondência com os resultados obtidos por Kumar e Sashdhar (2022), que em substituições de até 50% de ADF, obteve um crescimento na resistência à tração na flexão em misturas de até 30%.

Por outro lado, foi de encontro às constatações de Guney *et al.* (2010), que em ensaios de tração diametral, percebeu um decréscimo nas resistências das substituições em relação ao controle, com exceção do teor de 10%.

4 Conclusão

Através dos resultados obtidos nos ensaios de abatimento, absorção por capilaridade e resistência à compressão, evidenciou-se que o concreto produzido

com ADF tem desempenhos inferiores, com relação ao concreto tradicional. Os testes de abatimento e absorção por capilaridade mostram uma maior demanda de água pelo concreto com substituições, o que afeta na trabalhabilidade da mistura fresca e possivelmente na vida útil do concreto, quando endurecido. Já o teste de compressão, relatou baixas de resistência com a adição da ADF, com exceção do teor de 12,5%, indicando, assim, influência do teor do resíduo na distribuição granulométrica do concreto.

Porém, obteve-se desempenho positivo no ensaio de resistência à tração, na flexão para todas as adições feitas, apontando de forma indireta para ganhos na propriedade de resistência à tração. Por conseguinte, o concreto produzido se qualificou nos parâmetros de consistência como de Classe S100, para substituições de 5% e 12,5% e S160 para teor de 20%. E, com base nas performances de resistência à compressão, classificaram-se como C 50 as misturas com 5% e 20% e C 55 o traço com 12,5%, em que C50 faz parte do Grupo I e C55 do Grupo II.

Portanto, pode-se afirmar que a utilização de ADF, como substituinte parcial da areia natural, é viável, retratando a possibilidade de aplicações diversas, para fins tanto não-estruturais como estruturais. Também se notou resultados positivos do tratamento realizado na areia verde residual, resultando em perdas reduzidas nas propriedades do concreto produzido, principalmente na sua resistência à compressão. No entanto, são necessários mais ensaios para caracterizar o tratamento realizado com a ADF, tendo em vista a viabilidade e eficiência do processo, bem como sua influência nos resultados obtidos. Ainda, com base nas propriedades alcançadas e satisfatória diminuição de descarte do resíduo, a substituição ideal apresentada neste estudo se deu no teor de 12,5%.

Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: concreto: procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: concreto: ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9779**: argamassa e concreto endurecidos: determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: resíduos sólidos: classificação. Rio de Janeiro, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12142**: concreto: determinação da resistência à tração na flexão de corpos prismáticos. Rio de Janeiro, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16889**: determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 2020.
- GUNEY, Y. *et al.* Re-usage of waste foundry sand in high-strength concrete. **Waste Management**, v. 30, n. 8-9, p. 1705-1713, 2010. DOI: 10.1016/j.wasman.2010.02.018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X10001042?via%3Dihub>. Acesso em: 18 out. 2022.
- INDUSTRY outlook: sales expected to keep growing. **Modern Casting**, v. 113, n. 1, p. 33-37, jan. 2023. Disponível em: <https://www.qgdigitalpublishing.com/publication/?m=55001&i=778043&p=34&ver=html5>. Acesso em: 07 ago. 2023.
- JOHN, V. M. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. São Paulo: IBRACON, 2017. Disponível em: <http://ppgec.poli.usp.br/wp-content/uploads/sites/277/2017/05/VMJOHN-Materiais-e-o-meio-ambiente-2017-09-30-1.pdf>. Acesso em: 25 set. 2022.
- KUMAR, K. A.; SASHDHAR, C. Experimental research on the effects of waste foundry sand on the strength and micro-structural properties of concrete. **Civil Engineering Journal**, v. 18, n. 10, p. 2172-2189, 2022. DOI: 10.28991/CEJ-2022-08-10-010. Disponível em: <https://civilejournal.org/index.php/cej/article/view/3578>. Acesso em: 07 ago. 2023.
- MACIEL, T. F. **Regeneração úmida de areia de fundição**: tratamento em areias a verde. 2017. 44 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnologia em Fabricação Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2017. Disponível em: http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/16971/1/PG_DAMEC_2017_2_05.pdf. Acesso em: 08 maio 2022.
- MARCON, M. F. **Aproveitamento da areia de fundição como agregado miúdo fino em concretos**. 2013. 69 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013. Disponível em: https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/115449/TCC_Matheus_Felipe_Marcon.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 17 abr. 2022.
- MENEZES, M. C.; ROMEIRO, S. B. B.; MÜLLER, N. C. **Metalurgia e siderurgia**. Novo Hamburgo: Fundação Escola Técnica Liberato Salzano Vieira da Cunha, 2020. 50 p. Apostila de aula.
- PINTO, F. B. **O uso de areia descartada de fundição (ADF) na produção de concreto**. 2013. 84 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais – Mestrado Profissional) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2013. Disponível em: https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/bitstream/123456789/792/1/dissertacao_pinto_2013.pdf. Acesso em: 17 abr. 2022.

SANTOS, A. Extração mineral de areias e seus impactos na territorialidade socioambiental: o caso de Feira de Santana – BA. *In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DINÂMICA TERRITORIAL E DESENVOLVIMENTO SOCIOAMBIENTAL*, 7., 2015, Salvador. **Anais [...]**. Salvador: Universidade Católica de Salvador, 2015. p. 1-20. Disponível em: <http://noosfero.ucsal.br/articles/0009/2488/extra-o-mineral-de-areias-e-seus-impactos-na-territorialidade-socioambiental.pdf>. Acesso em: 21 out. 2022.

SANTOS, A. V. *et al.* Reaproveitamento da areia de fundição descartada em substituição da areia natural na fabricação de blocos 11 estruturais de concreto. *In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA*, 7., 2016, Aracaju. **Anais [...]**. Aracaju: Associação Acadêmica de Propriedade Intelectual: Universidade Federal de Sergipe, 2016. p. 541-546. Disponível em: <http://www.api.org.br/conferences/index.php/ISTI2016/ISTI2016/paper/viewFile/46/64>. Acesso em: 23 abr. 2022.

