

**UNIVERSIDADE DO EXTREMO SUL CATARINENSE - UNESC  
PRÓ-REITORIA ACADÊMICA – PROACAD  
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE  
MATERIAIS – PPGCEM**

**BRUNO GAMBALONGA JÚNIOR**

**INCORPORAÇÃO DE AREIA DESCARTADA DE FUNDIÇÃO COMO AGREGADO  
EM MASSA ASFÁLTICA DO TIPO CONCRETO BETUMINOSO USINADO A  
QUENTE – CBUQ**

**Criciúma, maio de 2022**

**BRUNO GAMBALONGA JÚNIOR**

**INCORPORAÇÃO DE AREIA DESCARTADA DE FUNDIÇÃO COMO AGREGADO  
EM MASSA ASFÁLTICA DO TIPO CONCRETO BETUMINOSO USINADO A  
QUENTE – CBUQ**

Dissertação de Mestrado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientador(a): Profª Dra. Sabrina Arcaro

Coorientador: Prof. Dr. Oscar Rubem Klegues  
Montedo

**Criciúma, maio de 2022**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

G187i Gambalunga Júnior, Bruno.

Incorporação de areia descartada de fundição como agregado em massa asfáltica do tipo concreto betuminoso usinado a quente - CBUQ/ Bruno Gambalunga Júnior. - 2022.

120 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade do Extremo Sul Catarinense, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Criciúma, 2022.

Orientação: Sabrina Arcaro.

Coorientação: Oscar Rubem Klegues Montedo.

1. Areia de fundição. 2. Concreto - Aditivos. 3. Concreto asfáltico. 4. Resíduos industriais - Reaproveitamento. I. Título.

CDD 23. ed. 625.84

Bibliotecária Eliziane de Lucca Alosilla - CRB 14/1101

Biblioteca Central Prof. Eurico Back - UNESC

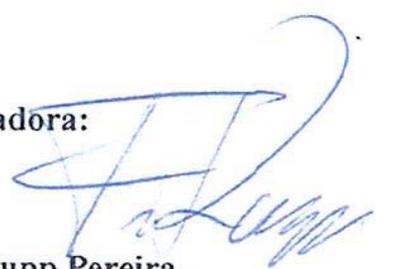
Bruno Gambalunga Junior

Incorporação de areia descartada de fundição como agregado em massa asfáltica do tipo concreto betuminoso usinado à quente – CBUQ.

Esta Dissertação foi julgada adequada à obtenção do grau de Mestre(a) em Ciência e Engenharia de Materiais pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (Área de concentração: Tecnologia de Materiais) da Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC.

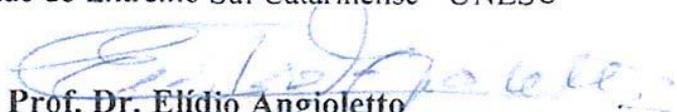
Criciúma, SC, 20 de maio de 2022.

**Banca Examinadora:**



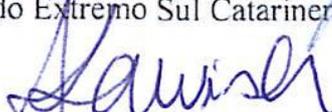
**Prof. Dr. Fabiano Raupp Pereira**

Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC



**Prof. Dr. Elídio Angioletto**

Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC



**Prof.ª Dr.ª Adriane de Assis Lawisch Rodriguez**

Universidade de Santa Cruz do Sul - UNISC

## DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho aos meus pais Bruno Gambalunga (in memoriam), Salete Angela Minotto Gambalunga, minhas irmãs Gracilane Gambalunga e Liliana Amboni Gambalunga, meus filhos Júlia Teixeira Gambalunga e Bruno Gambalunga Neto e a minha esposa Simone da Silva Teixeira Gambalunga.

A vida é como jogar uma bola na parede:  
Se for jogada uma bola azul, ela voltará azul;  
Se for jogada uma bola verde, ela voltará verde;  
Se a bola for jogada fraca, ela voltará fraca;  
Se a bola for jogada com força, ela voltará com  
força.

Por isso, nunca “jogue uma bola na vida” de forma  
que você não esteja pronto para recebê-la.

A vida não dá nem empresta;  
não se comove nem se apieda.

Tudo quanto ela faz é retribuir e transferir aquilo que  
nós lhe oferecemos.

Autor: Albert Einstein

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente agradeço aos meus pais Bruno Gambalunga (in memoriam) e Salete Angela Minotto Gambalunga, por toda a dedicação e esforço em minha criação, o que me permitiu chegar até aqui.

Agradeço a Deus pelos meus filhos Júlia Teixeira Gambalunga, Bruno Gambalunga Neto e minha esposa Simone Teixeira Gambalunga que me deram forças e motivação para avançar nos trabalhos e alcançar mais essa conquista em minha vida.

Gostaria de expressar meus sinceros agradecimentos aos meus orientadores, orientadora Prof<sup>a</sup> Dra. Sabrina Arcaro e ao coorientador Prof. Dr. Oscar Rubem Klegues Montedo, por seu total e irrestrito apoio, pela irretocável orientação e confiança depositada em mim durante todo o desenvolvimento desse trabalho.

Também quero agradecer à empresa Metalúrgica DS, seus diretores, em especial Sr. Ricardo Spillere e meus colegas de trabalho, pela colaboração recebida durante a realização deste trabalho.

A Prefeitura Municipal de Criciúma que oportunizou o acesso a Usina de Asfalto de Criciúma e colaborou com o desenvolvimento deste trabalho.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudos oportunizada para realização desse trabalho.

Aos professores Dr. Elidio Angioletto e Dr. Claus Tröger Pich pela orientação e valiosa contribuição nesse trabalho, especialmente nos ensaios de ecotoxicidade.

Aos colegas João Lucas Nicolini e Vinícius Alves pelo apoio e auxílio na execução dos ensaios laboratoriais.

Agradeço aos amigos Alfredo Anselmo Gomes, Diretor da Defesa Civil de Criciúma e José Schmidt Júnior, Agente da Defesa Civil de Criciúma pelo suporte junto a Usina de Asfalto do Município de Criciúma.

Agradeço a Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC, pelo suporte institucional. Finalmente meus agradecimentos a todas as pessoas que de uma forma ou de outra contribuíram no desenvolvimento deste mestrado.

## RESUMO

A fundição de metais representa uma importante parcela na cadeia produtiva dos processos industriais no país e no mundo. Esse processo gera um volume expressivo de resíduos sólidos industriais, chamados de areias descartadas de fundição (ADF). Apesar dos esforços, ainda não há um setor industrial que absorva tal resíduo como uma matéria-prima no processo. Este trabalho tem como objetivo avaliar a viabilidade técnica e ambiental da incorporação de ADF como agregado em massa asfáltica do tipo concreto betuminoso usinado a quente - CBUQ. Para isso, inicialmente areias de fundição de moldagem e finos de exaustão foram classificados e caracterizados a fim de identificar as potencialidades de aplicação como um agregado fino em massa asfáltica. Substituições de agregado fino de 5, 7,5, 10 e 15%, em massa, de finos de exaustão, areia de moldagem e um *blend* (moldagem/finos – 80/20) foram avaliadas a partir da faixa granulométrica normativa como um fator limitante para definir os candidatos potenciais. O teor (4, 4,5, 5, 5,5 e 6%) de Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) foi avaliado para amostras contendo 10% de cada areia. Os *Blends* contendo 5, 7,5 e 10% atenderam os requisitos de granulometria e foram obtidos corpos de prova por meio do método Marshall usando 5% de CAP, para verificação de estabilidade e fluência, volume de vazios da massa asfáltica e resistência à tração por compressão diametral. Ensaios de ecotoxicidade foram realizados em extratos solubilizados das areias e dos corpos de prova fragmentados. Os resultados foram avaliados a fim de que atendessem as diretrizes estabelecidas pelo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – DNER. Os resultados mostraram que a composição contendo 10% de *blend* apresentou volume de vazios de 3,3%, relação betume/vazios de 75, estabilidade de 658,2 kgf, fluência de 2,5 mm e resistência à tração por compressão diametral de 0,93 MPa. O teor de 10% de *blend* foi classificado como adequado para valorização em massa asfáltica do tipo concreto betuminoso usinado a quente, do ponto de vista técnico e ambiental. Teores de 5 e 7,5% de ADF *blend* apresentaram resultados fora dos limites normativos para volume de vazios e relação betume/vazios. Contudo, para os demais ensaios, esses teores mostraram resultados promissores, tanto do ponto de vista técnico como ambiental. O diferencial do trabalho perante outros já existentes foi um amplo estudo de viabilidade técnica e ambiental, utilizando critérios

de classificação, potencialidades, quantidades geradas de resíduos, viabilidade e aplicabilidade.

**Palavras-chaves:** fundição de metais; meio ambiente; areia descartada de fundição; resíduos; massa asfáltica.

## ABSTRACT

Metal smelting represents an important part of the productive chain of industrial processes in the country and in the world. This process generates a significant volume of industrial solid waste, called discarded foundry sand (DFS). Despite efforts, there is still no industrial sector that absorbs such waste as a raw material in the process. This work aims to evaluate the technical and environmental feasibility of incorporating DFS as an aggregate in hot-machined bituminous concrete - CBUQ. For this, initially molding foundry sands and exhaust fines were classified and characterized in order to identify the application potential as a fine aggregate in asphalt mass. Fine aggregate replacements of 5, 7.5, 10 and 15%, by mass, of exhaust fines, molding sand and a blend (molding/fines – 80/20) were evaluated from the normative granulometric range as a factor limiting factor to define potential candidates. The content (4, 4.5, 5, 5.5 and 6%) of Petroleum Asphalt Cement (CAP) was evaluated for samples containing 10% of each sand. Blends containing 5, 7.5 and 10% met the granulometry requirements and specimens were obtained using the Marshall method using 5% CAP, to verify stability and creep, asphalt mass void volume and tensile strength by diametric compression. Ecotoxicity tests were carried out on solubilized extracts from the sands and fragmented specimens. The results were evaluated in order to meet the guidelines established by the National Department of Highways - DNER. The results showed that the composition containing 10% of blend had a void volume of 3.3%, a bitumen/voids ratio of 75, stability of 658.2 kgf, creep of 2.5 mm and tensile strength by diametral compression of 0.93 MPa. The content of 10% of blend was classified as suitable for valorization in asphalt mass of the hot machined bituminous concrete type, from a technical and environmental point of view. DFS blend contents of 5 and 7.5% presented results outside the normative limits for void volume and bitumen/void ratio. However, for the other tests, these levels showed promising results, both from a technical and environmental point of view. The differential of the work compared to others already existing was a broad study of technical and environmental feasibility, using criteria for classification, potential, amounts of waste generated, feasibility and applicability.

Keywords: metal casting; environment; discarded foundry sand; waste; asphalt mass;

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 - Molde, peça e modelo e macho   | 21 |
| Figura 2 - Formas de molde  | 22 |
| Figura 3 - Imagem de um molde de areia verde  | 27 |
| Figura 4 - Sistema de várias camadas  | 30 |
| Figura 5 - Seção transversal típica – pavimento flexível  | 31 |
| Figura 6 - Classificação dos revestimentos  | 33 |
| Figura 7 - Amostras de agregados para mistura asfáltica   | 40 |
| Figura 8 - Pontos de retirada de amostras de montes ou pilhas e de sacos, barris, de resíduos ou similares.           | 40 |
| Figura 9 - Amostragem de ADF nas pilhas e montes no pátio do gerador  | 41 |
| Figura 10 - Amostragem de agregados para asfalto nas pilhas e montes no pátio da usina.                               | 42 |
| Figura 11 - Retirada de amostras de CAP 50/70 por meio da tampa superior de acesso ao tanque                          | 43 |
| Figura 12 - Fluxograma do procedimento experimental   | 44 |
| Figura 13 - Amostra de 0,5 g de mistura ADF moldagem preparada para ensaio de adesividade.                            | 51 |
| Figura 14 - Solução saturada de sal de cozinha  | 52 |
| Figura 15 - Verificação de deslocamento da película betuminosa  | 52 |
| Figura 16 - Corpos de prova   | 55 |
| Figura 17 - Soquete Marshall I-2004-A   | 56 |
| Figura 18 - Máquina de ensaio CBR – Marshall Automática   | 59 |
| Figura 19 - Placas petri contendo sementes de <i>lactuca sativa</i> (alface)  | 62 |
| Figura 20 - Ensaio <i>allium cepa sp.</i> (cebola)  | 63 |
| Figura 21 - Poços da placa contendo <i>artemia sp</i>   | 64 |
| Figura 22 - Placas petri – ensaio corpo de prova ADF 10%  | 65 |
| Figura 23 - Amostras preparadas para obtenção de extrato solubilizado   | 66 |
| Figura 24 - Difração de raios-x (a) ADF moldagem; (b) ADF finos de exaustão   | 75 |
| Figura 25 - Espectro de FTIR obtido para ADF moldagem e finos de exaustão   | 76 |
| Figura 26 - Análise térmica diferencial (ATD) e análise termogravimétrica (ATG) para ADF moldagem e finos de exaustão | 77 |
| Figura 27 - Gráfico obtido na temperatura de 577°C para ADF moldagem e finos de exaustão                              | 78 |
| Figura 28 – Morfologia da ADF finos de exaustão (a) e moldagem (b)  | 80 |
| Figura 29 - Ensaio de adesividade: (a) ADF moldagem; (b) ADF finos de exaustão; (c) ADF blend e (d) referência        | 87 |
| Figura 30 - Curvas granulométricas e faixa de trabalho normativa  | 89 |
| Figura 31 - Volume de vazios (Vv) em função do teor de asfalto  | 91 |
| Figura 32 - Relação betume/vazios (RBV) em função do teor de asfalto  | 92 |
| Figura 33 - Estabilidade em função do teor de asfalto   | 93 |
| Figura 34 - Fluência em função do teor de asfalto   | 95 |
| Figura 35 - Curvas granulométricas teores de 5, 7,5, 10 e 15% de ADF e faixa de trabalho normativa                    | 97 |
| Figura 36 - Volume de vazios (Vv) em função do teor de ADF <i>blend</i>   | 98 |
| Figura 37 - Relação betume/vazios (RBV) em função do teor de ADF  | 99 |

*blend*

|   |     |
|---|-----|
| Figura 38 - Estabilidade em função do teor de ADF <i>blend</i>  | 100 |
| Figura 39 - Fluência em função do teor de ADF <i>blend</i>  | 101 |
| Figura 40 - Resistência a tração por compressão diametral em função do teor de ADF <i>blend</i>   | 102 |
| Figura 41 - Comprimento da raiz de <i>lactuca sativa</i> após exposição a solubilizados de corpo de prova 5%; corpo de prova 7,5%; corpo de prova 10%%; ADF; água mineral (CN) e corpo de prova referência (Ref)          | 104 |
| Figura 42 - Comprimento da radícula de <i>lactuca sativa</i> após exposição a solubilizados de corpo de prova 5%; corpo de prova 7,5%; corpo de prova 10%%; ADF; água mineral (CN) e corpo de prova referência (Ref)      | 104 |
| Figura 43 - Comprimento do hypocótilo de <i>lactuca sativa</i> após exposição a solubilizados de corpo de prova 5%; corpo de prova 7,5%; corpo de prova 10%%; ADF; água mineral (CN) e corpo de prova referência (Ref)    | 105 |
| Figura 44 - Germinação de sementes <i>lactuca sativa</i> (alface): (a) corpo de prova 5%; (b) corpo de prova 7,5%; (c) corpo de prova 10%%; (d) ADF; (e) água mineral e (f) corpo de prova referência                     | 105 |
| Figura 45 - Comprimento de raiz de <i>allium cepa sp.</i> (cebola) após exposição a solubilizados de corpo de prova 5%; corpo de prova 7,5%; corpo de prova 10%; ADF; água mineral (CN) e corpo de prova referência (Ref) | 106 |
| Figura 46 - Biomassa de <i>allium cepa sp.</i> (cebola) após exposição a solubilizados de corpo de prova 5%; corpo de prova 7,5%; corpo de prova 10%%; ADF; água mineral (CN) e corpo de prova referência (Ref)           | 107 |
| Figura 47 - Raízes <i>allium cepa sp.</i> (cebola): (a) corpo de prova 5%; (b) corpo de prova 7,5%; (c) corpo de prova 10%%; (d) ADF; (e) água mineral e (f) corpo de prova referência (Ref)                              | 107 |
| Figura 48 - Número de sobreviventes de <i>artemia sp.</i> após 24 h de exposição a solubilizados de corpo de prova 5%; corpo de prova 7,5%; corpo de prova 10%%; ADF; água mineral (CN) e corpo de prova referência (Ref) | 108 |
| Figura 49 - Número de sobreviventes de <i>artemia sp.</i> após 48 h de exposição a solubilizados de corpo de prova 5%; corpo de prova 7,5%; corpo de prova 10%%; ADF; água mineral (CN) e corpo de prova referência (Ref) | 109 |
| Figura 50 - Imagem de microscópio das <i>artemias sp.</i> após exposição às amotras   | 109 |
| Figura 51 - Ensaio bactérias <i>escherichia coli.</i> (a) corpo de prova 5%; (b) corpo de prova 7,5%; (c) corpo de prova 10%%; (d) ADF  | 110 |
| Figura 52 - Ensaio bactérias <i>staphylococcus aureus.</i> (a) corpo de prova 5%; (b) corpo de prova 7,5%; (c) corpo de prova 10%; (d) ADF  | 111 |

## LISTA DE TABELAS

|   |     |
|---|-----|
| Tabela 1 - Especificações dos cimentos asfálticos de petróleo (CAP) classificação por penetração        | 35  |
| Tabela 2 - Solução de carbonato de sódio  | 50  |
| Tabela 3 - Indicação da adesividade em função das soluções de carbonato de sódio                        | 51  |
| Tabela 4 - Composição da mistura  | 53  |
| Tabela 5 - Características físico-químicas  | 67  |
| Tabela 6 - Massa bruta – reatividade  | 67  |
| Tabela 7 - Massa bruta – corrosividade  | 68  |
| Tabela 8 - Lixiviação de elementos inorgânicos  | 69  |
| Tabela 9 - Dados do ensaio de lixiviação  | 70  |
| Tabela 10 - Ensaio de solubilização   | 71  |
| Tabela 11 - Dados da solubilização  | 72  |
| Tabela 12 - Determinação da análise química por FRX   | 73  |
| Tabela 13 - Análise granulométrica ADF moldagem e finos de exaustão                                     | 79  |
| Tabela 14 - Densidade real ADF moldagem e finos de exaustão   | 81  |
| Tabela 15 - Boletim de desempenho – geração por classe de resíduos sólidos ano 2021                     | 82  |
| Tabela 16 - Boletim de desempenho – destinação de resíduos ano 2021                                     | 82  |
| Tabela 17 - Custos de destinação de ADF   | 83  |
| Tabela 18 - Indicação da adesividade em função das soluções de carbonato de sódio                       | 86  |
| Tabela 19 – Quantidade de alumínio e ferro para amostra de corpo de prova <i>blend</i> 10% e referência | 112 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|          |   |
|----------|---|
| ABIFA    | Associação Brasileira de Fundação                       |
| ABNT     | Associação Brasileira de Normas Técnicas                |
| ADF      | Areia Descartada de Fundação                            |
| AMESC    | Associação dos Municípios do Extremo Sul Catarinense    |
| AMREC    | Associação dos Municípios da Região Carbonífera         |
| AMUREL   | Associação Municípios Região de Laguna                  |
| ASTM     | American Society for Testing and Materials              |
| AVF      | Areia Verde de Fundação                                 |
| CAP      | Cimento Asfáltico de Petróleo                           |
| CBUQ     | Concreto Betuminoso Usinado a Quente                    |
| CETESB   | Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental         |
| CERTEC   | Laboratório de Cerâmica Técnica                         |
| CONSEMA  | Conselho Estadual do Meio Ambiente                      |
| CONTRAN  | Conselho Nacional de Trânsito                           |
| CTB      | Código de Trânsito Brasileiro                           |
| DNER     | Departamento Nacional de Estradas de Rodagem            |
| DNIT     | Departamento Nacional de Infraestruturas de Transportes |
| DRX      | Difração de Raio X                                      |
| ES       | Especificação de Serviço                                |
| FHWA     | Federal Highway Administration                          |
| FRX      | Fluorescência de Raio X                                 |
| IBGE     | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística         |
| IMA      | Instituto do Meio Ambiente                              |
| I.Parque | Parque Científico e Tecnológico                         |
| SENAI    | Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial             |
| UFSC     | Universidade Federal de Santa Catarina                  |
| UFRGS    | Universidade Federal do Rio Grande do Sul               |
| UNESC    | Universidade do Extremo Sul Catarinense                 |

## SUMÁRIO

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO</b> .....  | <b>17</b> |
| <b>2. OBJETIVOS</b> .....   | <b>21</b> |
| 2.1. OBJETIVO GERAL .....   | 21        |
| 2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....  | 21        |
| <b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....   | <b>22</b> |
| 3.1. PROCESSO DE FUNDIÇÃO .....   | 22        |
| <b>3.1.1. Resíduos Sólidos Gerados no Processo de Fundição</b> .....                        | <b>25</b> |
| <b>3.1.2 Areia de Moldagem</b> .....  | <b>26</b> |
| <b>3.1.3 Classificação da Areia de Fundição</b> .....                                       | <b>29</b> |
| <b>3.1.4 Aspectos Ambientais</b> .....  | <b>30</b> |
| 3.2 MODALIDADES E CONSTITUIÇÃO DE PAVIMENTOS.....   | 31        |
| <b>3.2.1. Conceito de Pavimento</b> .....   | <b>31</b> |
| <b>3.2.2. Classificação dos Pavimentos</b> .....  | <b>34</b> |
| <b>3.2.3. Classificação dos Revestimentos</b> .....   | <b>34</b> |
| 3.3 NORMAS E LEGISLAÇÕES APLICADAS .....  | 38        |
| <b>4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL</b> .....  | <b>40</b> |
| 4.1 MATERIAIS .....   | 40        |
| <b>4.1.1 Amostragem dos Materiais</b> .....   | <b>41</b> |
| 4.2 MÉTODOS .....   | 45        |
| <b>4.2.1 Classificação da Areia Descartada de Fundição - ADF</b> .....                      | <b>46</b> |
| <b>4.2.2 Caracterização da Areia Descartada de Fundição - ADF</b> .....                     | <b>47</b> |
| <b>4.2.3 Dados de Geração, Viabilidade e Custos de Descarte em Aterros Sanitários</b> ..... | <b>51</b> |
| <b>4.2.4 Potencialidades da areia de fundição para utilização em massa asfáltica</b>        | <b>51</b> |
| <b>4.2.5 Obtenção e caracterização dos corpos de prova</b> .....                            | <b>56</b> |

|  |            |
|--|------------|
| <b>4.2.6 Propriedades mecânicas .....</b>  | <b>62</b>  |
| <b>4.2.7 Ensaio de Ecotoxicidade .....</b>   | <b>63</b>  |
| <b>5 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>   | <b>69</b>  |
| 5.1 CLASSIFICAÇÃO DA AREIA DESCARTADA DE FUNDIÇÃO - ADF .....                          | 69         |
| <b>5.1.1 Análise de Caracterização de Resíduo Sólido ABNT NBR10004:2004 .....</b>      | <b>69</b>  |
| 5.2 CARACTERIZAÇÃO DA AREIA DESCARTADA DE FUNDIÇÃO - ADF .....                         | 74         |
| <b>5.2.1 Análise Química: Fluorescência de Raios X .....</b>                           | <b>74</b>  |
| <b>5.2.2 Fases cristalinas presentes: Difração de Raios X .....</b>                    | <b>76</b>  |
| <b>5.2.3 FTIR .....</b>  | <b>77</b>  |
| <b>5.2.4 Análise Térmica (ATD/TGA) .....</b>   | <b>78</b>  |
| <b>5.2.5 Análise granulométrica .....</b>  | <b>81</b>  |
| <b>5.2.6 Análise Morfológica .....</b>   | <b>82</b>  |
| <b>5.2.7 Densidade Real .....</b>  | <b>83</b>  |
| 5.3 DADOS DE PRODUÇÃO, VIABILIDADE E CUSTOS DE DESCARTE EM<br>ATERROS SANITÁRIOS ..... | 83         |
| 5.4 POTENCIALIDADES DA ADF PARA UTILIZAÇÃO EM MASSA ASFÁLTICA....                      | 87         |
| <b>5.4.1 Adesividade .....</b>   | <b>87</b>  |
| <b>5.4.2 Granulometria .....</b>   | <b>89</b>  |
| 5.5 OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA .....                                | 91         |
| <b>5.5.1 Definição do teor de CAP .....</b>  | <b>91</b>  |
| <b>5.5.2 Influência da quantidade de substituição de ADF .....</b>                     | <b>98</b>  |
| <b>6 CONCLUSÃO .....</b>   | <b>115</b> |
| <b>7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>  | <b>116</b> |
| <b>8 REFERÊNCIAS .....</b>   | <b>117</b> |

## 1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento da ciência e engenharia materiais, apesar do grande avanço nos últimos anos, enfrenta ainda desafios tecnológicos principalmente no desenvolvimento de materiais de elevado desempenho, aliado ao atendimento dos requisitos ambientais. Além disso, alguns outros critérios devem ser considerados para o desenvolvimento de produtos comercializáveis, como o critério de natureza econômica, que embora não esteja diretamente relacionado com princípios científicos, determinará o grau de competitividade comercial de determinado produto (CALLISTER, 2016).

O segmento de fundição de metais representa uma parcela importante na cadeia produtiva dos processos industriais no país e no mundo (ABIFA, 2020). Embora haja frequentes avanços tecnológicos nos processos produtivos, que os tornam cada vez mais eficientes, restam ainda grandes desafios que devem ser superados neste setor. A destinação dos resíduos provenientes do processo e busca por alternativas para reduzir os custos com descarte apropriado da areia de fundição (ADF) e, sobretudo, minimizar os impactos ambientais causados, ocupam boa parcela desses desafios para o processo.

Nos processos de fundição e solidificação de peças de metal, se faz necessário formar a peça utilizando-se um molde no qual o metal líquido é “vazado”, solidificando-o e fazendo com que a peça tome as dimensões do molde. Existem muitas formas de se produzir um molde de fundição. Os moldes, em geral, são formados de materiais capazes de suportar as altas temperaturas de fusão das ligas metálicas. As areias são os materiais comumente mais utilizadas para esse processo, que são os chamados moldes refratários. Após a solidificação da composição metálica fundida, os moldes são “quebrados” para a retirada da peça (TÂMEGA, 2017).

As várias técnicas de fundição incluem uma diversidade de materiais bem interessante, do ponto de vista tecnológico, para a produção dos moldes, tais como: cera perdida, fundição por espuma perdida, fundição em coquilha e fundição em areia (TÂMEGA, 2017).

A ADF, utilizada no processo para a confecção de moldes de peças metálicas, é composta de areia virgem e aglomerantes (catalisadores e resinas) necessários para conferir forma e estabilidade às dimensões desejadas ao produto.

Muito embora parte dessa ADF já utilizada seja reaproveitada no próprio processo, aproximadamente 10% é descartada em aterros sanitários, legalmente aptos para essa finalidade e, na pior das hipóteses, em aterros irregulares perante os órgãos ambientais competentes. Tais condições podem gerar impactos ambientais, tornando o processo oneroso para a empresa, prejudicial ao meio ambiente e pouco eficiente do ponto de vista tecnológico (TÂMEGA, 2017).

A moldagem realizada com a utilização de areia, embora seja uma técnica muito antiga, ainda é largamente utilizada nos processos produtivos de fundição de metais (NETO, 2004). Alguns fatores contribuem para que a moldagem com areia esteja tão presente nesse processo, tais como: viabilidade econômica, boa qualidade de acabamento e estabilidade dimensional e uma boa sincronia no processo seriado de fusão e moldagem. Entretanto, o volume de resíduo gerado é expressivo (NETO, 2004).

Em todo o mundo, aproximadamente 15 bilhões de toneladas de matérias-primas são extraídas da Terra a cada ano, sendo algumas renováveis e outras não. Como a Terra é um “sistema fechado” em relação aos materiais constituintes, os recursos devem ser finitos. Dessa forma, esses recursos disponíveis devem ter maior atenção quando se trata de efetividade de sua utilização com relação ao ciclo dos materiais. Além disso, com relação ao custo final de qualquer produto, há a relação direta com o problema ambiental gerado no seu processo de fabricação. Por conta disso, a definição de custo está associada com a totalidade do ciclo de vida e todos os fatores relevantes (incluindo o descarte e as questões relacionadas com o impacto ambiental) (CALLISTER, 2016).

Nesse contexto, a economia circular pode ser uma alternativa viável, quando se avança a possibilidade de reutilização de resíduo de areia de fundição em um novo modelo de negócio, otimizando o processo e diminuindo a dependência por matéria-prima virgem. Esse conceito é pautado pela priorização de uso de insumos mais duráveis, renováveis e recicláveis.

Estudos e pesquisas de empresas e universidades nacionais e internacionais têm mostrado algumas alternativas para a reutilização dos resíduos de areia descartada de fundição, como a incorporação em blocos de concreto (NETO, 2004), fabricação de vidros (MAIA, 2017), blocos cerâmicos (BIOLO, 2005) e concreto não estrutural (NETO, 2004).

Segundo Biolo (2005), aplicações na indústria comprovaram que é possível reutilizar a areia de fundição em produtos de cerâmica vermelha produzidos com até 10% de areia de fundição com relação à geometria, absorção de água e resistência mecânica. Isso, de acordo com as normas vigentes para construção civil, o que permite a sua comercialização. Além disso, as análises de laboratório revelaram dosagens de 5 a 10% de areia de fundição, como sendo condições com a melhor resistência mecânica.

Na reutilização de areia descartada de fundição na produção de vidros, não há a necessidade de alteração na granulometria das partículas, uma vez que se apresentam adequadas em seu estado original. Além disso, as propriedades do produto são similares aos vidros comerciais, sendo a cor e a transparência os principais fatores de diferenciação dos vidros produzidos com ADF e os comerciais. Tal condição é provocada pela presença do óxido de ferro nas matérias-primas (MAIA, 2017).

Segundo Siroma (2018), misturas asfálticas com ADF apresentaram resultados aceitáveis para os limites normativos franceses para aplicação, sem apresentar deformações excessivas submetidas a determinado tráfego.

Neto (2004) concluiu, por meio de avaliação das propriedades mecânicas de interesse para a pavimentação e de ensaios para classificação ambiental da mistura asfáltica, que a reutilização da areia de fundição como agregado em misturas para pavimentação asfáltica é viável.

Dentre vários trabalhos demonstrados na literatura, um estudo de grande relevância é o de Partridge et al. (1999) sobre a reutilização de ADF, em Indiana nos Estados Unidos, para construção de aterro de rodovias. No ano de 1996 foi construído, também em Indiana, por meio de uma parceria entre Departamento de Transportes de Indiana e a Universidade de Purdue, um aterro rodoviário com a utilização de ADF de origem ferrosa, sendo que no período de 1994 a 1998 houve o monitoramento ambiental. A conclusão do monitoramento deu conta de que não houve prejuízo ao meio ambiente. Outras pesquisas foram desenvolvidas por Javed e Lovell (1995), com aplicações em aterro e subleito de rodovias, revelaram também bons resultados de propriedades físicas e mecânicas, sobretudo o baixo potencial de contaminação ao meio ambiente (NETO, 2004).

Há muitos anos, a utilização da areia de fundição em asfalto é praticada em países como Estados Unidos, Alemanha, Japão, Austrália, dentre outros. Não apenas como agregado em CBUQ, mas também em cobertura de aterros industriais, base e cobertura para tubulação de esgoto. Nesses países, as pesquisas e desenvolvimento tecnológico, bem como a consciência ambiental e necessidade de se manter as atividades industriais com sustentabilidade, acabam por vencer possíveis barreiras legais que poderiam impedir o reaproveitamento desse resíduo. Por conta dessas barreiras, no Brasil, muitas limitações são impostas, o que, por vezes, acaba por inviabilizar projetos que poderiam trazer inúmeros benefícios (NETO, 2004).

Vale salientar que os Estados Unidos são um bom exemplo de produção de fundidos. Cerca 90% de todo produto manufaturado contém algum tipo de material fundido. Esse país é o terceiro maior produtor mundial (10,7 milhões t em 2018), atrás da China (49,3 milhões t) e Índia (13,3 milhões t). Neste mesmo ano, o Brasil ocupou a nona posição do *ranking* mundial, com 2,2 milhões t. Em 2018, a produção mundial de fundidos somou 112,7 milhões de t. No total, 11 (onze) países detiveram 90% desta fatia (ABIFA, 2020).

Todavia, apesar dos esforços, percebe-se que atualmente, principalmente no Brasil, ainda não há um destino real para ADF a não ser aterros sanitários. Considerando os aspectos expostos acima, nesta pesquisa de dissertação de mestrado será utilizada a areia de fundição proveniente do processo de moldagem *cold-box* (cura a frio) como um agregado em massa asfáltica do tipo concreto betuminoso usinado a quente. O diferencial do trabalho perante outros já existentes foi um amplo estudo de viabilidade técnica e ambiental, utilizando critérios de classificação, potencialidades, quantidades geradas de resíduos, viabilidade e aplicabilidade.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1. OBJETIVO GERAL

Investigar o potencial de utilização de areia descartada de fundição – ADF proveniente do processo de moldagem *cold-box* e de finos de exaustão, incorporadas em substituição parcial ao agregado pó de pedra, em massa asfáltica tipo concreto betuminoso usinado a quente – CBUQ.

### 2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Conhecer as características das areias de fundição do processo de moldagem e finos de exaustão, por meio do uso de diversos ensaios de caracterização, incluindo análises química, física e térmica para identificação do potencial de valorização deste material na forma como é gerado;
- Investigar a influência dos diferentes tipos de areia de fundição (moldagem e exaustão e uma mistura (*blend*) das duas areias) nas propriedades tecnológicas do asfalto (volume de vazios, relação betume/vazios, estabilidade, fluência, resistência à tração por compressão diametral) produzido;
- Determinar a quantidade e tipo de areia de fundição viáveis para uso em massa asfáltica do tipo concreto betuminoso usinado a quente;
- Avaliar a ecotoxicidade da areia de fundição em massa asfáltica do tipo concreto betuminoso usinado a quente.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1. PROCESSO DE FUNDIÇÃO

Um dos processos mais tradicionais utilizados em peças fundidas é o de moldes de areia. Esse processo consiste em inserir o modelo na areia para obter a forma da peça a ser fundida no molde. O processo de moldagem em areia é composto por uma variedade de métodos, dentre eles pode-se citar o processo de moldagem em areia com argila, ligantes químicos, *shell molding* e *cold box* (BALDAM. VIEIRA, 2014).

O estudo da fundição inicia com o molde. Esse contém uma cavidade cuja dimensões geométricas definem a forma da peça fundida. As dimensões reais da cavidade devem ser ligeiramente superdimensionadas, observadas a contração do material, a fim de permitir o encolhimento do metal durante a resfriamento e solidificação. Considerando que metais diferentes correspondem comportamentos diferentes quanto a contração, a cavidade do molde deve ser projetada para o metal específico, quando a precisão dimensional for criticamente importante (GROOVER, 2014).

Os moldes podem ser constituídos de vários tipos de materiais, incluindo areia, gesso, cerâmica e metal. Os processos de fundição são classificados frequentemente em função desses diferentes tipos de moldes (GROOVER, 2014).

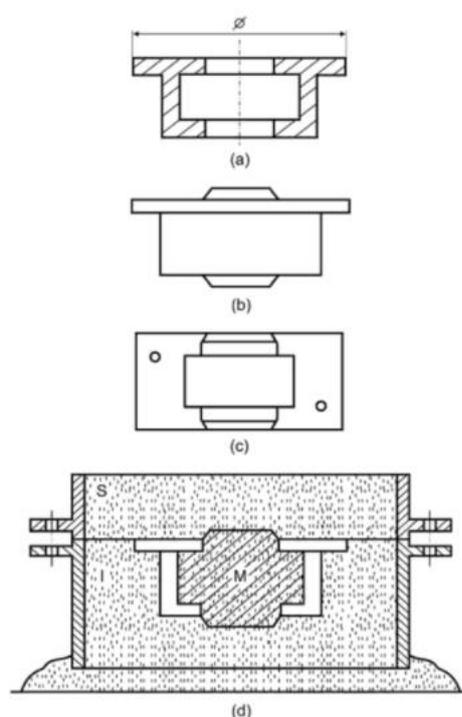
A areia e o metal são os principais materiais utilizados na fabricação de moldes de fundição, sendo os moldes metálicos utilizados na fundição sob pressão e em fundição em coquilha. Os constituídos em base de areia representam a grande maioria, podendo ser por meio da moldação manual ou mecanizada (BALDAM. VIEIRA, 2014).

Uma areia de moldação é constituída, essencialmente, por grãos refratários da areia-base e por aglomerante. Há variedades tanto para areia-base como para o aglomerante. O macho é o elemento do molde fabricado separadamente e colocado em sua cavidade após a extração do modelo para (BALDAM. VIEIRA, 2014).:

- Obter, de maneira mais econômica, formas internas ou externas de uma peça;
- Facilitar a construção do modelo.

A Figura 1 (a) revela uma peça com uma forma interna com diâmetro variável. Para facilitar a moldagem da peça, utiliza-se um modelo, Figura 1 (b), para obtenção da forma geral da cavidade do molde, na qual é posicionado o macho, preparado numa caixa de macho, Figura 1 (c), paralelamente à confecção do molde, Figura 1 (d) (BALDAM & VIEIRA, 2014).

Figura 1 – Molde, peça e modelo e macho. Peça a ser fundida (a), modelo com marcação de macho (b), caixa de macho (c), molde com macho (d) e macho (m).



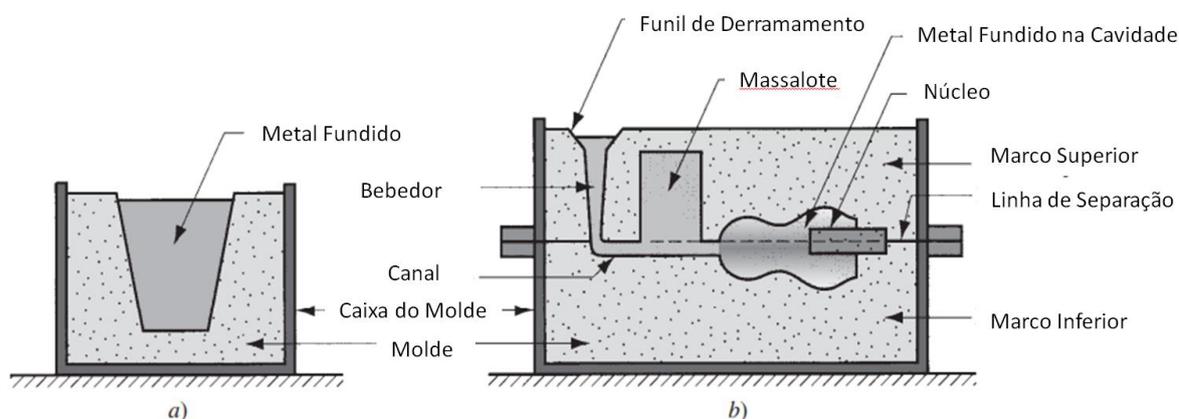
FONTE: (BALDAM & VIEIRA, 2014).

O macho pode ser constituído de diferentes tipos de areia. Essas podem ser classificadas de forma diferentes, que irá depender do tipo de processo usado para sua aglomeração. São comumente utilizados dois tipos, as constituídas por grãos de areia silicosa e que podem ser aglomeradas com silicato de sódio mais aplicação de gás carbônico, ou a aglomeração por resinas de cura a frio (BALDAM & VIEIRA, 2014).

Para realizar a operação de fusão do metal, esse é primeiro aquecido até a temperatura de fusão que transforma seu estado físico de sólido para completamente no estado líquido (temperatura de fusão). Em seguida, é “vazado” para a cavidade do molde (GROOVER, 2014).

Em um molde aberto (Figura 2 (a)), o metal líquido é simplesmente derramado até preencher a cavidade aberta. Em um molde fechado (Figura 2 (b)) a passagem chamada sistema de passagem, que permite que o metal fundido flua de fora do molde até a cavidade (GROOVER, 2014).

Figura 2 - Formas de molde: a) molde aberto é apenas um recipiente com a forma da peça desejada e b) molde fechado, em que a forma do molde é mais complexa e requer um sistema de passagem (passagem) que leva a cavidade.



FONTE: (GROOVER, 2014).

A confecção do modelo ou modelação é uma etapa caracterizada pela reprodução (réplica) da peça que deve ser produzida conforme projeto. Por conta do resfriamento e solidificação há diferenças dimensionais (contração) que ocorrem durante o esse processo e que devem ser consideradas na produção dos modelos de forma a compensar essas diferenças.

A moldagem, basicamente, pode ser entendida como uma cavidade, geralmente formada por areia e ligantes, que deverá posteriormente ser preenchida com metal líquido envasado por “panelas” intermediárias.

Os machos são insertos refratários que possuem a geometria dos vazios internos da peça fundida requerida.

A fusão do metal é compreendida como a passagem do estado sólido para o líquido, possível pela elevação de temperatura a níveis de aproximadamente 1500 °C, obtido em fornos específicos. Além disso, nesse processo, há a preparação do metal líquido com as devidas correções de composição da liga conforme requerido em projeto para que, posteriormente, seja possível o envase nos moldes.

Segundo Neto (2004), a fusão é caracterizada pela etapa que determina a quantidade de material metálico fundido. A fusão ocorre em um forno com revestimento refratário em temperaturas necessárias adequadas aos materiais a serem fundidos.

Antes do envase os parâmetros especificados devem ser verificados (controle de qualidade). O material deve conter a composição adequada prevista em projeto, temperatura dentro de limites de aceitação, nível de impurezas abaixo dos limites aceitáveis e a temperatura de envase de 100 a 300 °C acima do início da solidificação (NETO, 2004).

O vazamento do metal líquido para os moldes ocorre, geralmente, por “painéis” intermediárias chamadas de “painéis” e “painelinhos”. O metal líquido quando atinge o ponto adequado de preparação é envasado para essas “painéis” de forma que seja possível então a transferência para os moldes. Esse cascadeamento gradual é necessário, geralmente, por conta dos grandes volumes contínuos nos fornos (1 t, 2 t, 5 t), o que torna importante a transferência para os recipientes menores (painéis) e o envase aos moldes.

Na etapa subsequente ao vazamento, ocorre o início do resfriamento e solidificação de forma gradual e controlada que dependerá do tipo de metal, peças e moldes. Nessa etapa o metal adquire estabilidade dimensional e poderá ser separado do molde.

A temperatura para retirada da peça solidificada do molde deve ser aquela que permita a manipulação das peças. A retirada ou quebra do molde pode ocorrer de forma manual ou mecânica, dependendo do processo.

Com a peça “bruta” então é necessário realizar a limpeza e retirada de canais e rebarbas, que comumente é chamada de rebarbação. Essa etapa é necessária para que seja possível a execução das etapas seguintes, como a usinagem e tratamentos térmicos.

### **3.1.1. Resíduos Sólidos Gerados No Processo de Fundição**

As atividades industriais geram resíduos que podem apresentar potenciais diferentes com relação a custos de tratamento e destinação. Nesse sentido, a principal problemática das empresas está concentrada na busca por meios

(processos) cada vez mais adequados de produção, quanto ao aspecto ambiental e financeiro (BONET, 2002).

A geração de resíduos é inerente, em grande maioria, aos processos industriais, sendo que um modelo ideal para as atividades industriais de transformação seria a emissão zero de resíduos. Infelizmente isso representa uma realidade ainda muito distante, e atualmente há um número muito pequeno de indústrias que atuam com emissão zero de resíduos (BONET, 2002).

Algumas outras formas de atenuar os impactos relacionados está na possibilidade de redução dos resíduos gerados, por meio do emprego tecnologias “limpas”, atuando no sentido de aprimorar os processos produtivos. Além da redução, outra possibilidade é a recuperação e reciclagem dos resíduos gerados, utilizando em outros processos produtivos (BONET, 2002).

Nesse sentido, segundo dados da ABIFA (2022), o Brasil fechou sua produção de fundidos em 2021 totalizando mais de 2,7 milhões t. Somente na região sul do país mais de 1,2 milhão de toneladas foi produzido de janeiro a dezembro de 2021.

Considerando que para cada tonelada de metal fundido é gerado a mesma quantidade de areia descartada de fundição, o volume apresenta números expressivos de geração de resíduos sólidos provenientes de seu processo produtivo.

O processo de confecção de moldes e machos ainda é o responsável pela maior contribuição na geração de resíduos sólidos. Durante a produção dos machos e moldes há um grande excedente de areia utilizada no processo. Embora haja a reutilização de grande parte dessa areia de fundição, com o retorno ao processo, ainda assim há a geração de um expressivo volume de resíduos sólidos que são destinados em aterros industriais. Há uma relação entre produção e geração que uma tonelada de areia é necessária para cada tonelada de ferro ou aço produzido (WINKLER & BOLSHAKOV, 2000 apud CHEGATTI, 2004).

### **3.1.2 Areia de Moldagem**

Areia de moldagem constituída basicamente de um elemento granular refratário e aglomerante. Algumas propriedades são necessárias para a areia de moldagem: elevada refratariedade, boa resistência mecânica, permeabilidade

adequada e plasticidade. Entretanto, as areias destinadas à fabricação de machos, além dos requisitos exigidos para a areia de moldagem, devem dispor de boa colapsibilidade. Essa propriedade é definida como sendo capacidade de perder resistência após o início do resfriamento e solidificação da peça (SOARES, 2000 apud BALDAM & VIEIRA, 2014)

Segundo Baldam e Vieira (2014), a classificação das areias de moldagem ocorre da seguinte forma:

- Origem: natural, semissintética ou sintética;
- Uso: nova ou reciclada. As fundições que trabalham basicamente com areia usada (reciclada) utilizam cerca de 10% de areia nova para recompor as perdas durante a reciclagem e manter as propriedades da areia estáveis. Na areia reciclada, são usadas pequenas quantidades de aglomerantes e água;
- Emprego: areia de moldagem (faceamento ou enchimento) e areia de macho;
- Estado de umidade: úmida (verde) ou seca (estufada).

Quanto aos componentes presentes na areia de moldagem, segundo (BALDAM & VIEIRA, 2014):

- **Areia-base: pode ser silicosa e não silicosa**

**Silicosa:** a areia-base é refratária, normalmente silicosa. Se a origem for de areia de praia deverá ser lavada previamente para a remoção dos sais. A dilatação térmica a reatividade com o metal fundido é afetada pela composição química da areia-base, mas principalmente a refratariedade do molde. Esta última propriedade é de suma importância na fundição do aço.

A penetração metálica é afetada pela granulometria da areia-base. Quanto maior for o diâmetro destes mais permeáveis, maior será os grãos de areia facilitando a saída de gases. Contudo, maior será a penetração metálica, implicando num acabamento de má qualidade.

**Não silicosa:** a areia de base não silicosa parte da consideração de que a areia silicosa apresenta desvantagens em relação às não silicosas, como a elevada reatividade com o metal fundido e a elevada expansão volumétrica. Das areias não silicosas, pode-se citar a zirconita (ideal em propriedades, porém com elevado

custo), a cromita, que apresenta maior capacidade de troca de calor do que a areia comum. Outras como olivine e chamote também são usadas.

- **Aglomerantes**

São materiais ligantes, que envolvem e ligam entre si os grãos, conferindo, após compactação, secagem ou reação química às características necessárias ao processo de moldagem, ou seja, resistência às solidificações dinâmicas, estáticas e térmicas, provocadas pelo metal fundido. Considerando um dado aglomerante, com o aumento do seu teor, poderá reforçar a resistência, a dureza e diminuir a permeabilidade. Os aglomerantes se subdividem em:

**Orgânicos:** a resistência do molde é obtida por meio de uma leve compactação seguida de secagem em estufa. A resistência final dos aglomerantes orgânicos pode ser maior que a alcançada com inorgânicos. Com o advento das resinas sintéticas (aglomerantes sintéticos) os orgânicos naturais caíram em desuso. Exemplo: melado de cana, amido de milho, óleos, etc...

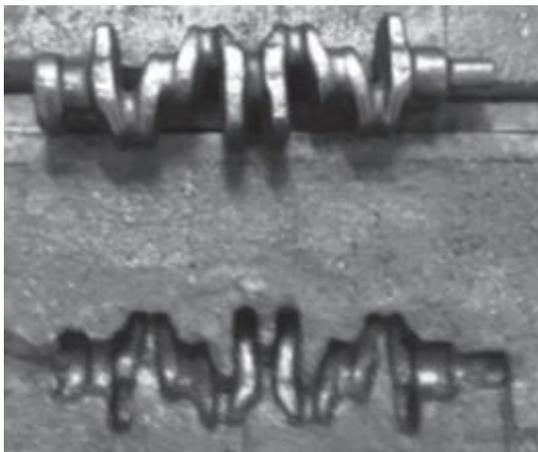
**Inorgânicos:** a resistência é obtida por meio de secagem. Os aglomerantes inorgânicos tendem a sinterizar quando entram em contato com o metal fundido, o que dificulta a desmoldagem. São elas argila (normalmente, bentonitas), silicato de sódio e cimento.

**Aglomerantes sintéticos:** são as resinas que conferem excelente resistência associada a uma boa colapsibilidade e capacidade de fabricar seções finas, compensando o custo elevado desse insumo.

Segundo Tâmega (2017), os processos de fundição em moldes refratários constituídos de areia de base, elementos ligantes e aglomerantes são divididos em:

- Areia a verde (Figura 3): a umidade do molde não é retirada por aquecimento ou outros meios, sendo que a areia é utilizada em temperatura ambiente, após a confecção do molde.
- Areia seca: o molde é levado à secagem por meio de processos de aquecimento (estufagem) ou outros processos de cura, como exemplo por meio da injeção de CO<sup>2</sup>.

Figura 3 – Imagem de um molde de areia verde.



FONTE: (TÂMEGA, 2017)

### 3.1.3 Classificação da Areia de Fundição

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas ABNT NBR 10.004/2004 a classificação de resíduos sólidos aborda a identificação do processo ou atividade que originou o resíduo sólido, dos constituintes e características, e ainda o comparativo dos constituintes com uma relação de resíduos e substâncias cujo impacto à saúde e ao meio ambiente já é conhecido. Esses resíduos sólidos são caracterizados por materiais que se encontram em estado sólido ou semissólido, resultantes de atividades industriais, domésticas, hospitalares, comerciais, agrícolas e de varrição.

A classificação pela Associação Brasileira de Normas Técnicas ABNT NBR 10.004/2004 é dividida em:

- resíduos classe I - Perigosos;
- resíduos classe II – Não perigosos;
  - resíduos classe II A – Não inertes. – Resíduos classe II B – Inertes.

A ABNT exige que sejam realizados testes para caracterizar a fase móvel de um resíduo sólido. São os ensaios de lixiviação da NBR 10.005 e o teste de solubilização, NBR 10.006, e correlaciona os valores encontrados com a norma de classificação de resíduos sólidos NBR 10.004. Ainda de acordo com essas normas, a lixiviação determina a capacidade de transferência de substâncias orgânicas e

inorgânicas presentes no resíduo que se desenvolve quando um sólido (resíduo) em contato com um líquido, em meio ácido, produz uma transferência de componentes do sólido para o líquido. Já a solubilização é um processo pelo qual uma substância ou um produto pode se dissolver em um líquido. Ambos os testes simulam as condições encontradas em aterros contendo ácidos orgânicos;

Assim, a partir da análise extrato lixiviado, pode-se determinar se o resíduo é perigoso. O ensaio de solubilização é usado para classificar o resíduo entre inerte (Classe IIA) e não inerte (Classe IIB).

Normalmente as areias de fundição são classificadas como “Resíduos Não-Perigosos e não Inertes” (Classe IIA). Entretanto, as areias podem conter quantidades elevadas de resinas fenólicas fazendo com que o resíduo, em alguns casos, seja classificado como resíduo “Perigoso” (Classe I). Este fato reforça ainda mais a importância de classificação periódica e das areias de diferentes processos dentro de uma empresa de fundição.

#### **3.1.4 Aspectos Ambientais**

Os processos de fundição de ferro e aço que utilizam areia para moldagem, assim como todos os processos que resultam na geração de resíduos industriais, devem priorizar a busca por alternativas eficazes de minimização dos impactos ambientais por meio de melhorias nos seus processos produtivos. O atendimento as exigências ambientais transcendem a obrigatoriedade legal, sobretudo, deve fazer parte das políticas da empresa relacionadas ao meio ambiente. As boas práticas são observadas pelos órgãos ambientais, sociedade e, em situações cada dia mais presentes, por clientes e fornecedores que avaliam esses aspectos quando da escolha pela empresa.

“As organizações de um modo geral não podem mais desconsiderar os aspectos relacionados à proteção ao meio ambiente. Diante disso, a variável ambiental vem se tornando mais um importante diferencial competitivo com o qual as empresas devem se preocupar” (LERÍPIO, 2001 apud NETO, 2004).

Segundo Lerípio apud Neto (2004), a utilização dos recursos naturais de forma racional e a minimização de desperdícios devem ser palavras de ordem para a garantia de sustentabilidade das organizações. A ineficiência dos processos

produtivos pode ser representada pela forma de poluição gerada, dessa forma, as oportunidades de agregar valor à organização estão aliadas as melhorias de processo com a implementação de formas mais sustentáveis de produção, incluindo o correto gerenciamento dos resíduos.

Segundo Neto (2004) a deposição de resíduos sólidos originados no processo produzido de fundição, principalmente quando é realizada em regiões povoadas, pode representar um potencial de risco elevado devido a presença de substâncias nocivas. Além disso, o impacto financeiro para as organizações relacionado a destinação desses resíduos em aterros sanitários é extremamente oneroso.

Quanto ao descarte incorreto destas areias no meio ambiente, o maior prejuízo talvez ocorra nos sistemas públicos de abastecimento de água, em que traços de compostos fenólicos (usualmente  $< 1,0 \text{ mgL}^{-1}$ ) afetam as propriedades organolépticas da água para consumo humano (MAIA, 2017). Os fenóis, mesmo em baixas concentrações, são nocivos, principalmente quando em contato com a água que foi submetida a cloração, como é o caso da água de abastecimento, podendo originar compostos fenólicos clorados de elevada toxicidade. Além disso, em concentrações mais elevadas, compostos fenólicos causam efeito destrutivo sobre a flora e fauna aquática devido ao seu potencial tóxico e a alta demanda de oxigênio.

Enquanto as análises químicas identificam e quantificam as concentrações das dos elementos químicos que podem ser tóxicos, testes de toxicidade também podem ser utilizados visando conseguir uma indicação sobre o efeito tóxico da totalidade das substâncias contidas nos efluentes sobre os sistemas biológicos.

## 3.2 MODALIDADES E CONSTITUIÇÃO DE PAVIMENTOS

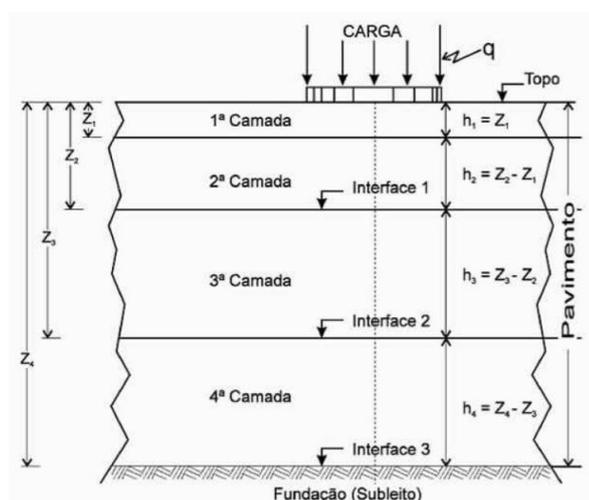
### 3.2.1. Conceito de Pavimento

Por uma questão de ordem técnico-econômica, o pavimento é a resultante da estruturação de várias camadas de diferentes materiais, que possuem propriedades muitas vezes distintas, como a resistência e deformação. Dessa forma, há um grau de complexidade considerável quando tratamos do comportamento dessas camadas de materiais distintos sob a aplicação de cargas aplicadas pelo tráfego de veículos (Manual de Pavimentação DNIT, 2006).

Segundo Senço (2008), o pavimento pode ser definido como uma estrutura construída sobre uma base previamente preparada (terraplanagem) e com destinação técnica e econômica, de modo a atender aos seguintes requisitos:

- ser resistente e distribuir os esforços resultantes do tráfego;
- permitir melhores condições de conforto e segurança;
- ser resistente ao desgaste (durável), oriundo de esforços horizontais resistir aos esforços horizontais.

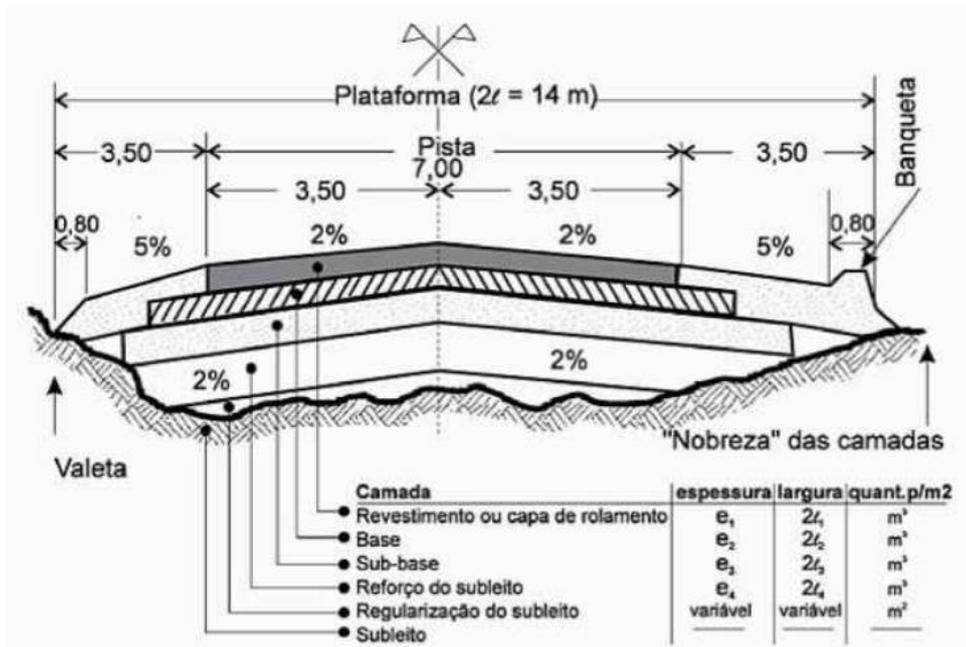
Figura 4 – Sistema de várias camadas.



FONTE: (SENÇO, 2008)

Conforme Figura 4, o pavimento é um sistema de várias camadas com espessuras finitas que se assenta sobre um semiespaço infinito. O subleito tem a função de fundação estrutural do pavimento (SENÇO, 2008).

Figura 5 – Seção transversal típica – pavimento flexível



FONTE: (SENÇO, 2008)

Segundo Senço (2008) a regularização do subleito (Figura 5) é a camada de espessura irregular, fica logo acima do subleito e tem o principal objetivo de conformação, tanto longitudinal como transversal.

O reforço do subleito é uma camada construída, se necessário, acima da regularização do subleito. Possui espessura constante e características tecnológicas inferiores a regularização da camada superior (sub-base). Por conta da denominação (reforço do subleito) é comumente associada a camadas de fundação. Entretanto, tal camada é parte integrante do pavimento, servindo como complemento da camada acima, a sub-base (SENÇO, 2008).

A sub-base é uma camada complementar a base. Essa é empregada quando, por questões técnicas e econômicas, não for recomendado a aplicação direta da base sobre a camada de regularização ou reforço do subleito (SENÇO, 2008).

A base é uma camada que tem o objetivo de suportar as tensões pelo carregamento aplicado, originado pelo tráfego de veículos. Segundo Senço (2008), o pavimento pode ser considerado como sendo constituído de base e revestimento, com a complementação podendo ser realizada pela sub-base e reforço do subleito.

O revestimento ou capa de rolamento, por sua vez, é a camada do pavimento asfáltico que sofre à ação direta da tensão decorrente do carregamento aplicado

(tráfego). Tem o objetivo de suportar tais tensões, atendendo as necessidades de durabilidade da estrutura, e melhorar as condições de conforto e segurança. Deve possuir propriedades impermeabilizantes tanto quanto possível (SENÇO, 2008).

### **3.2.2. Classificação dos Pavimentos**

Basicamente os pavimentos possuem 3 (três) classificações, os rígidos, os semirrígidos e os flexíveis.

Os pavimentos rígidos são aqueles que, devido à elevada rigidez da camada de revestimento (capa de rolamento) em relação as camadas inferiores, absorvem as tensões de carregamento aplicado em praticamente sua totalidade. Exemplo: Revestimento constituído por lajes de concreto Portland (Manual de Pavimentação DNIT, 2006).

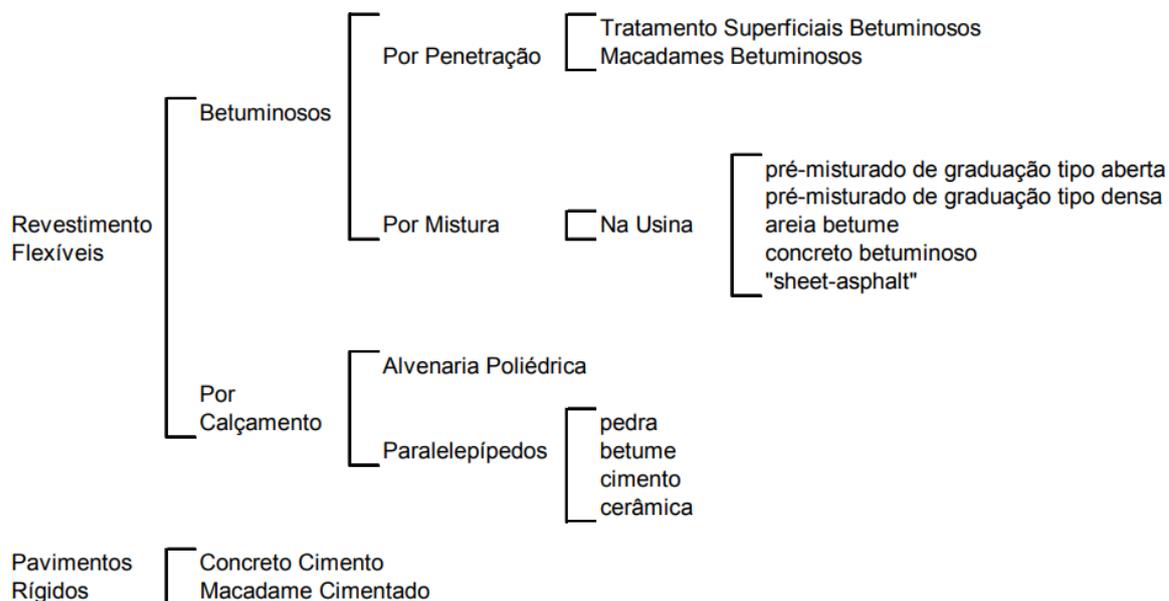
Pavimento semirrígido é um tipo intermediário de pavimento, classificado como semi-rígido por possuir características dos pavimentos flexíveis e rígidos. É caracterizado pela presença, nos materiais constituintes de uma ou mais camadas, de um agente cimentício. Esses podem ter graus de rigidez distintos (SENÇO, 2008).

Os flexíveis são caracterizados por sofrerem significativa deformação elástica sob o carregamento aplicado. Essa carga é distribuída, em partes aproximadamente proporcionais, para as camadas inferiores. Um exemplo típico é o pavimento que possui uma camada base de brita com revestimento feito por camada asfáltica (Manual de Pavimentação DNIT, 2006).

### **3.2.3. Classificação dos Revestimentos**

O revestimento é a camada superior do pavimento asfáltico que sofre à ação direta da tensão decorrente do tráfego. De acordo com o Manual de Pavimentação do DNIT (2006), os revestimentos podem ser agrupados em revestimento flexíveis e pavimentos rígidos (conforme mostrado na Figura 6).

Figura 6 – Classificação dos revestimentos



FONTE: (Manual de Pavimentação, 2006)

Nos revestimentos betuminosos o aglutinante aplicado é o betume, seja asfalto ou alcatrão o ligante betuminoso, provém da destilação do petróleo (SENÇO, 2008). Possui propriedade de adesivo termoviscoplastico, impermeável à água e baixa reatividade química a muitos agentes. Entretanto, essa propriedade não evita que esse material sofra envelhecimento por oxidação lenta por ter necessariamente contato com o ar e água (LIEDI et al., 2006).

Os revestimentos flexíveis betuminosos, como o próprio nome indica, são caracterizados por terem em sua composição materiais e agregados betuminosos. A associação desses materiais e agregados pode ser realizada por duas formas, penetração invertida ou direta e por mistura (Manual de Pavimentação DNIT, 2006).

À associação dos constituintes do revestimento flexível por penetração invertida é executada por uma ou mais aplicações de material betuminoso. Na sequência, são realizadas operações de espalhamento e compressão, em igual número de aplicações (Manual de Pavimentação DNIT, 2006).

O revestimento betuminoso por penetração direta é resultante do espalhamento e compactação das camadas de agregados. Cada camada, após o processo de compressão, recebe à aplicação de material betuminoso e, como uma aplicação final, recebe uma camada de agregado miúdo. O macadame betuminoso,

também utilizado na camada base, é o revestimento típico por penetração direta (Manual de Pavimentação DNIT, 2006).

Nos revestimentos betuminosos por mistura, o material betuminoso é pré-misturado aos agregados antes mesmo da compressão. A mistura, quando realizada nas usinas, resulta em agregados “Pré-Misturados Propriamente Ditos”, por outro lado, quando realizada na “pista”, são formados os “Pré-Misturados na Pista” (road mixes). Além dessas classificações, dependendo dos processos construtivos, há duas outras denominações, sendo o pré-misturado a frio e a quente (Manual de Pavimentação DNIT, 2006).

Utiliza-se a denominação pré-misturado a frio quando as características dos agregados e ligantes constituintes possuem propriedades que permitem o espalhamento em condições de temperatura ambiente. Para os pré-misturados a quente a mistura do agregado e ligante é espelhada na pista ainda com os constituintes aquecidos (SENÇO, 2008).

Segundo Senço (2008), os “Pré-misturados” e os “Road mixes” podem ser constituídos de agregados com graduação aberta ou densa. A capa selante é requerida (obrigatória) nos agregados de graduação aberta, entretanto, nos de graduação densa não se faz necessário à aplicação.

O Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ), pré-misturado a quente do tipo graduação densa, trata-se de um revestimento caracterizado como flexível (pavimento flexível), sendo constituído por materiais agregados graúdo, miúdo, *filler* (material de baixa granulometria para enchimento de vazios) e o cimento asfáltico de petróleo (C.A.P). Os agregados e a mistura são previamente analisados em laboratório para verificação de conformidade aos parâmetros preestabelecidos para o processo (granulometria, densidade, teor de vazios, resistência à compressão) (BONET, 2002).

Segundo informações obtidas durante visitaçao na Usina Fixa de Criciúma, o processo para obtenção do CBUQ, como o próprio nome sugere, é realizado com o auxílio de temperatura. Os agregados são dosados em proporções que dependem do “traço”, sendo então aquecidos a uma temperatura de aproximadamente 170 °C, que recebem a injeção do CAP, também pré-aquecido, sendo esse pulverizado sobre a mistura. O CAP é aquecido previamente a 162 °C, aproximadamente, para que se mantenha em estado líquido e com viscosidade adequada para aplicação.

Ainda na usina, a temperatura da mistura gira em torno de 160 a 170 °C, sendo que na sua aplicação como pavimento asfáltico, dependendo da distância, dentre outros fatores externos (temperatura atmosférica muito baixa), até o ponto de aplicação, a temperatura tende a reduzir chegando a 80 °C. Em alguns casos, se faz necessário a colocação de material isolante térmico para garantir que a mistura chegue ao destino dentro de uma margem de temperatura especificada. Esse material consiste em uma espécie de manta que é colocada sobre o material, durante o transporte que é realizado por caminhões, com o objetivo de reduzir a troca térmica da mistura com o meio externo.

À Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) é a responsável pela regulamentação do cimento asfáltico de petróleo e do asfalto diluído. Segundo à ANP, os cimentos asfálticos de petróleo são classificados segundo a penetração em CAP 30/45, CAP 50/70, CAP 85/100 e CAP 150/200, conforme Tabela 1.

Tabela 1 – Especificações dos cimentos asfálticos de petróleo (CAP) classificação por penetração

| Características                                 | Unidades | Limites        |                |                |                | Método    |        |
|---|----------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------|--------|
|   |          | CAP 30/45      | CAP 50/70      | CAP 85/100     | CAP 150/200    | ABNT      | AST M  |
| Penetração (100g, 5s, 25°C)                     | 0,1 mm   | 30 45          | 50 70          | 85 100         | 150 200        | NBR6576   | DS     |
| Ponto de amolecimento, mín                      | °C       | 52             | 46             | 43             | 37             | NBR6560   | D36    |
| Viscosidade SaboltFurol                         | s        |                |                |                |                |           |        |
| a 135°C, mín                                    |          | 192            | 141            | 110            | 80             |           |        |
| a 150°C, mín                                    |          | 90             | 50             | 43             | 36             |           |        |
| A 177°C   |          | 40 150         | 30 150         | 15 60          | 15 60          |           |        |
| ou  |          |                |                |                |                |           |        |
| Viscosidade Brookfield                          | cP       |                |                |                |                | NBR 15184 | D 4402 |
| A 135°C, SP                                     |          | 374            | 274            | 214            | 155            |           |        |
| 21, 20 rpm, mín                                 |          |                |                |                |                |           |        |
| A 150°C, SP                                     |          | 203            | 112            | 97             | 81             |           |        |
| 21, mín.  |          |                |                |                |                |           |        |
| A 177°C, SP 21                                  |          | 76 285         | 57 285         | 28 114         | 28 114         |           |        |
| Índice de susceptibilidade térmica (1)          |          | (1,5) a (+0,7) | (1,5) a (+0,7) | (1,5) a (+0,7) | (1,5) a (+0,7) |           |        |
| Ponto de fulgor mín                             | °C       | 253            | 253            | 253            | 253            | NBR 11341 | D 92   |
| Solubilidade em tricloroetileno, mín            | % massa  | 99,5           | 99,5           | 99,5           | 99,5           | NBR 14855 | D 2042 |
| Ductilidade a 25°C, mín                         | cm       | 60             | 60             | 100            | 100            | NBR 6293  | D 113  |
| Efeito do calor e do ar (RTFOT) a 163°C, 85 min |          |                |                |                |                |           | D 2872 |
| Varição em massa, max (2)                       | % massa  | 0,5            | 0,5            | 0,5            | 0,5            |           |        |

|                                       |    |    |    |    |    |          |       |
|---------------------------------------|----|----|----|----|----|----------|-------|
| Ductilidade a 25°C, mín               | cm | 10 | 20 | 50 | 50 | NBR 6293 | D 113 |
| Aumento do ponto de amolecimento, máx | °C | 8  | 8  | 8  | 8  | NBR 6560 | D 36  |
| Penetração retida, mínimo (3)         | %  | 60 | 55 | 55 | 50 | NBR 6576 | D 5   |

FONTE: (ANP 2005).

A denominação Concreto Betuminoso Usinado à Quente ou Concreto Asfáltico – CBUQ tem sido utilizado para os pré-misturas a quente do tipo graduação densa. As exigências para esse processo são rigorosas, principalmente para: equipamentos, granulometria dos agregados, estabilidade, teor de betume, quantidade de vazios. (SENÇO, 2008).

Por fim, o CAP selecionado para esse trabalho foi o 50/70, que é o índice de penetração utilizado pela usina onde foram coletadas as amostras de agregados e CAP.

### 3.3 NORMAS E LEGISLAÇÕES APLICADAS

O resíduo de areia de fundição, gerado nos processos de moldagem e exaustão, ao mesmo tempo em que geram passivos ambientais e custo expressivo para sua destinação, podem, por essas razões, motivar o desenvolvimento de tecnologias para minimização dos custos para seus geradores e, sobretudo, do impacto ambiental.

Conforme já mencionado, estudos realizados mostram que é possível reaproveitar a areia de fundição descartada como um agregado em mistura asfáltica, mantendo as propriedades necessárias e sem geração de riscos adicionais ao meio ambiente.

Em 2009, a Associação Brasileira de Normas Técnicas publicou a ABNT NBR 15702:2009, que traz como objetivo o estabelecimento de diretrizes para a aplicação de ADF como possível matéria-prima para utilização em concreto e cobertura diária em aterro sanitário.

Segundo a Norma ABNT NBR 15702:2009 – Diretrizes para Aplicação em Asfalto e em Aterro Sanitário, a Areia Descartada de Fundição (ADF) é definida como aquela proveniente do processo produtivo da fabricação de peças fundidas, como areias de macharia, de moldagem, areia a verde, preta, despoeiramento, de

varrição. Ainda, segundo a norma, a reutilização é a prática ou técnica que os resíduos podem ser utilizados repetidamente, na forma em que se encontram, sem que haja a necessidade de alteração de suas características para a reutilização, exeto quando necessário limpeza ou segregação.

Para o atendimento aos requisitos da referida norma há, dentre outras exigências, a necessidade de que a ADF seja caracterizada como Classe II – não perigoso, de acordo com a ABNT NBR10004 e amostradas conforma a ABNT NBR 10007. Além disso, faz referência e estabelece a utilização de outras normas para atendimento as exigências previstas para a utilização da ADF.

Em 2018, no Estado de Santa Catarina, foi aprovada a Lei Estadual nº 17479 que dispõe sobre a autorização para utilização das Areias Descartadas de Fundação (ADF), permitindo as seguintes aplicações para a ADF:

“Art. 2º A utilização de ADF, na forma ambientalmente mais adequada, será destinada à produção de concreto asfáltico, de concreto e argamassa para artefatos de concreto, fabricação de telhas, tijolos e outros artigos de barro cozido para artigos em cerâmica, ao assentamento de tubulações e de artefatos para pavimentação, base, sub-base, reforço de subleito para execução de estradas, rodovias, vias, urbanas e para cobertura diária em aterro sanitário.” (LEI Nº 17479 DE 15/01/2018)

A referida Lei condiciona a liberação da utilização da ADF a autorização pelo órgão competente...

§ 1º A destinação de ADF prevista no caput deste artigo dependerá da autorização a ser conferida por órgão ambiental competente, conforme dispuser a regulamentação. (LEI Nº 17479 DE 15/01/2018).

## 4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

### 4.1 MATERIAIS

Neste trabalho, foram utilizadas areias descartadas de fundição dos processos de moldagem fornecidas pela empresa Metalúrgica DS – MDS, fabricante de peças automotivas (discos e tambores de freio). O acesso ao processo, informações relativas à classificação dos resíduos sólidos, licenças ambientais e amostras de resíduos para a realização dos testes foram autorizados previamente pela empresa geradora.

Segundo informações obtidas junto ao gerador a areia de fundição mencionada acima, é proveniente do processo de moldagem *cold-box* (cura a frio), contendo aproximadamente 99% de quartzo, 0,92% de resina fenólica (divididas em parte I e parte II, com 0,46% para cada parte) e 0,1 de catalisador.

A areia utilizada se encontra no pátio da empresa. Originalmente, não há segregação no gerador entre as areias descartadas do processo de moldagem e de finos de exaustão no momento da disposição no pátio. Essas são depositadas no mesmo local, sendo misturadas no decorrer dos processos e ao longo do tempo na própria área onde são acondicionadas até disposição em aterro sanitário.

Segundo informações obtidas no processo produtivo, as areias descartadas de fundição oriundas do processo de moldagem representam aproximadamente 80% do total de resíduos depositados na área de resíduos da empresa. Além desse volume, há também cerca de 20% referente aos “finos” do processo de exaustão. Há também, depositado nesse mesmo local, escória retirada dos fornos a indução.

Considerando as informações do gerador foi adotado para avaliação neste trabalho, 3 (três) tipos de areia, sendo elas as geradas nos processos de moldagem, exaustão e o *blend*. O *blend* é constituído de amostra preparada em laboratório, considerando a amostragem representativa de percentuais proporcionais de cada tipo de areia presente nos montes e pilhas, depositados na referida empresa. Ou seja, 80% em massa de areia de moldagem e 20% em massa de finos de exaustão.

A quantidade total de areia descartada dos processos de fundição da referida empresa é de aproximadamente 400 (quatrocentos) toneladas/mês, conforme consta na licença ambiental vigente. Foram coletados aproximadamente

50 kg de areia dos processos de moldagem e de exaustão, de forma a obter amostras representativas da massa total do resíduo.

Segundo a ABNT-NBR 10007:2004, as amostras representativas, obtidas por meio de um processo de amostragem devem apresentar as mesmas características e propriedades da massa total do resíduo.

Além da areia descartada do processo de fundição, neste trabalho foram utilizados os materiais constituintes (agregados) da massa asfáltica. Dessa forma, em visita a Usina da Prefeitura de Criciúma, instalada na Rodovia Jorge Lacerda, bairro Sangão no próprio município foram coletados os agregados necessários para realização dos ensaios e testes de laboratório: amostras representativas de brita  $\frac{3}{4}$ , pedrisco, pó de pedra, *filler*, e o cimento asfáltico do petróleo – CAP 50/70.

A brita  $\frac{3}{4}$ , pedrisco, pó de pedra e *filler* são agregados oriundos de empresas da região, próximas a Usina que é fixa e com processo do tipo volumétrico. Já o CAP, por meio de Refinarias da Petrobrás, é comercializado pela rede de distribuidores. O CAP 50/70 tem à aplicação específica para massas asfálticas usinadas a quente, tem a função de ligante dos agregados dos constituintes.

#### **4.1.1 Amostragem dos Materiais**

As amostras de agregados para o asfalto (Figura 7) e areia descartada de fundição foram coletadas observando-se a Norma ABNT NBR 10007:2004 para amostragem de resíduos sólidos.

Figura 7 – Amostras de agregados para mistura asfáltica.

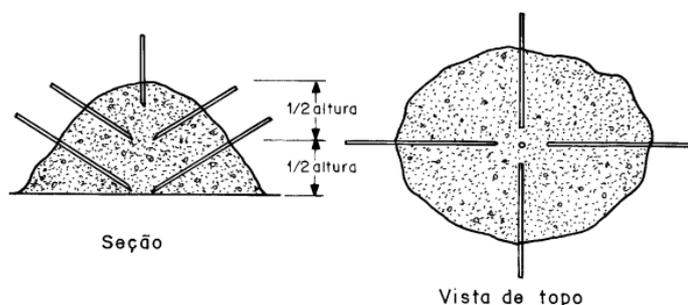


FONTE: Do Autor (2022)

Foram amostradas areias dos processos de moldagem e exaustão, conforme procedimento previsto no item 4.2.2, nos montes/pilhas de resíduo depositados na indústria supracitada.

Segundo a ABNT NBR 10007:2004, por se tratar de amostragem de montes ou pilhas de resíduos, as amostras devem ser retiradas em pelo menos três seções (topo, meio e base), sendo que para cada seção devem-se coletar quatro alíquotas. Além disso, o amostrador utilizado deve ser inserido obliquamente, conforme Figura 8.

Figura 8 - Pontos de retirada de amostras de montes ou pilhas e de sacos, barris, de resíduos ou similares.



Detalhe da coleta em monte ou pilha (Seção e vista de topo)

FONTE: Adaptado de ABNT NBR 10007 (2004)

A Figura 9 ilustra a retirada de amostras de areia descartada de fundição – ADF, sendo coletadas as areias provenientes do processo de moldagem e exaustão de exaustão.

Figura 9 – Amostragem de ADF nas pilhas e montes no pátio do gerador.



FONTE: Do Autor (2022).

O amostrador utilizado para coleta das amostras foi adaptado com a utilização de uma pá. Embora seguido às orientações conforme Figura 8.

Na Figura 10 está ilustrada a coleta de amostras de agregados na Usina da Prefeitura de Criciúma.

Figura 10 - Amostragem de agregados para asfalto nas pilhas e montes no pátio da usina.



FONTE: Do Autor (2022).

Conforme previsto na Norma ABNT NBR 10007:2004 foi realizado o processo de divisão em quatro partes iguais (quarteamento) de uma amostra pré-homogeneizada. A nova amostra é constituída pela tomada de duas partes opostas entre si, sendo que as partes restantes serão descartadas. Tal amostra é misturada totalmente para um novo processo de quarteamento. Esse processo foi repetido até que o volume de amostra necessário seja atingido, aproximadamente 50 kg cada agregado.

O processo de amostragem do Cimento Asfáltico de Petróleo – CAP 50/70 (tipo de CAP utilizado pela usina da Prefeitura de Criciúma), seguiu as orientações previstas no item “2.10 Tanque de armazenagem: Construção destinada ao armazenamento de líquidos, com capacidade superior a 250 litros” da ABNT NBR 10007:2004.

O CAP é recebido semanalmente pela usina em caminhões tanques vindos da distribuidora localizada no Rio Grande do Sul. Conforme instruções do gerente da usina, por conta da facilidade de acesso, a melhor condição de amostragem do CAP é no caminhão tanque. Dessa forma, conforme ilustrado na Figura 11, as amostras

de CAP foram coletadas diretamente do caminhão tanque, antes do transbordo para os tanques de acondicionamento da usina.

Figura 11 - Retirada de amostras de CAP 50/70 por meio da tampa superior de acesso ao tanque.



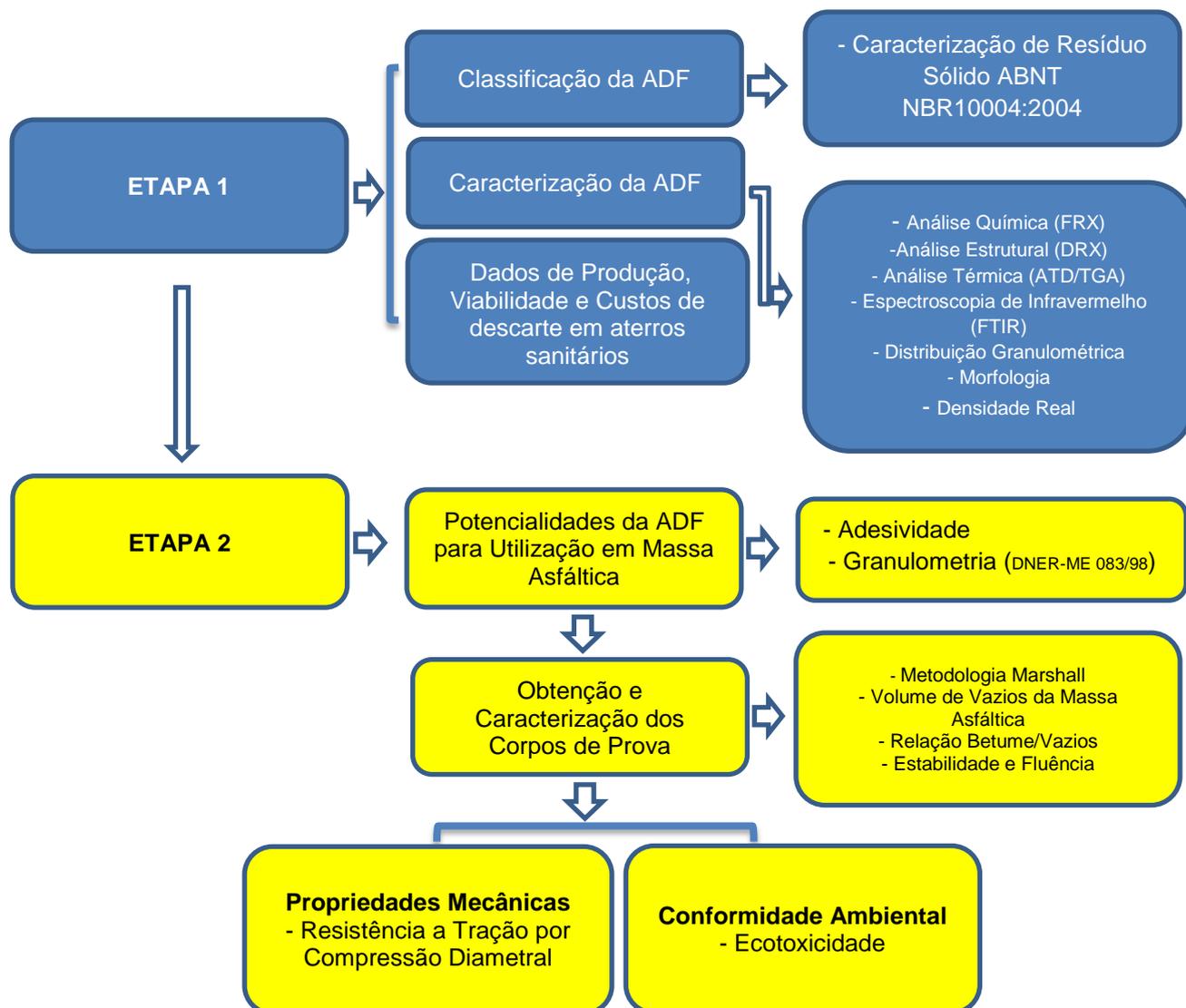
FONTE: Do Autor (2022).

## 4.2 MÉTODOS

O desenvolvimento desse trabalho, em síntese, é apresentado na forma do fluxograma da Figura 12, conforme segue abaixo e será descrito subsequentemente.

As cores indicam as etapas do procedimento e servem para facilitar a visualização, sendo azul a primeira etapa e a segunda etapa em amarelo.

Figura 12 - Fluxograma do Procedimento Experimental



FONTE: Do Autor (2022).

#### 4.2.1 Classificação da Areia Descartada de Fundição - ADF

A ADF foi classificada de acordo com a ABNT NBR10004:2004. Segundo a Norma ABNT NBR15702:2009 – Areia Descartada de Fundição – Diretrizes para Aplicação em Asfalto e em Aterro Sanitário, dentre outros requisitos, a ADF deve atender ao disposto no item 4.2 “a) ser classificada como classe II – não perigoso, de acordo com a ABNT NBR10004:2004...”.

A empresa Metalúrgica DS disponibilizou relatório de ensaio N°316/2006 – Análise de Classificação de Resíduos Sólidos (Segundo ABNT NBR 10004:2004), realizado pelo Instituto de Pesquisas Ambientais e Tecnológicas – IPAT – UNESC.

Tendo em vista que não houve alterações no processo produtivo que justificassem novos ensaios de classificação da ADF e, sobretudo, que o mesmo relatório é utilizado para fins de registro das licenças ambientais vigentes, portanto, aceitos pelos órgãos ambientais oficiais responsáveis, os resultados da classificação foram utilizados.

Desse modo, para a classificação conforme diretrizes da ABNT NBR10004:2004, o extrato aquoso das amostras foi produzido utilizando uma solução extratora, constituída de uma mistura de ácido acético glacial com solução de hidróxido de sódio a 1,0 mol. L<sup>-1</sup>, em pH 5,0. Para este ensaio, foram empregadas de 100 g de amostra e 1 L de solução extratora que foram mantidos sob agitação contínua por 18 h.

Já para o ensaio de solubilização (ABNT NBR 10006:2004) foram empregados 250 g de amostra, misturados com 1,0 L de água deionizada, e após 5 min de agitação em baixa velocidade, o material foi deixado em repouso por 7 dias. Os teores dos elementos foram determinados por espectrometria de emissão atômica por plasma acoplado indutivamente ICP – OES 8.300 [Perkin Helmer], sendo posteriormente comparados com limites estabelecidos pela NBR 10004.

#### **4.2.2 Caracterização da Areia Descartada de Fundição - ADF**

##### *4.2.2.1 Análise Química por Fluorescência de Raios X (FRX)*

Para determinar a composição química das amostras de areia descartada de fundição, em termos de óxidos presentes, análise química por fluorescência de raios X foi utilizada. Amostras de ADF moldagem e dos finos de exaustão foram previamente preparadas e separadas para envio ao laboratório.

A análise foi realizada no Laboratório de Desenvolvimento e Caracterização de Materiais (LDCM) do Senai de Criciúma. O equipamento da marca Panalytical, modelo WRFDX AXIOS MAX.

#### *4.2.2.2 Análise Estrutural por difração de raios X (DRX)*

A análise estrutural por Difração de Raios X tem por objetivo identificar as fases cristalinas presentes no resíduo, que foram determinadas em um difratômetro de raios X Shimadzu, modelo LABX XRD-6000, com 30 kV e corrente de 30 mA. Foi empregado um tubo de cobre (radiação  $\text{CuK}\alpha$ ) com faixa de varredura  $2\theta$  de 5 a 85°. Os difratogramas obtidos foram comparados com padrões disponíveis no banco de dados Joint Committee on Powder Diffraction-International Centre for Diffraction Data (JCPDS). As amostras de ADF de moldagem e finos de exaustão foram previamente preparadas e separadas para envio ao laboratório.

#### *4.2.2.3 Análises Térmicas*

Análises térmicas como análise térmica diferencial (ATD) e termogravimétrica (TGA), tiveram por objetivo analisar evidências de processos químicos distintos como a oxidação, decomposição, mudança de fases nas ADFs.

O equipamento utilizado é um STA 449 F3 Jupiter em cadinho de alumina e atmosfera de ar sintético.

Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) (BRUKER/TENSOR II) acoplado à análise termogravimétrica (TG) (NETZSCH/STA 449 F3 Jupiter) foi utilizada para determinar os grupos funcionais dos gases formados durante o aquecimento.

#### *4.2.2.4 Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier*

A identificação dos grupos funcionais fenólicos, possivelmente presentes nas partículas das ADFs, foram determinados por espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) em um equipamento SHIMADZU, IRAFFinity-1S.

#### *4.2.2.5 Distribuição Granulométrica*

O ensaio de distribuição granulométrica teve por objetivo avaliar as ADFs em termos de tamanho das partículas que constituem cada amostra, por meio da técnica de peneiramento a seco.

A aparelhagem utilizada para o ensaio seguiu as recomendações da Norma Rodoviária DNER 083/98, conforme segue:

- Conjunto de peneiras conforme DNER-ME 035/95;
- Balança com capacidade de 20 kg, sensibilidade de 1 g;
- Estufa adequada as dimensões e com capacidade de manter a temperatura em 110 °C;
- Escovas para limpeza das peneiras;
- Repartidores de amostras;
- Tabuleiros metálicos 50 cm X 30 cm X 6 cm.

Desta forma, as amostras das areias foram previamente secas em estufa a 110 °C e passadas nas peneiras com auxílio de agitação manual. Os percentuais retidos em cada peneira foram registrados e comparados com padrões estabelecidos pela referida norma.

#### *4.2.2.6 Morfologia*

O objetivo desse ensaio foi permitir a observação das partículas das AFDs, a partir de imagens ampliadas, de forma que seja possível a análise de detalhes da morfologia das partículas bem como a distribuição dessas.

As amostras de ADF de moldagem e finos de exaustão foram avaliadas utilizando um microscópio digital USB - 1000x (Lupa eletrônica PC).

#### *4.2.2.6 Densidade Real*

A densidade real das ADFs de moldagem e finos de exaustão foi determinada por picnometria ao gás hélio (AccuPyc 1340, Micromeritics, USA).

Além disso, um método padronizado para as misturas asfálticas foi utilizado. Neste caso, para a determinação da densidade dos agregados para asfalto, foi necessário separar os agregados (brita em ¾, pedrisco, pó de pedra e ADF) em 3 granulometrias distintas (graúdo, médio e finos). A mesma metodologia foi utilizada para o material de referência

O material passante na peneira malha ¾ e retido na #10 foi denominado “graúdo” e submetido ao ensaio (DNER-ME 195/97). Esse ensaio consistiu em realizar, primeiramente, a pesagem de uma quantidade de agregado, que fora submetido a uma secagem prévia de 24 h. Após isso, foi realizado a pesagem do mesmo agregado, contudo, saturado com a superfície enxuta, ou seja, submerso todo o agregado em água por 24 h secá-lo superficialmente e pesar.

Por fim, o material teve seu peso submerso aferido. As densidades real e aparente foram calculadas por meio das seguintes fórmulas (P1 peso ao ar, P2 peso saturado e P3 peso submerso), conforme equações (1) e (2) abaixo:

$$\text{Densidade REAL (D.R.)} = \frac{P1}{P1-P3} \quad (1)$$

$$\text{Densidade APARENTE (D.A.)} = \frac{P1}{P2-P3} \quad (2)$$

O seguinte agregado, denominado “médio”, passante da peneira de malha #10, mas retido na peneira #20, foi submetido a (DNER-ME 084/95). Nesse ensaio os picnômetros foram pesados primeiramente. Logo após a pesagem foi adicionado uma quantidade de amostra dentro do picnômetro e pesado novamente.

A terceira pesagem realizada é do picnômetro com amostra completo de água, mas com o objetivo de evitar que ficasse ar entre o agregado foi adicionado água até pouco mais da metade da altura do picnômetro e levado a uma chapa de aquecimento por aproximadamente 1 h, posteriormente ao início da fervura. Após isso, os picnômetros foram colocados para resfriar ao ar. Depois de atingirem a temperatura ambiente, cuidadosamente completou-se os picnômetros com água permitindo sua pesagem.

Por fim, a quarta aferição é feita com o picnômetro completo apenas de água. Os cálculos da densidade real foram feitos da seguinte maneira (P1 peso do

picnômetro; P2 picnômetro + amostra; P3 picnômetro + amostra + água; P4 picnômetro + água), conforme equação (3) abaixo:

$$Densidade Real Média (D.R.) = \frac{P2 - P1}{(P4 - P1) - (P3 - P2)} \quad (3)$$

Todo o agregado passado pela peneira malha #200 foi denominado “fino” e submetido ao ensaio (DNER-ME 085/94). Esse ensaio consiste em encher um frasco *Le Chatelier* com querosene até uma marca que fique entre 0 e 1 mL. Em seguida é adicionado cerca de 60 g do material e aferido o deslocamento do volume do líquido querosene. O frasco foi agitado de modo que todo o ar presente na amostra fosse retirado. A densidade é calculada pela razão da massa da amostra pelo volume deslocado, conforme equação (4) abaixo:

$$Densidade REAL MÉDIA (D.R.) = \frac{M}{V} \quad (4)$$

#### **4.2.3 Dados de Geração, Viabilidade e Custos de Descarte em Aterros Sanitários**

Foi levantado o custo de destinação da ADF no aterro e o custo logístico, considerando informações pertinentes a referida empresa. Além disso, foram levantadas informações junto aos órgãos ambientais competentes (Instituto do Meio Ambiente de Santa Catarina - IMA) e com aterros sanitários, relativos ao volume médio mensal de areia descartada de fundição gerada na região dos municípios pertencentes à Associação dos Municípios do Extremo Sul Catarinense - AMREC, Associação dos Municípios do Extremo Sul Catarinense - AMESC e Associação Municípios Região de Laguna - AMUREL.

#### **4.2.4 Potencialidades da areia de fundição para utilização em massa asfáltica**

##### *4.2.4.1 Ensaio de Adesividade*

Segundo a Norma Rodoviária que determina o método de ensaio, DNER-ME 079/94, a adesividade é a propriedade de aderência que o agregado tem de ser aderido por um material betuminoso. Sua avaliação é referente ao não deslocamento da película betuminosa que recobre o agregado. Essa propriedade é observada quando a mistura agregado-ligante, é submetida à água destilada em ebulição e soluções molares com diferentes concentrações de carbonato de sódio (Êxodo Científica, pureza 99%) em ebulição.

A Tabela 2 mostra as soluções molares em que as amostras foram submetidas ao ensaio de adesividade.

Tabela 2 - Solução de carbonato de sódio

| <b>Solução Nº</b> | <b>Molaridade</b> |
|-------------------|-------------------|
| 1                 | M/256             |
| 2                 | M/128             |
| 3                 | M/64              |
| 4                 | M/32              |
| 5                 | M/16              |
| 6                 | M/8               |
| 7                 | M/4               |
| 8                 | M/2               |
| 9                 | M                 |

FONTE: DNER-ME 079/94

O ensaio foi realizado para as diferentes areias descartadas de fundição (moldagem, exaustão e *blend*) e para o pó de pedra (referência). O ensaio consistiu em fazer uma mistura em volume de 71% de areia passante na peneira 0,59 mm e retido na 0,21 mm e 29% de ligante, a frio ou quente. O ligante CAP 50/70 foi aquecido, utilizando bico de bunsen, em recipiente metálico até atingir fluidez suficiente para recobrimento das amostras. Aproximadamente de 0,5 g (Figura 13) da mistura foi colocada em um tubo de ensaio com água destilada até uma altura de aproximadamente 3 cm.

Figura 13 – Amostra de 0,5 g de mistura ADF moldagem preparada para ensaio de adesividade.



FONTE: Do Autor (2021).

No bequer de 600 mL foi colocada a solução (Figura 14), constituída por uma solução saturada de sal de cozinha (marca Cisne) em água, aqueceu-se à temperatura aproximada de 110 °C.

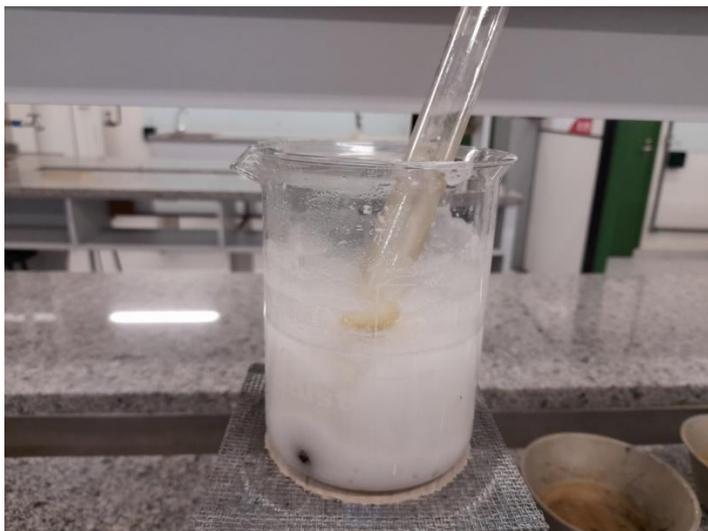
Quando a água do tubo de ensaio atingiu o estado de ebulição, contou-se 1 min, para então retirar o tubo do banho e verificar se houve ou não deslocamento da película betuminosa. A norma orienta que em caso haja deslocamento total o material é classificado como “apresenta má adesividade”. Em não havendo o deslocamento, o ensaio é repetido substituindo a água por soluções de carbonato de sódio, em diferentes concentrações pré-definidas pela norma. Dessa forma, é verificado em qual solução ocorrerá o deslocamento, ou em qual se inicia e qual solução termina, conforme indicado na norma DNER-ME 079/94.

Tabela 3 - Indicação da adesividade em função das soluções de carbonato de sódio.

| <b>Número</b> | <b>Adesividade</b> |
|---------------|--------------------|
| 0             | Má                 |
| 1             | Satisfatória       |
| 2             | Satisfatória       |
| 3             | Satisfatória       |
| 4             | Boa                |
| 5             | Boa                |
| 6             | Boa                |
| 7             | Boa                |
| 8             | Boa                |
| 9             | Boa                |
| 10            | Ótima              |

FONTE: DNER-ME 079/94

Figura 14 - Solução saturada de sal de cozinha.



FONTE: Do Autor (2021).

Em casos em que não é verificado deslocamento (Figura 15) em nenhuma das soluções, o valor será relativo a adesividade dez, ou seja, “ótima”.

Figura 15 - Verificação de deslocamento da película betuminosa.



FONTE: Do Autor (2021).

#### 4.2.4.2. Granulometria

Segundo a recomendação da Norma DNIT 031/2004, o concreto betuminoso deve estar enquadrado no que diz respeito à granulometria e suas respectivas tolerâncias segundo a Tabela 4 – Composição da Mistura.

A faixa granulométrica “C” da mistura, definida para esse trabalho, refere-se a camada de rolamento especificada pela Norma do DNIT 031/2004 – ES: pavimentos flexíveis: concreto asfáltico – especificação de serviço

Tabela 4 - Composição da mistura

| Peneira de malha quadrada     |               | % em massa, passando                    |  |                                  |             |
|-------------------------------|---------------|---|--|----------------------------------|-------------|
| Série ASTM                    | Abertura (mm) | A                                       | B  | C                                | Tolerâncias |
| 2"                            | 50,8          | 100                                     | -  | -                                | -           |
| 1 ½"                          | 38,1          | 95 - 100                                | 100  | -                                | ± 7%        |
| 1"                            | 25,4          | 75 - 100                                | 95 - 100                                   | -                                | ± 7%        |
| ¾"                            | 19,1          | 60 - 90                                 | 80 - 100                                   | 100                              | ± 7%        |
| ½"                            | 12,7          | -                                       | -  | 80 - 100                         | ± 7%        |
| 3/8"                          | 9,5           | 35 - 65                                 | 45 - 80                                    | 70 - 90                          | ± 7%        |
| Nº 4                          | 4,8           | 25 - 50                                 | 28 - 60                                    | 44 - 72                          | ± 5%        |
| Nº 10                         | 2,0           | 20 - 40                                 | 20 - 45                                    | 22 - 50                          | ± 5%        |
| Nº 40                         | 0,42          | 10 - 30                                 | 10 - 32                                    | 8 - 26                           | ± 5%        |
| Nº 80                         | 0,18          | 5 - 20                                  | 8 - 20                                     | 4 - 16                           | ± 3%        |
| Nº 200                        | 0,075         | 1 - 8                                   | 3 - 8                                      | 2 - 10                           | ± 2%        |
| Asfalto solúvel no CS2(+) (%) |               | 4,0 - 7,0<br>Camada de ligação (Binder) | 4,5 - 7,5<br>Camada de ligação e rolamento | 4,5 - 9,0<br>Camada de rolamento | ± 0,3%      |

FONTE: Norma DNIT 031 (2004).

#### 4.2.5 Obtenção e caracterização dos corpos de prova

Com base em estudos já realizados CHEGATTI (2004) e BONET (2002) com areia descartada de fundição definiu-se, para esse trabalho, os percentuais de incorporação desse resíduo em substituição ao pó de pedra.

Segundo informações obtidas na Usina e em trabalhos da literatura Chegatti (2004) e Bonet (2002) o percentual de “pó de pedra” utilizado no traço de asfalto é entre 50 e 60%.

Neste sentido, o percentual definido para esse trabalho foi de 55% de pó de pedra. Além disso, 23% de brita  $\frac{3}{4}$  e 22% de pedrisco foram usados.

Inicialmente, as 3 (três) ADFs (moldagem, *blend* e *referência*) estudadas neste trabalho foram utilizadas para avaliação da potencialidade de aplicação em asfalto com base na granulometria, conforme metodologia já descrita no item 4.2.4.2. Um percentual de substituição de 10% de ADF ao pó de pedra, foi utilizado para avaliar a conformidade de acordo com a DNIT 031 (2004).

Posteriormente, para avaliar e definir o teor ótimo de CAP o teor de 10% foi usado para as ADFs com granulometria adequada. Teores de CAP de 4,0, 4,5, 5, 5,5 e 6 foram utilizados. Os corpos de prova foram executados conforme procedimentos previstos nos ensaios de estabilidade e fluência Marshall que serão detalhados no item 4.2.5.2. Foram avaliados com base principalmente nos ensaios mecânicos e de adesividade qual das areias possui maior potencial de aplicação.

Após a seleção da areia com maior potencial, a execução dos corpos de prova (Figura 19) seguiram os percentuais abaixo:

- Sem incorporação (0%) de ADF (60% Pó de Pedra);
- Incorporação de 5% de ADF em substituição parcial ao Pó de Pedra;
- Incorporação de 7,5% de ADF em substituição parcial ao Pó de Pedra;
- Incorporação de 10% de ADF em substituição parcial ao Pó de Pedra.

Todos os corpos de prova foram produzidos em triplicatas (Figura 16).

Figura 16 - Corpos de prova.



FONTE: Do Autor (2021).

Os corpos de prova das misturas asfálticas foram executados com base nas especificações do CBUQ (concreto betuminoso usinado a quente) - Faixa C, estabelecido pelo DNER, de acordo com a metodologia Marshall.

#### 4.2.5.2 Metodologia Marshall

A metodologia de dosagem que utilizada nesta pesquisa é a Marshall. Essa metodologia está fundamentada nos procedimentos determinados na norma (DNIT ME 043/1995, 1995) de misturas betuminosas a quente e ensaio Marshall. Os procedimentos do método Marshall consistiram em conformar, por compactação a quente, um conjunto de corpos de prova, em que a mistura dos agregados para confecção dos mesmos foi definida como a condição necessária para obtenção de um corpo de prova com 1200 g, 6,3 cm de altura e 10 cm de diâmetro.

Os agregados e as amostras de areia de fundição foram inicialmente secos/aquecidos em estufa a 170 °C. Da mesma forma, o CAP também foi mantido em estufa aquecido a 170 °C.

A mistura CAP agregados foi realizada em recipiente metálico apropriado, com auxílio de aquecimento em fogareiro a gás (170 °C) durante o processo, de acordo com as quantidades estabelecidas.

A moldagem dos corpos de prova foi realizada com a mistura ainda aquecida aplicando-se 20 golpes manuais e 75 golpes com soquete de cada lado do molde. Para isso foi utilizado uma máquina compactadora Soquete Marshall I-2004-A (Figura 17).

Figura 17 - Soquete Marshall I-2004-A.



FONTE: Do Autor (2021).

Foi utilizado o molde de compactação Marshall que consiste em uma placa base, molde e colar de extensão. O molde com diâmetro interno de 101,6 mm e altura aproximada de 90,0 mm.

Após a moldagem os corpos de prova foram desmoldados e resfriados em temperatura ambiente. Posteriormente, esses corpos de prova são imersos em um

banho-maria (marca DeLeo equipamentos para laboratório) a 60 °C. Após serem retirados do banho, os corpos de prova foram caracterizados.

#### 4.2.5.3. Determinação do volume de vazios da massa asfáltica

A determinação do volume de vazios dos corpos de prova produzidos pelo método Marshall permite avaliar os espaços vazios na massa asfáltica e, em razão disso, a durabilidade e qualidade do asfalto acabado.

Para isso, inicialmente é necessário determinar a densidade máxima teórica da mistura. Para determinação da densidade máxima teórica, foram analisadas as densidades das areias de fundição (por picometria a hélio, conforme indicado no item 4.2.2.6). Para os demais agregados, o método para a determinação da densidade real foi realizado dentro dos parâmetros da norma DNIT ME 084/1995. O método de ensaio consistiu em colocar 500 g de material previamente seco em estufa e resfriado em um dessecador e em seguida colocado em um picnômetro de 500 mL. Após aquecer a amostra no picnômetro, realizou-se a expulsão de todo ar existente esfriando em “banho maria”. O cálculo das densidades foi realizado por meio da diferença de pesos do picnômetro vazio, cheio de água e com o agregado miúdo mais água. A densidade teórica do CAP é tabelada.

Posteriormente foi necessário calcular a densidade geométrica (densidade aparente) de cada corpo de prova obtido, conforme equação (5). A densidade geométrica foi calculada a partir das medidas de massa e de volume dos corpos de prova, utilizando-se a Equação abaixo. Para cada amostra, as medidas de volume foram realizadas com o auxílio de um paquímetro marca Digimess, modelo 300 mm e as de massa com o auxílio de uma balança marca Pizzolo, modelo AS550C.

$$\rho_g = \frac{m}{V} \quad (5)$$

onde,  $\rho_g$  é a densidade geométrica ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ),  $m$  é a massa da amostra (g) e  $V$  é o volume da amostra ( $\text{cm}^3$ ).

Por fim, o teor de vazios dos corpos de prova é expresso pela seguinte equação (6):

$$V_v = \frac{DMT - G_{mb}}{DMT} \quad (6)$$

onde: DMT: densidade máxima teórica;  $G_{mb}$ : densidade aparente da mistura

Foram ensaiados todos os corpos de prova e comparados com as especificações para a faixa “C” da Norma do DNER, a ES-P 22/71.

#### 4.2.5.4. Relação Betume/Vazios

A relação betume/vazios (R.B.V) estabelece a proporção do ligante asfáltico CAP (betume) dentro dos vazios deixados pelos agregados. Essa relação é de suma importância para avaliação do grau de balanço existente na mistura asfáltica, considerando os agregados e o ligante (betume).

Para se chegar à relação betume/vazios é necessário calcular o teor de vazios da mistura asfáltica em função do agregado mineral (V.A.M) para a brita, pedrisco, pó de brita e areia. Representa a quantidade de espaços vazios existentes em razão da quantidade presente de agregados na massa asfáltica, e é dado pela seguinte equação (7):

$$\%VAM = 100 - \frac{d}{DM(Mistura)} \times (100 - \% b) \quad (7)$$

onde: VAM - teor de vazios da mistura asfáltica em função do Agregado Mineral (%);  $d$  = densidade aparente medida no ensaio ( $\text{g/cm}^3$ );  $DM$  (mistura) = densidade média da mistura de agregados ( $\text{g/cm}^3$ );  $\% b$  = percentual de betume utilizado na mistura asfáltica.

Segundo Chegatti (2004), por meio da avaliação do RBV é possível identificar uma mistura asfáltica com maior estabilidade e resistência para as condições de tráfego. O RBV é calculado e comparado com padrões normativos, por meio da seguinte equação (8):

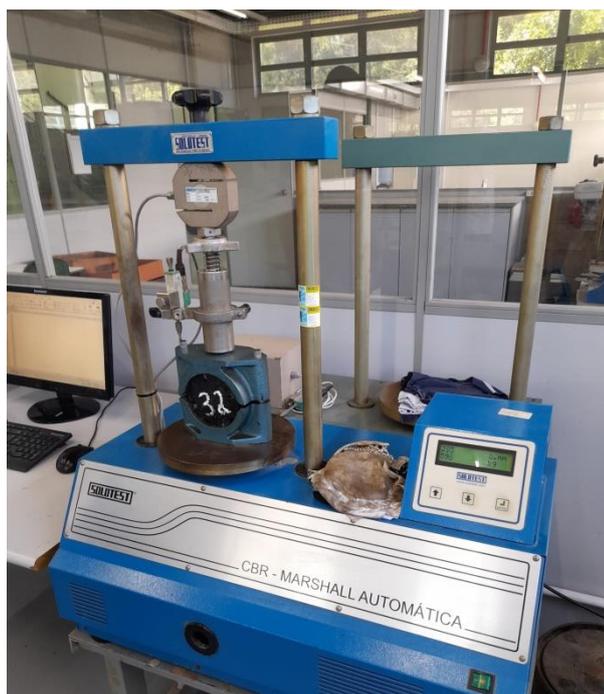
$$\%RBV = \frac{\%VAM - \%Vv}{\%VAM} \times 100 \quad (8)$$

onde: RBV – Relação Betume/Vazios; VAM - teor de vazios da mistura asfáltica em função do Agregado Mineral e  $Vv$  – Volume de Vazios

#### 4.2.5.5 Estabilidade e Fluência

A norma rodoviária DNER-ME 043/95 estabelece o método de ensaio para estabilidade e fluência de misturas betuminosas usinadas a quente, por meio da utilização do aparelho Marshall (Figura 18).

Figura 18 - Máquina de ensaio CBR – marshall automática.



FONTE: Do Autor (2021).

A estabilidade Marshall consiste na resistência máxima a compressão radial, suportada pelo corpo de prova expressos em N (kgf). Já a fluência Marshall pode ser entendida como a deformação total apresentada pelo corpo de prova, desde a carga inicial nula até a máxima carga aplicada.

Uma compressão diametral a 5 cm/min, será aplicada por uma prensa hidráulica, por meio de um molde de compressão cilíndrico, idealizado por Marshall

até rompimento do corpo de prova. O valor da carga máxima suportada pelos corpos de prova é conhecido como estabilidade Marshall e a deformação de ruptura como fluência.

A estabilidade e fluência foram determinados a 60°C conforme preconiza a metodologia (DNIT ME 043/1995, 1995): "Misturas betuminosas a quente – ensaio Marshall".

Os resultados para estabilidade são dados pela carga média N (kgf), de pelo menos 3 (três) corpos de prova. A fluência pela média de valores também pela média de pelo menos 3 corpos de prova, expressa em 0,25 mm.

#### 4.2.6 Propriedades mecânicas

##### 4.2.6.1. Determinação da Resistência a Tração por Compressão Diametral

Nesse ensaio foi determinada a resistência a tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos de mistura betuminosa.

Com os corpos de prova previamente medidos (altura e diâmetros médios), com a temperatura especificada para o ensaio e posicionados nos pratos da prensa, é aplicado então uma carga progressiva, com velocidade de deformação de  $0,8 \pm 0,1$  mm/s até que ocorra a ruptura, com a separação do corpo de prova em duas partes segundo o plano diametral vertical.

O resultado foi obtido com o cálculo da resistência à tração diametral do corpo de prova rompido por compressão diametral, por meio da equação (9):

$$\sigma_R = \frac{2F}{\pi DH} \quad (9)$$

onde:  $\sigma_R$  – resistência à tração, kgf/cm<sup>2</sup>; F – força de ruptura, kgf; D – diâmetro do corpo de prova, cm e H – altura do corpo de prova, cm.

#### 4.2.7 Ensaios de Ecotoxicidade

Este ensaio teve como objetivo avaliar os efeitos em seres vivos em razão do meio em que vivem. Em outras palavras, o ensaio pode auxiliar no entendimento de efeitos causados, em seres vivos, por substâncias químicas presentes no meio em que esses estão inseridos. Dessa forma, é possível entender e prever os possíveis efeitos em seres vivos da incorporação de areia descartada de fundição em massa asfáltica.

O ensaio de ecotoxicidade consistiu em expor uma quantidade de organismos conhecidos a substância por um determinado período. Dessa forma, foram avaliadas questões como a mortalidade e sobrevivência dos organismos. Aspectos comportamentais, de morfologia (forma estrutural) e fisiologia (metabolismo e desenvolvimento) também foram observados nesse ensaio.

Inicialmente, foi produzido um extrato solubilizado de resíduos sólidos. O ensaio foi realizado conforme diretrizes da ABNT NBR10006:2004. Para isso, foi preparado uma solução aquosa de material, contendo 250 g de areia descartada de fundição e 1 L de água destilada e/ou deionizada. A amostra de ADF, previamente seca em estufa à 42 °C, foi submetida à passagem por peneira de malha 9,5 mm, adicionado água deionizada, utilizando um frasco de 1 L. O conteúdo foi submetido a agitação por um tempo de 5 min em baixa velocidade.

O ensaio foi realizado com areia descartada de fundição que satisfizes os requisitos técnicos previstos nas normas técnicas. Além disso, o ensaio foi realizado também com extrato solubilizado de corpos de prova com 5, 7,5 e 10% de ADF em substituição ao pó de pedra na massa asfáltica, com teor ótimo de CAP 50/70 definido. Os corpos de prova foram previamente fragmentados e passaram pelos mesmos procedimentos previstos na ABNT NBR 10006:2004.

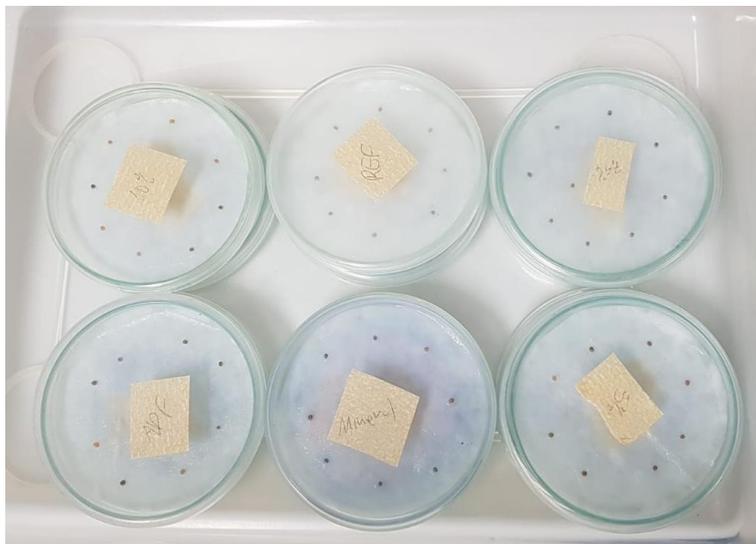
A norma estabelece um tempo de repouso de 7 d para a mistura, com o frasco protegido por filme de PVC à temperatura de 25 °C. Após isso, filtrou-se essa mistura com aparelho de filtração com membrana de 0,45 µm de porosidade.

Para a avaliação de toxicidade, foram utilizados dois tipos de hortaliças, sendo a *lactuca sativa* (alface) e a *allium cepa sp.* (cebola), como bioindicadores.

As sementes de alface, em quantidade (10 unidades por placa) Figura 19, foram colocadas em placa petri contendo papel filtro de 2 mL da mistura solubilizada

e de água mineral (referência). As placas foram armazenadas por um período de 72 h em local com abrigo de luz.

Figura 19 - Placas petri contendo sementes de *Lactuca sativa* (alface).



FONTE: Do Autor (2022).

A avaliação ocorreu pela contagem do número de sementes germinadas e não germinadas e o crescimento das mudas. O crescimento foi mensurado pela medição com paquímetro da radícula e hipocótilo.

Para o ensaio de ecotoxicidade utilizando *allium cepa* sp. (cebolas) como bioindicador Figura 20, foram preparadas as amostras da seguinte forma:

- Cortado de toda a raiz existente presa ao “prato” da cebola;
- Retirado a casca exterior seca (catafilo externo);
- Manutenção da cebolas integras, sem “machucados” no decorrer do ensaio;
- Adicionado o volume de 50 mL de solução solubilizada previamente preparada a um tubo Falcon de 50 mL;
- As cebolas foram colocadas de forma que a parte da raiz mantivesse em contato com a amostra solubilizada, mantendo a temperatura ambiente durante 7 dias protegidas da incidência de luz;
- Houve reposição do extrato solubilizado nos tubos falcon a cada 24 h.

Figura 20 - Ensaio *Allium cepa* sp. (cebola).



FONTE: Do Autor (2022).

Após o período indicado de 7 (sete) dias, foram então avaliadas o número de raízes que cresceram, a medição do comprimento da maior raiz e a biomassa de todas as raízes.

Além da utilização de dois tipos de hortaliças para avaliação de toxicidade, foram utilizados também o microcrustáceo *Artemia* sp como bioindicador.

Segundo Siqueira et al. (1998), o ensaio de toxicidade com *Artemia* sp possui algumas vantagens relativas à agilidade do teste, o baixo custo, eficiente e é possível realizar com uma pequena quantidade de amostra (2 – 20 mg). Salienta ainda a simplicidade desse teste, não necessita de métodos assépticos e nem equipamentos especiais, favorece sua utilização rotineira, e pode ser desenvolvido no laboratório.

A *Artemia* salina, microcrustáceo que tem como ambiente natural a água salgada, é utilizada como alimento vivo para peixes. Os ovos de *Artemia* salina são encontrados em lojas especializadas, como as lojas de aquarismo.

O ensaio consistiu, primeiramente, em adicionar em um erlenmeyer de 250 mL, o volume de 100 mL de solução salina 0,9% (0,9 g de sal marinho em 100 mL de água). Foi então inserido os ovos de *Artemia* sp.

Para a eclosão dos ovos de *Artemia* sp foi necessário mantê-los em uma estufa aquecida a 30 °C por um período de 48 h, com auxílio de injeção de ar comprimido (compressor de aquário) e ao abrigo da luz.

Para o ensaio de ecotoxicidade utilizando *Artemia* sp. como bioindicador, foram preparadas as amostras da seguinte forma:

- Na solução solubilizada foi adicionado sal marinho em uma concentração de 0,9%, em todas as amostras;
- Para cada amostra foi transferido 3 mL para o poço da placa (Figura 21);
- Dez indivíduos de *Artemia* sp. foram adicionados nos poços das placas, com o auxílio de uma pipeta;
- As placas foram armazenadas ao abrigo da luz, no escuro, em temperatura ambiente;
- Passado o período de 24 h foi realizado a contagem do número de indivíduos sobreviventes em cada poço, com a auxílio de microscópio.

Figura 21 - Poços da placa contendo *Artemia* sp.

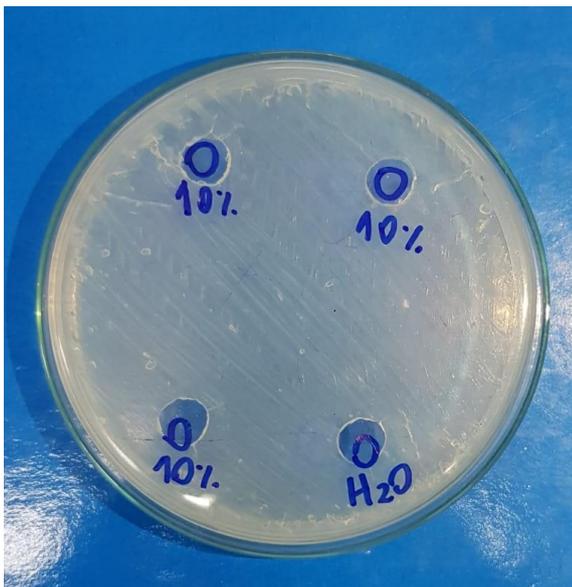


FONTE: Do Autor (2022).

Por fim, para ensaios de exotoxicidade, foram utilizadas bactérias Gram-positivas, *Staphylococcus aureus* e Gram-negativas *Escherichia coli*, nas amostras já mencionadas para ADF, referência e água mineral (grupo controle). Para isso, foi utilizado 100  $\mu$ L de cada amostra solubilizada por meio de difusão em meio ágar.

A aplicação foi realizada em um orifício de diâmetro 10 mm (Figura 22) em meio de cultura padrão, *Plate Count Agar* (PCA) dispostos em placas Petri contendo uma espécie de bactéria.

Figura 22 - Placas petri – ensaio corpo de prova ADF 10%.



FONTE: Do Autor (2022).

O procedimento consistiu em incubar as amostras contendo bactérias a uma temperatura de aproximadamente 37 °C por um período de 18 h.

A avaliação de toxicidade foi determinada, quando presente, pela distância expressa em mm entre as bactérias em estado de crescimento e a borda do orifício. A condição de formação de halo é indicativa de inibição de crescimento proveniente da exposição às amostras teste (BORTOLOTTI, et al, 2009).

Os ensaios foram realizados pelo Laboratório de Desenvolvimento de Biomateriais e Materiais Antimicrobianos (LADEBIMA), do I. Parque/UNESC. Os resultados dos bioensaios foram analisados pelo software *GraphPadPrism*.

Com o objetivo de avaliar o comportamento da massa asfáltica com o resíduo incorporado, foi submetido o material retirado de um corpo de prova aos mesmos ensaios realizados para as amostras de resíduos. A justificativa para a realização destes ensaios em corpos de prova foi para verificar se nas condições destes testes poderia haver liberação de contaminantes do resíduo para lixiviação

Para isso, os corpos de prova resultantes do teste de compressão diametral foram “quebrados” até que os seus fragmentos fossem reduzidos de forma a passar pela peneira de malha 9,5 mm. Os referidos fragmentos foram utilizados para os ensaios de conformidade ambiental. Os procedimentos para determinação de lixiviação e solubilização dos corpos de prova seguiram os descritos no item 4.2.1.1. As amostras (Figura 23) selecionadas para o ensaio foram:

- Corpo de prova sem incorporação (0%) de ADF (60% Pó de Pedra);
- Corpo de prova com incorporação de 5% de ADF em substituição parcial ao Pó de Pedra;
- Corpo de prova com incorporação de 7,5% de ADF em substituição parcial ao Pó de Pedra.
- Corpo de prova com incorporação com incorporação de 10% de ADF em substituição parcial ao Pó de Pedra;
- Areia descartada de fundição *blend*;
- Água Mineral.

Figura 23 - Amostras preparadas para obtenção de extrato solubilizado.



FONTE: Do Autor (2022).

#### 4.2.7.1. Análise Estatística

Todos os resultados obtidos pelos ensaios de ecotoxicidade foram submetidos a análise estatística por meio de análise de variância (ANOVA) não paramétrico. Os testes foram realizados com *post hoc* aplicáveis a cada ensaio, por meio de software GraphPad Prism 7.0, com nível de significância de valor  $p < 0,05$  (95% de confiança para toxicidade comparado ao grupo controle – água mineral). Os resultados obtidos foram expressos em média  $\pm$  desvio padrão.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 CLASSIFICAÇÃO DA AREIA DESCARTADA DE FUNDIÇÃO - ADF

#### 5.1.1 Análise de Caracterização de Resíduo Sólido ABNT NBR10004:2004

Os resultados dos ensaios da classificação da areia descartada de fundição utilizada nesse trabalho estão expressos na Tabela 5 para as propriedades físico-químicas.

Tabela 5 - Características físico-químicas.

| <b>Características Físico-Químicas</b> |   |
|--|---|
| Aspecto                                | Sólido (areia de fundição úmida e fina contendo escórias e partículas beges não identificadas). |
| Cor                                    | Cinza Claro   |
| Odor                                   | Inodoro   |
| Umidade a 105 °C                       | 3,19%   |
| Densidade                              | 1,65 g/cm <sup>3</sup>  |
| Líquidos livres                        | Ausente   |

FONTE: Relatório de Ensaio N° 316 (2016)

A amostra de ADF apresentou aspecto sólido, úmida e fina contendo escórias e partículas beges não identificadas, cor cinza claro e inodoro. A umidade foi de 3,19%, enquanto a densidade apresentada foi de 1,65 g/cm<sup>3</sup>.

O resultado de ensaio na Tabela 6 de massa bruta para reatividade não apresentou (abaixo do limite de detecção) ácido cianídrico (HCN). Contudo, há a presença de ácido sulfídrico (H<sub>2</sub>S) com valor apresentado de 60,72 mg/kg. A norma ABNT NBR 10004:2004, letra d do item 4.2.1.3 “reatividade” estabelece um limite liberável por kg de resíduo de 500 mg/kg. Portanto aproximadamente 8 vezes menor que o limite estabelecido pela referida norma.

Tabela 6 - Massa bruta – reatividade.

| Parâmetros                          | Unidades | Resultados    | Limite Liberável por kg de Resíduo | Limite de Quantificação |
|-------------------------------------|----------|---------------|------------------------------------|-------------------------|
| Ácido Cianídrico (HCN)              | mg/kg    | Não Detectado | 250 mg de HCN                      | 0,05                    |
| Ácido Sulfídrico (H <sub>2</sub> S) | mg/kg    | 60,72         | 500 mg de H <sub>2</sub> S         | 0,05                    |

FONTE: Relatório de Ensaio N° 316 (2016)

O ácido sulfídrico, também conhecido como sulfeto de hidrogênio ou como gás de esgoto, cuja fórmula química é  $H_2S$ . Trata-se de um gás incolor e inflamável. Possui forte e desagradável odor de “ovos podres”, também é referido como “gás de cano de esgoto”. Solúvel em água e etanol pode ser preparado pela ação de ácidos minerais em sulfeto metálico. Ocorre geralmente pela ação entre o ácido clorídrico e sulfeto de ferro.

Segundo a *Centers for Disease Control and Prevotion* (2022), o ácido sulfídrico pode ocasionar, por meio das rotas de exposição a seres humanos nas vias respiratórias, pele e/ou contato visual, sintomas como irritação nos olhos, apneia, coma, convulsões, conjuntivite, complicações na visão, tonturas, dores de cabeça, dentre outros.

Conforme na Tabela 6 o  $H_2S$  o valor obtivo no ensaio está abaixo do limite tolerável pela norma. Portanto, cabe ressaltar que a amostra avaliada não é reativa.

O resultado de ensaio de massa bruta para corrosividade apresentou pH 10, conforme Tabela 7.

Tabela 7 - Massa bruta - corrosividade

| Parâmetro        | Unidade       | Resultado | Limite      | Limite de Quantificação |
|------------------|---------------|-----------|-------------|-------------------------|
| pH em água (1:1) | Não analisado | 10        | >2 ou <12,5 | 0,1                     |

FONTE: Autor 2022

Segundo ABNT NBR 10004:2004, um resíduo é caracterizado como corrosivo se uma amostra representativa, obtida segundo a ABNT NBR 10007, apresentar uma das seguintes propriedades:

- Apresentar característica aquosa e pH inferior ou igual a 2, ou, superior ou igual a 12,5;
- Sua mistura com água, na proporção de 1:1 em peso, produzir uma solução que apresente pH inferior a 2 ou superior ou igual a 12,5;
- Ser líquida ou, quando misturada em peso equivalente de água, produzir um líquido e corroer o aço (COPANT 1020) a uma razão maior que 6,35 mm ao ano, a uma temperatura de 55 °C, de acordo com USEPA SW 846 ou equivalente.

Trabalhos anteriores reportam que o pH das ADF tem variação dependendo do ligante empregado na mistura. Sabendo que a mistura é composta por resinas e catalisadores (compostos fenólicos, hidrocarbonetos aromáticos policíclicos e uma grande variedade de compostos orgânicos), quando resinas fenólicas são utilizadas o pH final pode variar entre 4 e 8 (JOHNSON, 1981; ALVES, 2012; DUNGAN e REEVES, 2005; Ji et al., 2001). No caso de areia verde, o pH pode ter variação de 6,7 a 10,2 com mediana de pH 8,8. Isso demonstra que as areias verdes possuem um pH normalmente alcalino (DUNGAN e DEES, 2007; ALVES, 2012).

Algumas ADFs podem apresentar potencial corrosivo para metais devido a presença de fenóis. O agente químico fenol é uma das maiores preocupações quanto a reutilização das ADF (SIDDIQUE e NOUMOWE, 2008; FHWA, 2016).

O apresentado pela ADF usada neste trabalho foi pH = 10,0 (mistura com a água na proporção de 1:1 em peso) e não ultrapassou o limite estabelecido pela ABNT NBR 10004:2004, letra a do item 4.2.1.2 “Corrosividade”.

Além desse ensaio a amostra de ADF foi submetida ao ensaio de lixiviação para avaliação de toxicidade, conforme os resultados seguem descritos na Tabela 8 e 9.

Tabela 8 – Lixiviação de elementos inorgânicos

| <b>Parâmetros</b> | <b>Unidades</b> | <b>Resultados</b> | <b>Limite Máximo no Lixiviado</b> | <b>Limite de Quantificação</b> |
|-------------------|-----------------|-------------------|-----------------------------------|--------------------------------|
| Arsênio           | (mg/L)          | <0,001            | 1,0                               | 0,001                          |
| Bário             | (mg/L)          | <0,5              | 70,0                              | 0,5                            |
| Cádmio            | (mg/L)          | <0,005            | 0,5                               | 0,005                          |
| Chumbo            | (mg/L)          | <0,01             | 1,0                               | 0,01                           |
| Cromo Total       | (mg/L)          | 0,04              | 5,0                               | 0,02                           |
| Fluoreto          | (mg/L)          | <0,1              | 150,0                             | 0,1                            |
| Merúrio           | (mg/L)          | <0,001            | 0,1                               | 0,001                          |
| Prata             | (mg/L)          | <0,01             | 5,0                               | 0,01                           |
| Selênio           | (mg/L)          | <0,001            | 1,0                               | 0,001                          |

FONTE: Do Autor (2022).

Tabela 9 - Dados do ensaio de lixiviação

|                           |       |
|---------------------------|-------|
| Teor de sólidos secos (%) | 96,81 |
| Solução Extratora nº      | 1     |
| pH inicial                | 9,1   |
| pH final                  | 5,0   |
| Tempo de Lixiviação (h)   | 18    |
| Volume Lixiviado (mL)     | 300   |

FONTE: Do Autor (2022).

A toxicidade avaliada pelo ensaio de lixiviação, segundo a ABNT NBR 10004:2004, considera um resíduo como tóxico caso uma amostra representativa, obtida conforme a ABNT NBR 10007, apresentar uma das seguintes propriedades:

- Extrato obtido pela ABNT NBR 10005 apresentar contaminantes com concentrações acima dos estabelecidos pelo anexo F da ABNT NBR 10004:2004;
- Deve apresentar toxicidade em uma ou mais substâncias no anexo C, considerando os seguintes fatores:
  - natureza da toxicidade;
  - concentração do constituinte;
  - potencial de degradação e migração para o ambiente;
  - persistência de sua degradação;
  - potencial de sua degradação;
  - extensão de sua degradação de capaz de bioacumulação nos ecossistemas;
  - presença de agente teratogênico, mutagênico, carcinogênico ou ecotóxico, isoladamente ou por sinergismo entre substâncias constituintes do resíduo;
- Constituído por restos de embalagens contaminadas ou com substâncias apresentadas nos anexos D ou F;
- Produto de derramamento, fora de especificação ou validade com substâncias apresentadas nos anexos D ou E;
- Comprovadamente letal ao homem;
- Apresente substância letal ao homem ou estudos DL50 oral para ratos menor que 50 mg/kg ou CL50 inalação para ratos menor que 2 mg/L ou uma DL50 dérmica para coelhos menor que 200 mg/kg.

Segundo CETESB (2022), o conceito de toxicidade de uma substância química é a capacidade de causar dano em um órgão determinado, alterar os processos bioquímicos ou alterar um sistema enzimático.

O resultado apresentado para toxicidade por lixiviação, segundo ABNT NBR 10004:2004), aponta que os parâmetros analisados não ultrapassaram os limites máximos estabelecidos pelo anexo F, letra a do item 4.2.1.4 Toxicidade da ABNT NBR 10004:2004. Dessa forma, o resíduo analisado é classificado como: Não perigoso – Classe II.

A amostra de ADF foi submetida também ao ensaio de solubilização para avaliação de toxicidade, conforme os resultados seguem descritos nas Tabelas 15 e 16. Observa-se que os elementos alumínio e ferro estão acima do estabelecido pela referida norma.

Tabela 10 - Ensaio de solubilização

| Parâmetros    | Unidades | Resultados     | Limite Máximo no Lixiviado | Limite de Quantificação |
|---------------|----------|----------------|----------------------------|-------------------------|
| Alumínio      | (mg/L)   | <b>&lt;0,8</b> | <b>0,2</b>                 | 0,1                     |
| Arsênio       | (mg/L)   | <0,001         | 0,01                       | 0,001                   |
| Bário         | (mg/L)   | <0,5           | 0,7                        | 0,5                     |
| Cádmio        | (mg/L)   | <0,0001        | 0,005                      | 0,0001                  |
| Chumbo        | (mg/L)   | <0,001         | 0,01                       | 0,001                   |
| Cianeto       | (mg/L)   | Não Analisado  | 0,007                      | 0,005                   |
| Cloreto       | (mg/L)   | 6,6            | 250,0                      | 0,1                     |
| Cobre         | (mg/L)   | <0,01          | 2,0                        | 0,01                    |
| Cromo Total   | (mg/L)   | 0,04           | 0,05                       | 0,02                    |
| Fenóis Totais | (mg/L)   | <0,005         | 0,01                       | 0,005                   |
| Ferro         | (mg/L)   | <b>1,12</b>    | <b>0,3</b>                 | 0,02                    |
| Fluoreto      | (mg/L)   | Interferente   | 1,5                        | 0,1                     |
| Manganês      | (mg/L)   | <0,01          | 0,1                        | 0,01                    |
| Mercúrio      | (mg/L)   | <0,001         | 0,001                      | 0,001                   |
| Nitrato       | (mg/L)   | 1,7            | 10,0                       | 0,1                     |
| Prata         | (mg/L)   | <0,01          | 0,05                       | 0,01                    |
| Selênio       | (mg/L)   | <0,001         | 0,01                       | 0,001                   |
| Sódio         | (mg/L)   | 64,64          | 200,0                      | 0,01                    |
| Sulfato       | (mg/L)   | <2             | 250,0                      | 2                       |
| Surfactantes  | (mg/L)   | 0,2            | 0,5                        | 0,1                     |
| Zinco         | (mg/L)   | <0,01          | 5,0                        | 0,01                    |

FONTE: Relatório de Ensaio N° 316 (2016)

Tabela 11 - Dados da solubilização

|                                    |      |
|------------------------------------|------|
| Unidade a 42 °C (%)                | 3,14 |
| pH inicial                         | 9,7  |
| pH do extrato solubilizado (final) | 9,6  |

FONTE: Relatório de Ensaio N° 316 (2016)

A presença de alumínio e ferro acima dos limites máximos estabelecidos é proveniente do processo de fundição. Segundo a *American Foundrymen's Society* apud FHWA (2016) a areia descartada de fundição consiste principalmente em areia de sílica com revestimento fino de carbono queimado, aglutinante (resinas e catalisadores, nesse caso) e poeira.

Demais parâmetros apresentados estão abaixo do limite máximo no extrato. Dessa forma, considerando os resultados obtidos para massa bruta (reatividade e corrosividade), lixiviação e solubilização, conforme prevê a ABNT NBR 10004:2004, o resíduo: areia descartada de fundição – ADF analisado é classificado como Resíduo Classe IIA – Não Inerte.

Neste sentido, um resíduo classificado como Classe IIA - Não inerte pode ter potencial de valorização e aplicação como matéria-prima em novos processos produtivos.

## 5.2 CARACTERIZAÇÃO DA AREIA DESCARTADA DE FUNDIÇÃO - ADF

### 5.2.1 Análise Química: Fluorescência de Raios X

A Tabela 12 apresenta a análise da composição química das areias descartadas de fundição obtidas por fluorescência de raios X (FRX). Os resultados estão expressos em óxidos e pode-se observar que há a presença majoritária de óxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) com o teor de 96,85% para amostra de areia de moldagem e 97,54% para os finos de exaustão. Além disso, se percebe quantidades residuais mais significativas de óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 0,4%) e óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , 0,28%) o que já era esperado, já que o ensaio de classificação já mostrou quantidades superiores ao recomendado solubilizadas dos metais Al e Fe. O  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e o  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , assim como os demais residuais são esperados, pois no processo de fundição há a presença desses constituintes na matéria-prima (sucata) utilizada e

eventualmente impurezas presentes na própria matéria prima ou originadas durante o processo. Também é possível observar quantidades residuais menores de óxidos de cálcio, magnésio, sódio, enxofre, fósforo, titânio, cobalto, cromo, zinco e zircônio.

As areias de fundição ainda virgens possuem material constituinte uniforme, ou seja, SiO<sub>2</sub>. Entretanto, após a passagem pelo processo de fundição a areia frequentemente passa a conter resíduos de metais, moldes e machos. Esses podem conter também os ligantes (resinas e catalisadores) parcialmente degradados (WINKLER & BOLSHAKOV, 2000; CHEGATTI, 2004).

Esses ligantes podem inclusive ser identificados em termos de perda ao fogo. A perda ao fogo apresentada para amostra de moldagem foi de 2,004% e para os finos de exaustão de 1,398%. Tais valores estão relacionados, muito provavelmente, as resinas e catalisadores (MASTELLA, 2013).

Tabela 12 - Determinação da análise química por FRX

| <b>Constituinte</b>            | <b>Percentual Moldagem (%)</b> | <b>Percentual Exaustão de exaustão (%)</b> |
|--------------------------------|--------------------------------|--|
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,401                          | 0,339                                      |
| CaO                            | <0,05                          | <0,05                                      |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,282                          | 0,282                                      |
| K <sub>2</sub> O               | <0,05                          | <0,05                                      |
| MgO                            | 0,051                          | <0,05                                      |
| Na <sub>2</sub> O              | <0,05                          | <0,05                                      |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | <0,05                          | <0,05                                      |
| SiO <sub>2</sub>               | 96,856                         | 97,543                                     |
| TiO <sub>2</sub>               | <0,05                          | <0,05                                      |
| BaO                            | N.D.                           | N.D.                                       |
| Co <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | <0,05                          | <0,05                                      |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | <0,05                          | <0,05                                      |
| PbO                            | N.D.                           | N.D.                                       |
| SrO                            | N.D.                           | N.D.                                       |
| ZnO                            | <0,05                          | <0,05                                      |
| ZrO <sub>2</sub> /Hf           | <0,05                          | <0,05                                      |
| Perda ao Fogo                  | 2,004                          | 1,398                                      |

FONTE: Do Autor (2022).

As amostras de areia de moldagem e finos de exaustão apresentaram composição química muito similar. Isso indica que para uma aplicação que requeira valores percentuais muito próximos de SiO<sub>2</sub>, ou ainda, quantidades controláveis de resíduos a base de Fe ou Al qualquer uma das areias, ou uma mistura das duas pode ser utilizada.

Vale ressaltar que a areia descartada de fundição pode sofrer alteração em sua composição química por conta do tipo de metal fundido, processo e se há algum aglomerante (resinas e catalisadores) orgânico ou não. Contudo, apesar de esse fator precisar ser analisado em cada caso, geralmente, as composições químicas são constantes (MAIA, 2017). As quantidades de  $\text{SiO}_2$  e residuais de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  encontradas para as areias utilizadas neste trabalho são similares a outros trabalhos da literatura. A *American Foundrymen's Society* publicou em 2016 uma tabela com composição química em óxidos para ADF em que é possível constatar os percentuais em massa desses constituintes e verificar a similaridade com os resultados apresentados na Tabela 12. Naquele caso, quantidades maiores de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  foram observadas (4,7%). Isso se deve provavelmente ao processo utilizado, podendo ser a própria matéria prima (sucata), areia virgem, aglomerantes e impurezas. Mesmo considerando esses percentuais, cabe ressaltar que o  $\text{SiO}_2$  ainda é o elemento majoritário com mais de 87% da composição.

Segundo Mastella (2013), resultados para composição química em termos de óxidos, obtidos fluorescência de raios X, revelam percentual também majoritário, em termos de massa, para o elemento silício (96%), na forma de  $\text{SiO}_2$  (fase quartzo). Além disso, outros óxidos foram identificados, tais como  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (0,45%),  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (0,37%),  $\text{Na}_2\text{O}$  (0,19%) e  $\text{TiO}_2$  (0,11%).

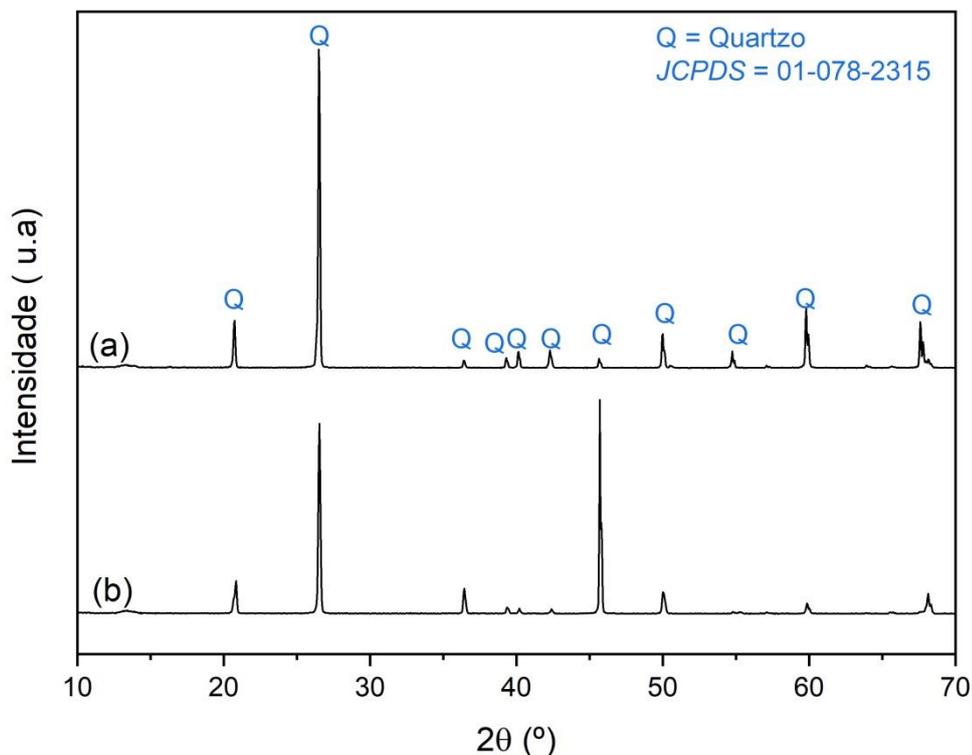
### 5.2.2 Fases cristalinas presentes: Difração de Raios X

A Figura 24 mostra os resultados da análise de difração de raios X para as amostras das areias descartadas de fundição de moldagem (a) e de finos de exaustão (b). Observa-se a presença apenas da fase cristalina quartzo, tanto para a amostra de finos de exaustão quanto para a amostra de moldagem. Esse resultado já era esperado já que aproximadamente 97% da areia de fundição é composta por sílica. Os demais elementos, estão contidos em fase amorfa ou em fases cristalinas com quantidade insuficiente para fins de detecção por difratometria de raios X.

Resultados similares foram encontrados em outros trabalhos da literatura como Maia (2017) e Mastela (2013). Siroma (2018) também encontrou com predominância a fase cristalina quartzo. Contudo, identificou também a presença de fase cromita. É comum o uso de areia de cromita em moldes de fundição, pois

possui excelentes propriedades em altas temperaturas, além de oferecer alta resistência à penetração do metal líquido.

Figura 24 - Difração de raios X (a) ADF moldagem; (b) ADF finos de exaustão.



FONTE: Do Autor (2022)

### 5.2.3 FTIR

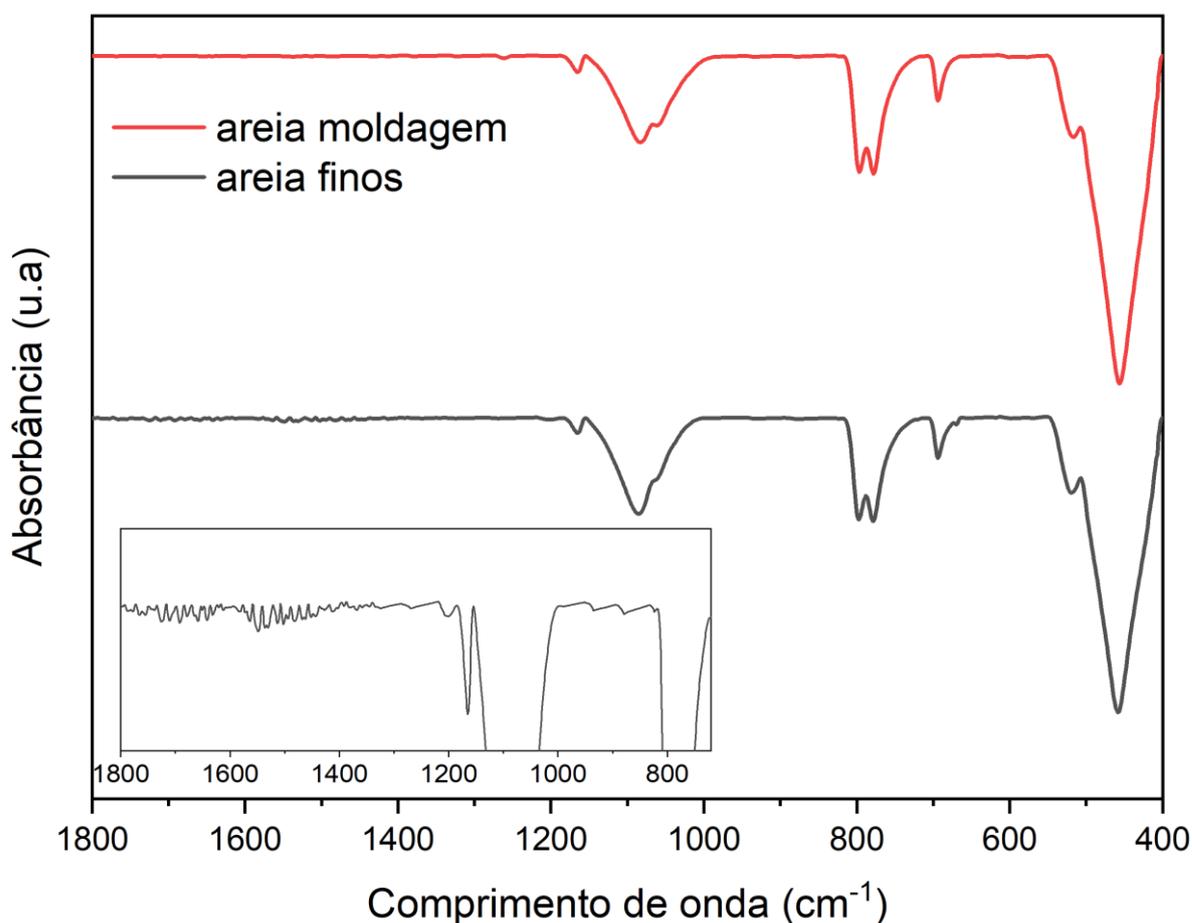
As areias de fundição de moldagem e finos de exaustão foram analisadas quanto às suas ligações químicas por espectroscopia de infravermelho, e o espectro de FTIR obtido é apresentado na Figura 25. Foram encontradas bandas de absorção em  $451$  e  $1090\text{ cm}^{-1}$  que se referem à presença do Si-O e entre  $691$  e  $800\text{ cm}^{-1}$  que bandas características da presença de quartzo (SANTOS (2011)). De acordo com Lyra (2012), a banda  $1170\text{ cm}^{-1}$  é referente à provável presença de carvão na areia de fundição.

A literatura reporta que quando o espectro infravermelho da resina presente na areia de fundição é analisado à temperatura ambiente, tem-se uma banda no comprimento de onda de  $1720\text{ cm}^{-1}$ , típico das ligações C=O dos aldeídos; uma banda fina e de intensidade média em aproximadamente  $1595\text{ cm}^{-1}$ , característico

das vibrações de núcleo aromático C=C; uma banda intensa em  $1200\text{ cm}^{-1}$ , peculiar da ligação C-O dos grupos fenólicos e uma banda no comprimento de onda próximo a  $750\text{ cm}^{-1}$  que é característico do grupo  $-(\text{CH}_2)_n$ .

Nenhuma dessas bandas foi encontrada com intensidade suficiente para ser observada nas amostras de ADF. Porém, ao ampliar a Figura, pequenas bandas, nas regiões indicadas podem ser observadas, indicando a presença de pequenas quantidades de resina fenólica.

Figura 25 - Espectro de FTIR obtido para ADF moldagem e finos de exaustão.



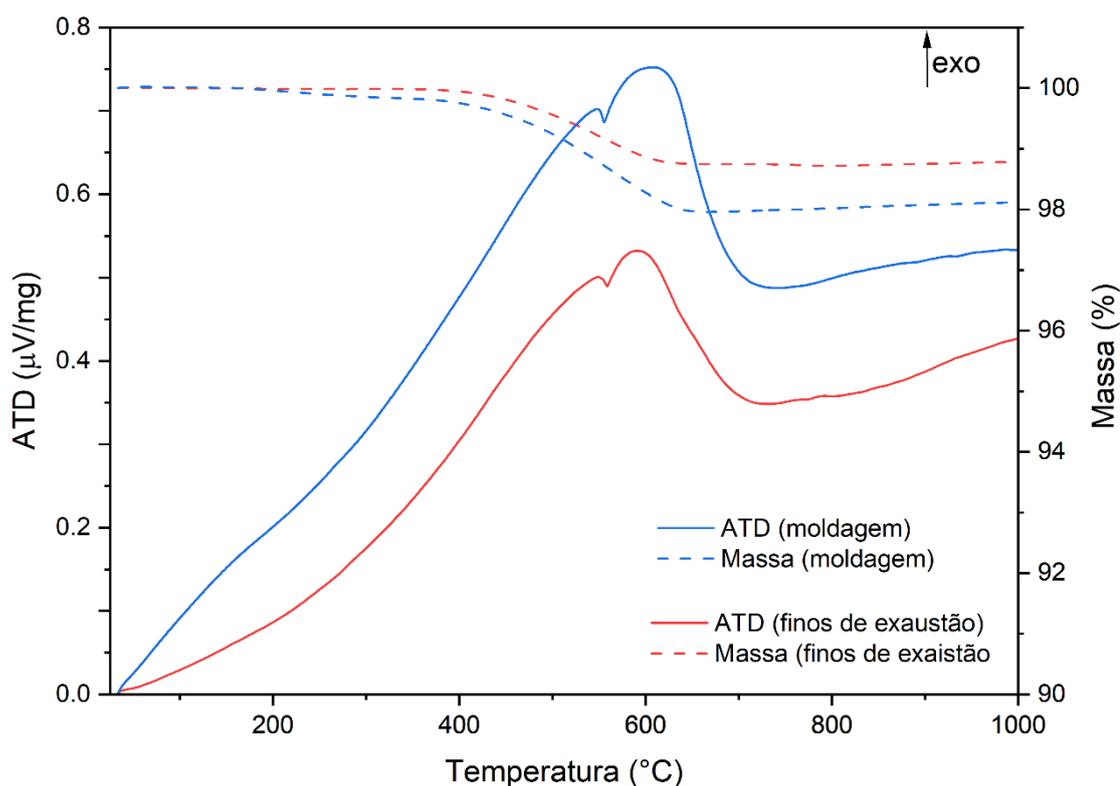
FONTE: Do Autor (2022)

#### 5.2.4 Análise Térmica (ATD/TGA)

As areias de moldagem e finos foram submetidas à análise térmica diferencial (ATD) e análise termogravimétrica (TGA), a fim de avaliar o comportamento de tais areias quando aquecidas (Figura 26). Observa-se que na faixa de temperatura de 400 a 630  $^{\circ}\text{C}$  há uma perda em massa de 3% para a areia

de moldagem e 1,3% para os finos de exaustão. Essa perda em massa ocorre na mesma faixa de temperatura de um evento exotérmico. Esse evento exotérmico possui dois picos de liberação de calor. O evento é atribuído às reações de decomposição da resina fenólica presente na areia de fundição (KNOP & SCHEIB, 1979). Vale salientar que as resinas fenólicas utilizadas nas areias apresentam elevada resistência ao calor, não sofrem ignição espontânea, não propagam chamas e têm baixos índices de emissão de fumaça e gases tóxicos, quando comparadas a outros materiais poliméricos (KNOP & SCHEIB, 1979). O mecanismo de decomposição térmica das resinas fenólicas ocorre em múltiplos estágios que envolvem a volatilização de água e espécies não reagentes, a quebra das cadeias principais e a formação de produto carbonizado.

Figura 26 - Análise térmica diferencial (ATD) e análise termogravimétrica (ATG) para ADF moldagem e finos de exaustão.



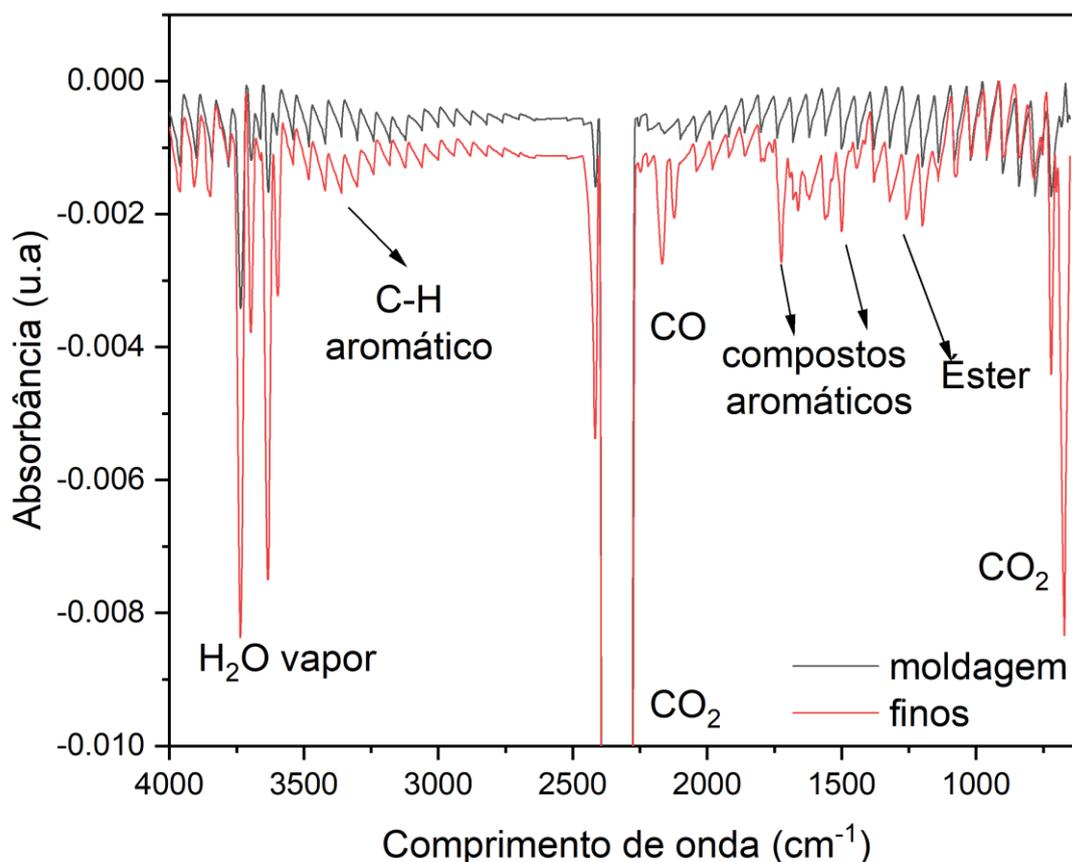
FONTE: Do Autor (2022).

O que se percebe mais claramente nas amostras de areia de fundição é o estágio de decomposição, caracterizado principalmente por reações de cisão da cadeia com eliminação de produtos voláteis (KNOP & SCHEIB, 1979). Neste

estágio, a taxa de reação atinge seu máximo, com produção de uma variedade de gases voláteis, tais como  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ , metano, fenol, cresóis e xilenóis (MOURITZ, MATHYS & GIBSON, 2006). Esses gases foram parcialmente detectados por meio de um equipamento de infravermelho foi acoplado às análises térmicas, analisando simultaneamente os gases de decomposição. A Figura 27 mostra o espectro infravermelho obtido na temperatura de 577 °C (Temperatura com maior taxa de liberação de gases) que mostra a evolução dos gases na região do infravermelho.

Observa-se a presença de vapor de água ( $\text{H}_2\text{O}$ , na região de 3500-4000  $\text{cm}^{-1}$  e 1740  $\text{cm}^{-1}$ ),  $\text{CO}_2$  (banda acentuada em 2360  $\text{cm}^{-1}$  e em 674  $\text{cm}^{-1}$ ) e  $\text{CO}$  (uma banda em 2197) (NGOHANG et al., 2014). Éster e compostos aromáticos, típicos de decomposição de compostos fenólicos podem ser observados (TANG et al., 2020).

Figura 27 - Gráfico obtido na temperatura de 577 °C para ADF moldagem e finos de exaustão.



FONTE: Do Autor (2022).

A partir das análises térmicas realizadas, pode-se perceber que a queima da areia de fundição pode ter o agravante de liberação dos compostos fenólicos aromáticos tóxicos para a atmosfera, transferindo o problema para outra via.

Reutilizações da areia de fundição em processos que não ultrapassem a temperatura de 400 °C podem ser mais interessantes, como exemplo a incorporação da ADF em massa asfáltica onde o processo não ultrapassa a temperatura de 170°C.

### 5.2.5 Análise granulométrica

A Tabela 13 mostra os resultados da distribuição granulométrica das amostras de moldagem e finos de exaustão.

Observa-se que para a peneira de nº 10 de tamanho 2 mm, a areia de moldagem teve 0,016% retido, enquanto os finos de exaustão tiveram 0,073% retido. Para a peneira de malha nº 40 de tamanho 0,42 mm, a areia de moldagem obteve maior percentual retido em relação aos finos de exaustão, apresentando 4,74 e 2,36%, respectivamente. Nas malhas nº 80 (0,18 mm) e 200 (0,075), os percentuais retidos para areia moldagem foram menores em relação aos finos de exaustão. Contudo, o “fundo” apresentou percentual de finos de exaustão com percentual de 0,067%, enquanto a areia de moldagem foi de 0,064%.

A alternância entre os resultados obtidos em percentuais retidos, neste caso, pode ocorrer devido à presença de impurezas no processo de exaustão. Condição essa observada na análise morfológica que será discutida adiante.

Tabela 13 - Análise granulométrica ADF moldagem e finos de exaustão

| <b>Peneira</b> | <b>Tamanho (mm)</b> | <b>Moldagem (%)</b> | <b>Finos de Exaustão (%)</b> |
|----------------|---------------------|---------------------|------------------------------|
| <b>n° 10</b>   | 2,0                 | 0,016               | 0,073                        |
| <b>n° 40</b>   | 0,42                | 4,74                | 2,36                         |
| <b>n° 80</b>   | 0,18                | 93,39               | 94,48                        |
| <b>n° 200</b>  | 0,075               | 1,61                | 2,70                         |
| <b>FUNDO</b>   |                     | 0,064               | 0,067                        |
| <b>Total</b>   |                     | 99,82               | 99,68                        |

FONTE: Do Autor (2022).

### 5.2.6 Análise Morfológica

Para elucidar os resultados da análise granulométrica, imagens das areias utilizando um microscópio foram obtidas. Observa-se que, de fato, há a presença de impurezas na amostra de finos de exaustão. As impurezas apresentam cores e tamanho diferente. Enquanto as partículas escuras (provavelmente finos de areia de fundição) possuem tamanho médio (medido por análise de imagem) de 0,25 mm, as impurezas possuem tamanho acima de 1 mm. Para a areia de moldagem, observa-se uma homogeneidade maior de tamanho e não há presença de impurezas de outra cor. Além disso, o tamanho médio é de 0,35 mm.

Figura 28 – Morfologia da ADF finos de exaustão (a) e moldagem (b)



FONTE: Do Autor (2022).

Segundo Senço (2008), a avaliação morfológica quanto a forma externa dos agregados é fator que define as propriedades e comportamento da camada de rolamento sob a influência do tráfego. O melhor comportamento quando a morfologia está atrelada aos grãos cúbicos e esféricos, em comparação aos grãos alongados ou “chatos”. Isso se deve pela possível alteração granulométrica em razão da quebra mais fácil desses grãos alongados ou “chatos”. Essa condição pode inutilizar o projeto e construção do pavimento.

Com relação à forma, percebe-se que as areias tanto de moldagem, quanto os finos de exaustão, possuem forma irregular, bem característica de areias em geral. Contudo, analisando a Figura 28, observa-se presença de partículas de

formato arredondado (esféricos) e alongados, com maior predominância de partículas arredondadas.

### 5.2.7 Densidade Real

A densidade real medida por picnometria das areias de moldagem e de finos de exaustão e apresentada na Tabela 14.

Tabela 14 - Densidade real ADF moldagem e finos de exaustão

|                | <b>Areia de Moldagem<br/>(g/cm<sup>3</sup>)</b> | <b>Finos de Exaustão<br/>(g/cm<sup>3</sup>)</b> |
|----------------|---|---|
| Densidade real | 2,61  | 2,64  |

FONTE: Do Autor (2022).

Observa-se que a densidade real dos finos de exaustão é levemente maior que a densidade da areia de moldagem. Esse fato pode estar relacionado à presença de impurezas, ou mesmo à presença das partículas maiores presentes na amostra de finos, como mostrado nas imagens da Figura 28.

Vale ressaltar que o SiO<sub>2</sub> puro possui densidade real de 2,65 g/cm<sup>3</sup> e que as amostras se aproximam deste valor. Neto (2004) também avaliou a densidade real de areias de fundição, encontrando valor de 2,651 g/cm<sup>3</sup>, muito próximo aos encontrados nesse trabalho.

## 5.3 DADOS DE PRODUÇÃO, VIABILIDADE E CUSTOS DE DESCARTE EM ATERROS SANITÁRIOS

Como mencionado, o volume de areias gerado no processo de fundição é extremamente elevado. Somente na empresa Metalúrgica DS, que forneceu as amostras para o desenvolvimento desse trabalho, esse volume é de aproximadamente 400 t/mês. Atualmente, tais resíduos são descartados em aterro industrial, conforme previsão da licença ambiental vigente.

A Tabela 15, segundo boletim de desempenho de resíduos sólidos em Santa Catarina para o ano de 2021, mostra dados referentes à geração de resíduos sólidos em função da Classe.

Tabela 15 - Boletim de desempenho – geração por classe de resíduos sólidos ano 2021

| Classe         | Ano Referência 2021 |       |              |
|----------------|---------------------|-------|--------------|
|                | I                   | IIA   | IIB          |
|                | 4,3%                | 68,9% | 26,8%        |
| Quantidade (t) |                     |       | 7.765.436,06 |

FONTE: IMA (2022).

Analisando a Tabela 15, é possível identificar que a parcela majoritária de geração de resíduos é concentrada na Classe IIA, em comparação com anos anteriores (IMA, 2022) e ainda mantém o mesmo cenário característico de geração. Importante ressaltar que há nessa Classe os resíduos sólidos IIA Inertes e Não Inertes. A ADF conforme visto anteriormente está enquadrada como resíduo Classe IIA Não Inerte.

A Tabela 16, segundo boletim de desempenho de resíduos sólidos em Santa Catarina para o ano de 2021, mostra dados referentes à destinação de resíduos sólidos em razão da tecnologia de destinação final.

Tabela 16 - Boletim de desempenho – destinação de resíduos ano 2021

| Ano Referência 2021            |                          |
|--------------------------------|--------------------------|
| Tecnologia de Destinação Final | Percentual Destinado (%) |
| Coprocessamento                | 4,7                      |
| Tratamento                     | 8,2                      |
| Aterro                         | 13,4                     |
| Recuperação Energética         | 26                       |
| Reciclagem                     | 41,3                     |
| Outros                         | 6,4                      |
| Quantidade (t)                 | 8.460.015,09             |

FONTE: IMA (2022).

Mesmo considerando as informações contidas na Tabela 15, relacionando tecnologias como coprocessamento, tratamento, recuperação energética e reciclagem, o aterro ainda possui expressiva parcela na destinação de resíduos sólidos em geral. No caso da ADF, as indústrias de fundição possuem tecnologias

para reciclar e reutilizar areia no seu próprio processo de produção, ou seja, é possível usar a mesma areia para fazer mais de um molde. No entanto, após algumas moldagens e desmoldagens, esgota-se a possibilidade de reciclagem e, com isso, a areia é descartada (BRONDINO e GALDINO, 2014). Tal descarte pode levar a custos elevados para as indústrias na destinação em aterros industriais, que por sua vez, elevam os custos dos processos produtivos e, sobretudo, continuam gerando passivos ao meio ambiente.

A Tabela 17 mostra informações relativas aos valores atualizados (fevereiro/2022) para destinação de ADF em aterro sanitário instalado em Içara, na região da AMREC (Associação dos Municípios da Região Carbonífera). Esse aterro é usualmente utilizado pelas empresas do ramo de fundição de ferro e aço para descarte dos seus resíduos sólidos – ADF também pela região da AMREC e AMUREL e AMESC.

A logística para destinação da ADF em tal aterro sanitário foi calculada utilizando como ponto de partida a localização da geradora no distrito de Caravaggio, município de Nova Veneza. A distância, o estoque acumulado de ADF da referida empresa, custo atualizado de destinação e custo logístico praticado por empresas terceirizadas é apresentado na Tabela 17.

Tabela 17 - Custos de destinação de ADF

|  | <b>Quantidade<br/>(t)</b> | <b>Distância<br/>(km)</b> | <b>Custo de<br/>Destinação<br/>no aterro<br/>por tonelada<br/>(R\$)</b> | <b>Custo<br/>Logístico<br/>(viagem<br/>capacidade<br/>de 35 t) (R\$)</b> | <b>Custo Total<br/>de<br/>Destinação<br/>(R\$)</b> |
|--|---------------------------|---------------------------|---|--|--|
| Resíduo<br>Classe<br>IIA<br>Não<br>Inerte<br>ADF | 4800                      | 29                        | 130,00  | 550,00   | 699.428,00   |

FONTE: Do Autor (2022).

Embora a quantidade seja resultante de acúmulo gerado durante aproximadamente 12 (doze) meses, é notório que o custo de destinação para o aterro industrial é elevado, representando valor mensal de destinação de aproximadamente R\$ 58.285,00. Esse valor, além de elevar consideravelmente os

custos de produção e, mesmo sendo destinado de forma ambientalmente correta (aterro industrial), não pode ser alternativa entendida como mais adequada para sua aplicação final, principalmente do ponto de vista ambiental.

Os resultados da caracterização inicial da ADF mostram um material rico em sílica, com composição homogênea e que pode conter quantidades residuais importantes de Al e Fe, dependendo do processo de produção. A resina fenólica e catalisador estão presentes em quantidades residuais, mas que podem ser ainda mais tóxicos quando aquecidos acima de 400 °C, quando gases da queima são liberados. Portanto, aplicações da areia de fundição que envolvam aquecimento a temperaturas elevadas como tijolos, telhas, vidros, fritas cerâmicas não devem ser consideradas. Filtros e lavadores de gases precisam ser instalados nestes casos (CHEGATTI, 2004).

Muitos trabalhos têm apontado para o bom desempenho da ADF em diversas áreas da construção civil que envolvem concretos e argamassas, especialmente como material alternativo aos agregados miúdos (GUNEY et al., 2006). Neste tipo de aplicação da ADF elementos poderiam representar riscos ao meio ambiente não foram encontrados no estado livre (DYER et al., 2018).

Entre as possibilidades de reutilização do resíduo, está a produção de concreto. No caso de concreto a partir de cimento Portland, os resultados mostraram que substituições parciais usando até 10% de ADF apresentam similaridade na resistência à compressão ou por vezes até mesmo ganho de resistência, dependendo de fatores como o tipo de ligante (MANOHARAN et al., 2017) e o resíduo de pó de carvão. Nesta aplicação também se percebe a obtenção de concretos menos permeáveis (BHARDWA e KUMAR, 2017), uma vez que a areia de fundição possui granulometria mais fina que a areia natural (SIDDIQUE; SCHUTTER; NOUMOWE, 2009; SINGH; SIDDIQUE, 2012). Este fator também implica na diminuição de trabalhabilidade. (MONOSI et al., 2013).

Ainda se percebe que apesar do potencial, não há legislação vigente para aplicar a areia de fundição neste setor da construção civil, e esta aplicação é então inviável.

O mesmo ocorre para a produção de blocos de concreto para alvenaria e blocos intertravados para pavimentação, verificando que amostras com 25 e 50% de incorporação em substituição do agregado convencional, não há alteração

significativa nas propriedades de resistência mecânica a compressão (MASTELLA et al., 2014).

#### 5.4 POTENCIALIDADES DA ADF PARA UTILIZAÇÃO EM MASSA ASFÁLTICA

Para avaliar as potencialidades da ADF como agregado em massa asfáltica, uma série de ensaios com cada tipo de areia (finos de exaustão, moldagem e blend) foi realizada. Além disso, comparações dos resultados com um material referência (pó de pedra) também foram realizadas.

Conforme visto no item 3.3, a Norma ABNT NBR 15702:2009 – Diretrizes para Aplicação em Asfalto e em Aterro Sanitário, a Areia Descartada de Fundação (ADF) prevê diretrizes para aplicação desse resíduo sólido industrial.

No Estado de Santa Catarina, foi aprovada a Lei Estadual nº 17479/2018 que dispõe sobre a autorização para utilização das Areias Descartadas de Fundação (ADF), permitindo as seguintes aplicações para a ADF em diversas finalidades, tais como: produção de concreto asfáltico, de concreto e argamassa para artefatos de concreto, à fabricação de telhas, tijolos e outros artigos de barro cozido para artigos em cerâmica, ao assentamento de tubulações e de artefatos para pavimentação, base, sub-base, reforço de subleito para execução de estradas, rodovias, vias, urbanas e para cobertura diária em aterro sanitário.

##### 5.4.1 Adesividade

Segundo a norma DNER-ME 079(1994), a adesividade é a propriedade que o agregado tem, de ser aderido ao ligante betuminoso. Quanto maior a capacidade de adesão do agregado pelo ligante, maiores serão as forças de ligação entre eles, promovendo o encapsulamento das partículas de agregado de forma mais efetiva.

O ensaio de adesividade foi realizado com as areias de moldagem, finos de exaustão, *blend* e referência. A referência utilizada foi o pó de pedra, pois, normalmente em asfaltos do tipo concreto betuminoso usinado a quente, se utiliza pó de pedra no processo de fabricação. A Tabela 18 mostra a indicação da adesividade em função das soluções de carbonato de sódio.

A Tabela 18 mostra os resultados qualitativos relacionados de adesividade, após ensaio com as soluções molares indicadas na Tabela 19 e comparação com a Tabela 20.

Tabela 18 - Indicação da adesividade em função das soluções de carbonato de sódio

| <b>Número</b> | <b>Moldagem</b>        | <b>Finos de<br/>Exaustão</b> | <b>Blend</b>           | <b>Referência<br/>(pó de pedra)</b> |
|---------------|------------------------|------------------------------|------------------------|-------------------------------------|
| 0             | Não houve deslocamento | Não houve deslocamento       | Não houve deslocamento | Não houve deslocamento              |
| 1             | Não houve deslocamento | Não houve deslocamento       | Não houve deslocamento | Não houve deslocamento              |
| 2             | Não houve deslocamento | Não houve deslocamento       | Não houve deslocamento | Não houve deslocamento              |
| 3             | Não houve deslocamento | Não houve deslocamento       | Não houve deslocamento | Início do deslocamento              |
| 4             | Início do deslocamento | Início do deslocamento       | Início do deslocamento | -                                   |
| 5             | -                      | -                            | -                      | -                                   |
| 6             | -                      | -                            | -                      | -                                   |
| 7             | -                      | -                            | -                      | -                                   |
| 8             | -                      | -                            | -                      | -                                   |
| 9             | -                      | -                            | -                      | -                                   |
| 10            | -                      | -                            | -                      | -                                   |

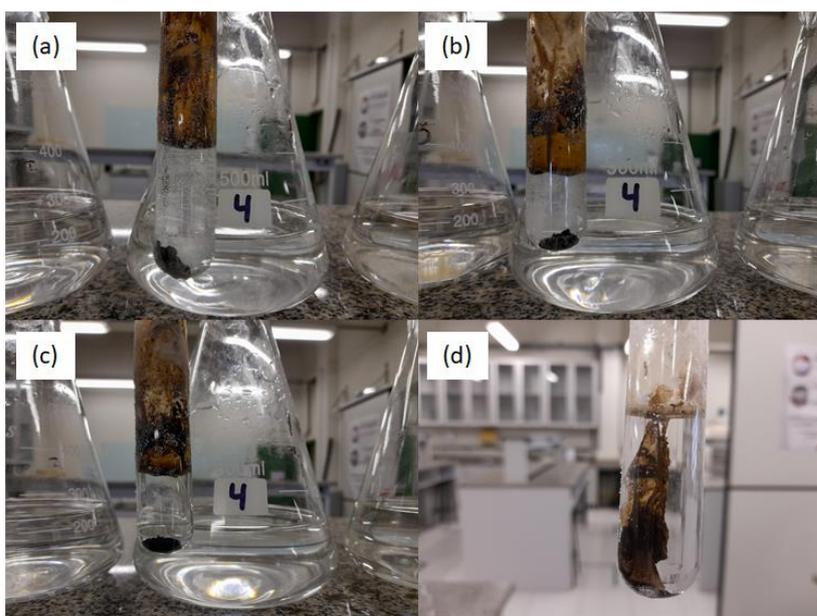
FONTE: Do Autor (2021).

De acordo com o observado na Tabela 18 para as amostras de moldagem, finos de exaustão e *blend*, o início do deslocamento da película betuminosa ocorreu na escala 4 (quatro), ilustrado na Figura 29, significando assim boa adesividade, conforme enquadramento na norma e apresentado na Tabela 3. Contudo, não houve deslocamento total da película betuminosa para essas amostras. Para a amostra de referência (pó de pedra), o início do deslocamento da película betuminosa ocorreu na escala 3 (três), significando adesividade satisfatória e, da mesma forma que as amostras de ADF, não apresentou término no deslocamento da película betuminosa.

A referida norma de ensaio trata de duas condições distintas para a classificação quanto ao valor da adesividade. A primeira por dois números, quando a amostra apresenta início de deslocamento em uma determinada condição de exposição à solução molar e termina em outra, conforme escala da Tabela 3. A outra classificação é quando a amostra não apresenta deslocamento em nenhuma das soluções, sendo então classificada como 10 (dez), ótima.

Considerando os resultados obtidos para as ADF's ensaiadas e comparando com os padrões normativos estabelecidos pela referida norma, conclui-se que as amostras avaliadas possuem boas propriedades de serem aderidas por material betuminoso. As ADF's moldagem, finos e *blend* obtiveram resultado melhor quando comparado ao pó de pedra usado como referência. Influências tanto do tamanho das partículas quanto do próprio ligante presente nas ADFs podem ser esperados. A boa adesividade das ADF's tem influência direta nas propriedades de estabilidade e fluência do concreto betuminoso usinado a quente. Além disso, demonstra que o CAP envolverá muito bem as ADF's (Figura 29), e esta forte ligação CAP-ADF pode reduzir produtos solubilizados da ADF.

Figura 29 - Ensaio de adesividade: (a) ADF moldagem; (b) ADF finos de exaustão; (c) ADF *blend* e (d) referência.



FONTE: Do autor (2022).

#### 5.4.2 Granulometria

A análise granulométrica dos agregados foi realizada com todos os componentes da massa asfáltica (brita  $\frac{3}{4}$ , pedrisco, pó de pedra e ADF) com a finalidade de avaliar as possibilidades de incorporação de ADF na massa asfáltica, respeitando os limites e faixas de trabalho definidas pela norma do DNIT 031/2006.

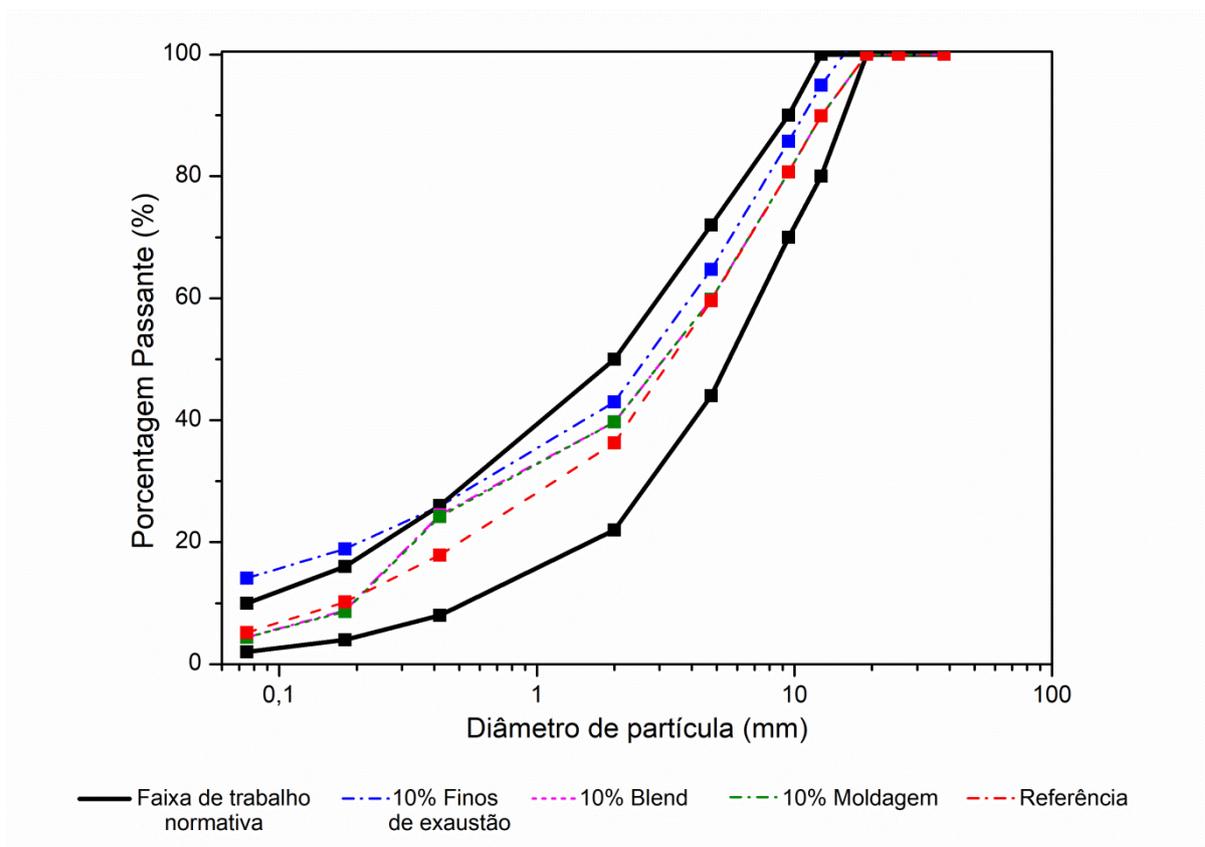
O percentual de cada componente foi determinado com base em informações de trabalhos anteriores (CHEGATTI, 2002; BONET, 2004) e por meio de informações obtidas *in loco* na usina fixa de asfalto do Município de Criciúma.

Inicialmente, foi fixada a quantidade de substituição em 10% sobre o pó de pedra. Foram utilizadas as ADF de moldagem, finos de exaustão e *blend* em substituição do pó de pedra, a fim de identificar qual das areias tem o maior potencial de aplicação. Além desses, a granulometria da mistura referência (usando apenas pó de pedra e sem incorporação de ADF) foi obtida para fins de comparação.

A Figura 30 mostra o comparativo das misturas contendo massa asfáltica com incorporação de 10% de ADF para amostras de areia de moldagem, finos de exaustão e *blend*. Além desses, há também plotado no gráfico a curva granulométrica para a mistura contendo somente areia (composição de referência). A linha preta sólida demonstra a faixa de trabalho normativa. Como já mencionado, a composição do concreto asfáltico deve atender aos requisitos da norma DNIT 031/2006 - ES Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico - Especificação de serviço, com as respectivas tolerâncias para granulometria (DNER ME-083) e percentuais do ligante asfáltico determinados pelo projeto da mistura.

Neste sentido, observa-se pela análise da Figura 1 que as misturas contendo incorporação de amostras de areia de moldagem e *blend* com 10% de substituição estão dentro da faixa de trabalho estabelecida pela norma, e, portanto, no quesito granulometria pode ser utilizadas na produção de asfalto, assim como a mistura de referência. Contudo, a curva granulométrica para amostra de finos de exaustão apresenta-se fora da faixa de trabalho recomendada.

Figura 30 - Curvas granulométricas e faixa de trabalho normativa.



FONTE: Do autor (2022).

Desta forma, conclui-se que é possível utilizar um *blend* de areia de moldagem e finos nas proporções de 10%, simulando o descarte industrial que ocorre atualmente. Essa forma de descarte favorece o processo de coleta no gerador ao invés de separar cada fração (moldagem e finos de exaustão). O *blend*, conforme avaliação prévia no gerador, é o que normalmente se encontra depositado nas pilhas e montes para descarte. Essas pilhas, conforme descrito no item 5.4, permanecem por até 1 ano nos pátios da empresa, para posterior envio aos aterros.

A ADF finos de exaustão, por não apresentar enquadramento na faixa granulométrica normativa, não foi submetida individualmente para os demais ensaios.

## 5.5 OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

### 5.5.1 Definição do teor de CAP

O teor de CAP (ou asfalto) definido em projeto precisa ser ajustado de acordo com a composição da mistura asfáltica definida. Tal teor tem relação com propriedades mecânicas como estabilidade, fluência e resistência à tração por compressão diametral. Além disso, volume de vazios da mistura e relação betume/vazios é também diretamente relacionada ao teor de CAP adotado em projeto.

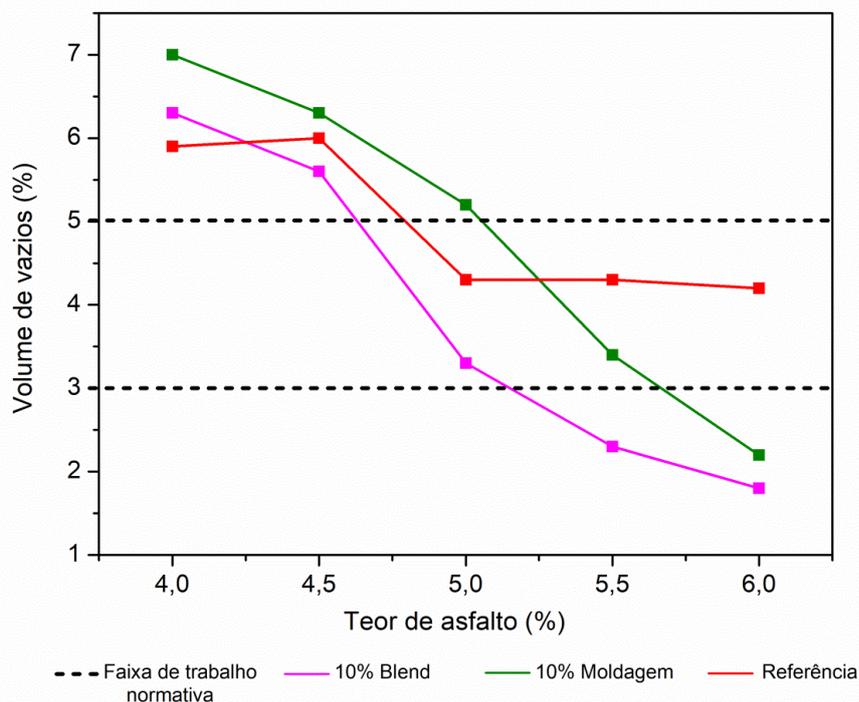
Neste contexto, foram fabricados corpos de prova pela metodologia Marshall com teores de CAP de 4, 4,5, 5, 5,5 e 6% para amostras contendo 10% ADF de moldagem e com 10% de ADF *blend*. As duas ADF foram utilizadas, já que possuem granulometria adequada para a aplicação. Também foram produzidos corpos de prova da referência.

#### 5.5.1.1 Volume de Vazios

Inicialmente, foram avaliadas as densidades das misturas. A partir dos cálculos de densidade real e aparente, obteve-se o volume de vazios. A Figura 31 mostra os resultados obtidos de volume de vazios dos corpos de prova para referência e mistura de 10% em substituição do pó de pedra por ADF *blend* e moldagem em relação ao teor de CAP aplicado. A linha pontilhada define os limites mínimo e máximo (3 a 5%) de porcentagem de vazios exigidos pela norma DNIT 031/2006.

Observa-se na Figura 31, que o teor de CAP de 5% para amostras de *blend* e referência, 5,5% para moldagem e referência e para 6% somente referência, apresentaram valores para volume de vazios dentro dos padrões normativos.

Figura 31 - Volume de vazios (Vv) X teor de asfalto.



FONTE: Do autor (2022).

Analisando-se a Figura 31, é possível também identificar a relação direta entre o aumento no teor de CAP com a redução no volume de vazios (Vv). Isso se deve pelo fato de ocorrer maior capacidade de preenchimento dos “vazios” da massa asfáltica pelo CAP. Contudo, há um limite máximo de preenchimento em que a partir desse limite (3% de vazios) poderá ocorrer comprometimento de outras propriedades, como estabilidade e fluência.

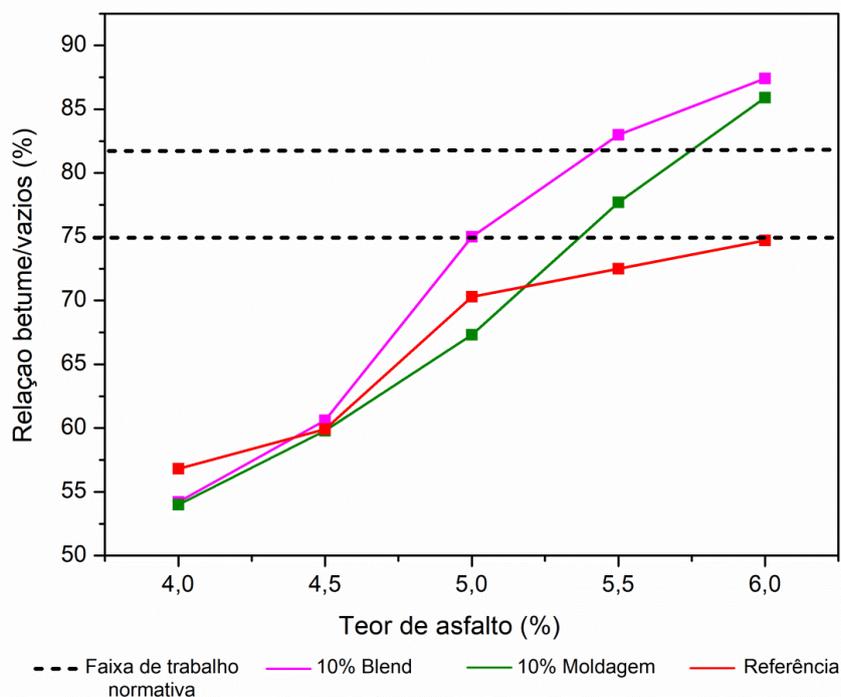
#### 5.5.1.2 Relação Betume / Vazios

A relação betume/vazios da mistura é importante para determinação do grau de balanço entre os agregados e o betume, possibilitando avaliar a melhor condição para uma massa asfáltica mais estável e resistente para as condições de tráfego na faixa de rolamento “C”.

A Figura 32 mostra a relação betume/vazios para amostras de referência e mistura de 10% em substituição do pó de pedra por ADF *blend* e moldagem em relação ao teor de CAP aplicado. Também mostra a faixa de tolerância conforme

estabelecido pela norma do DNIT 031/2006 - ES Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico - Especificação de serviço.

Figura 32 - Relação betume/vazios (RBV) X teor de asfalto.



FONTE: Do autor (2022).

Conforme mostra a Figura 32, a amostra de ADF *blend* 10% contendo 5% de CAP apresentou resultado de 75%, ou seja, dentro dos limites estabelecidos. O mesmo ocorreu para a amostra de ADF Moldagem 10% com 5,5% de CAP que apresentou resultado de 77,7%, ou seja, também dentro dos limites estabelecidos.

Para ensaios realizados com a amostra de referência (sem incorporação de ADF), não houve teor de CAP que atendesse o requisito mínimo de 75% e máximo de 82% na relação betume/vazio, chegando a 74,7% com teor de CAP de 6%.

Por fim, embora os resultados tenham apresentado pequena diferença entre teores apropriados de CAP (5% para ADF *blend* e 5,5% para moldagem), é importante ressaltar que essa diferença está relacionada à granulometria dos agregados. Vale ressaltar que a análise morfológica das ADF's revelou partículas heterogêneas, de forma mais evidente para finos de exaustão, provavelmente provenientes do próprio processo produtivo, conforme já mencionado. Essa

diferença entre os tamanhos e formas dos grãos pode promover essa diferença na relação betume/vazios entre as amostras de ADF *blend* e moldagem.

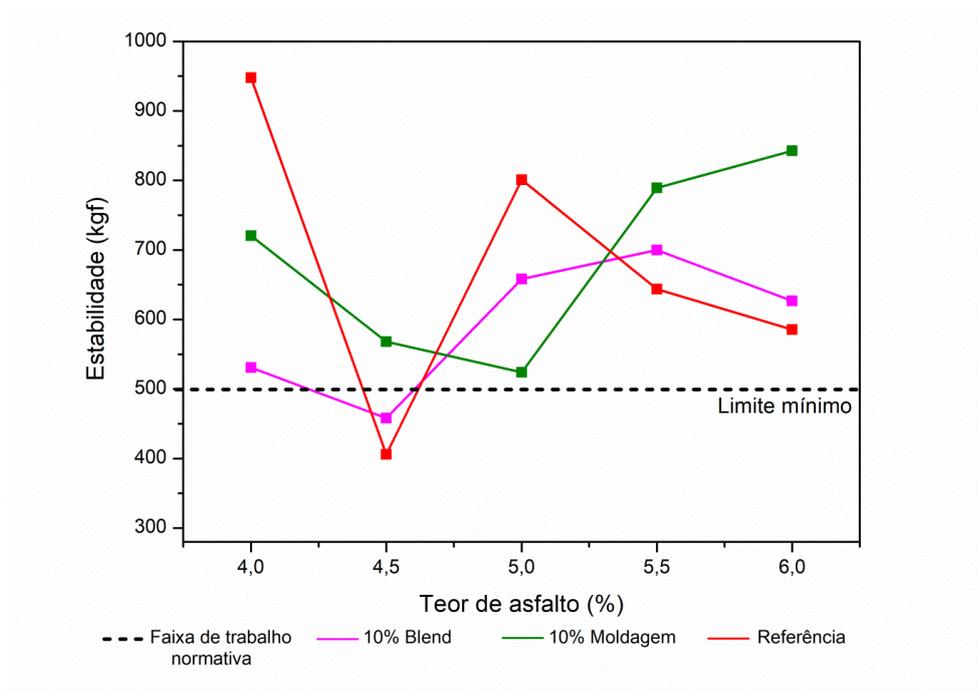
### 5.5.1.3 Estabilidade

A Figura 33 mostra os resultados de estabilidade para os corpos de prova com incorporação de ADF *blend* 10%, moldagem 10% e referência com variações do teor de CAP.

Inicialmente, observa-se que há uma discreta redução da estabilidade com o aumento do teor de CAP de 4 para 4,5% em todas as amostras. Porém, há um aumento significativo da estabilidade quando se aumenta o teor de CAP para 5%, chegando a 658,2 kgf. A estabilidade segue relativamente estável até 5,5% de CAP, voltando a cair com o aumento do CAP para 6%, exceto para a amostra de ADF moldagem que segue com elevação da estabilidade.

Para ensaios realizados com a amostra referência (sem incorporação de ADF), o teor de CAP que apresentou valor fora da especificação normativa somente com 4,5%, chegando a 405,8 kgf.

Figura 33 - Estabilidade X teor de asfalto.



FONTE: Do autor (2022).

A norma do DNIT 031/2006 determina estabilidade mínima de 500 kgf, considerando método Marshall com aplicação de 75 golpes para compactação dos corpos de prova. Exceto as amostras de referência e *blend* usando 4,5% de CAP, todas as demais cumpriram esse requisito mínimo.

No trabalho de Chegatti (2002), a autora obteve êxito em todos os ensaios de estabilidade realizados. Naquele caso, não houve variação do teor de CAP e sim de diferentes percentuais de incorporação de areia, o que não é recomendável, já que todas as propriedades sofrem influência com a variação do teor de CAP.

Por fim, analisando as especificações do DNIT 031/2006 e comparando-as como os resultados obtidos para cada amostra (ADF *blend*, moldagem e referência), é possível classificar como “em conformidade”, com vista a estabilidade, todos os teores de CAP ensaiados, com exceção de 4,5% para *blend* e referência. Contudo, o teor de 5% de CAP para ADF *blend*, além de satisfazer os requisitos para estabilidade, se mostrou o mais adequado para volume de vazios e relação betume/vazios.

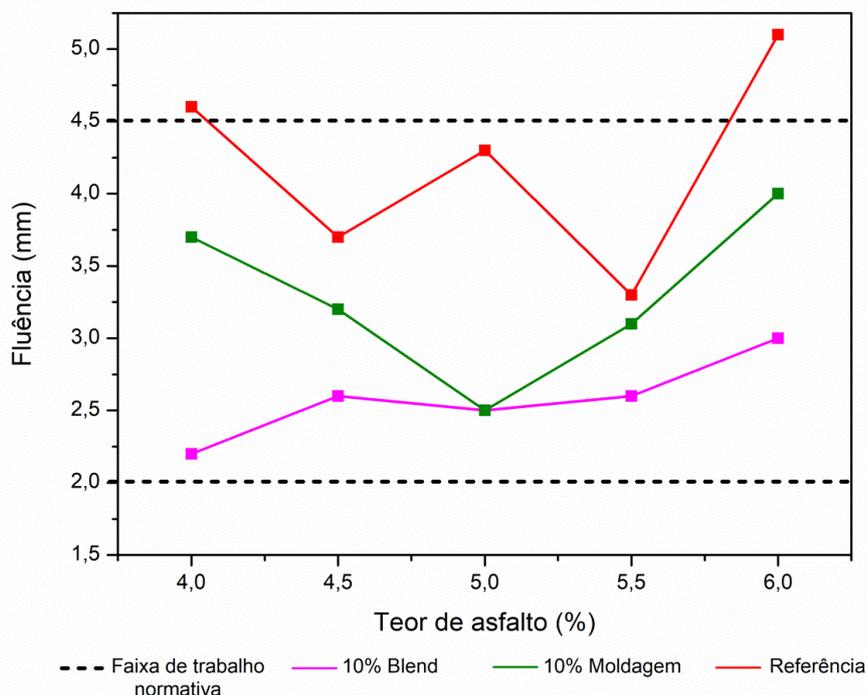
#### 5.5.1.4 Fluência

A Figura 34 mostra os resultados de fluência para os corpos de prova com incorporação de ADF *blend* 10%, moldagem 10% e referência.

Observa-se que há um aumento na fluência conforme o aumento do teor de CAP de 4 para 6%. A elevação da fluência, que é entendida como a deformação diametral do corpo de prova que é medida na ruptura, é mostrada na Figura 33, expressa em “mm”. Todos os corpos de prova contendo ADF submetidos ao ensaio de fluência apresentaram deformação com valores dentro dos limites de 2 a 4,5 mm, conforme estabelecidos pela norma. De fato, os únicos que não estão em conformidade com a norma são os de referência, que contêm 4,0 e 6% de CAP.

Analisando as especificações normativas e comparando-as com os resultados obtidos para cada amostra (10% de substituição de ADF *blend* e moldagem), é possível classificar como conformes, com vista à fluência, todos os teores de CAP ensaiados.

Figura 34 - Fluência X teor de asfalto.



FONTE: Do autor (2022).

Segundo Roberts et al. (1991) e Bonet (2002), os valores de fluência mais elevados geralmente indicam formação de uma mistura plástica. Quando submetida ao tráfego haverá deformação permanente. Contudo, valores baixos de fluência podem indicar teor de ligante insuficiente ou volume de vazios mais elevado. Tal condição compromete a qualidade da mistura, podendo ocorrer a redução na durabilidade. Segundo Bonet (2002), o teor de ligante insuficiente na mistura resulta em pavimento asfáltico quebradiço (frágil), o que promove o surgimento precoce de trincas, reduzindo a vida útil do pavimento asfáltico.

O ensaio realizado com amostra de referência apresentou valor de 5,1 mm para fluência com o teor de CAP de 6%, ou seja, fora dos limites normativos. Tal condição mostra que a incorporação de ADF *blend* ou moldagem, em substituição ao agregado pó de pedra, pode reduzir a tendência de elevação na deformação com teores de CAP mais elevados.

Considerando os resultados obtidos para volume de vazios, relação betume/vazios, estabilidade e fluência, tanto do ADF *blend* quanto do ADF de moldagem, podem ser incorporadas em substituição ao pó de pedra no percentual de 10%.

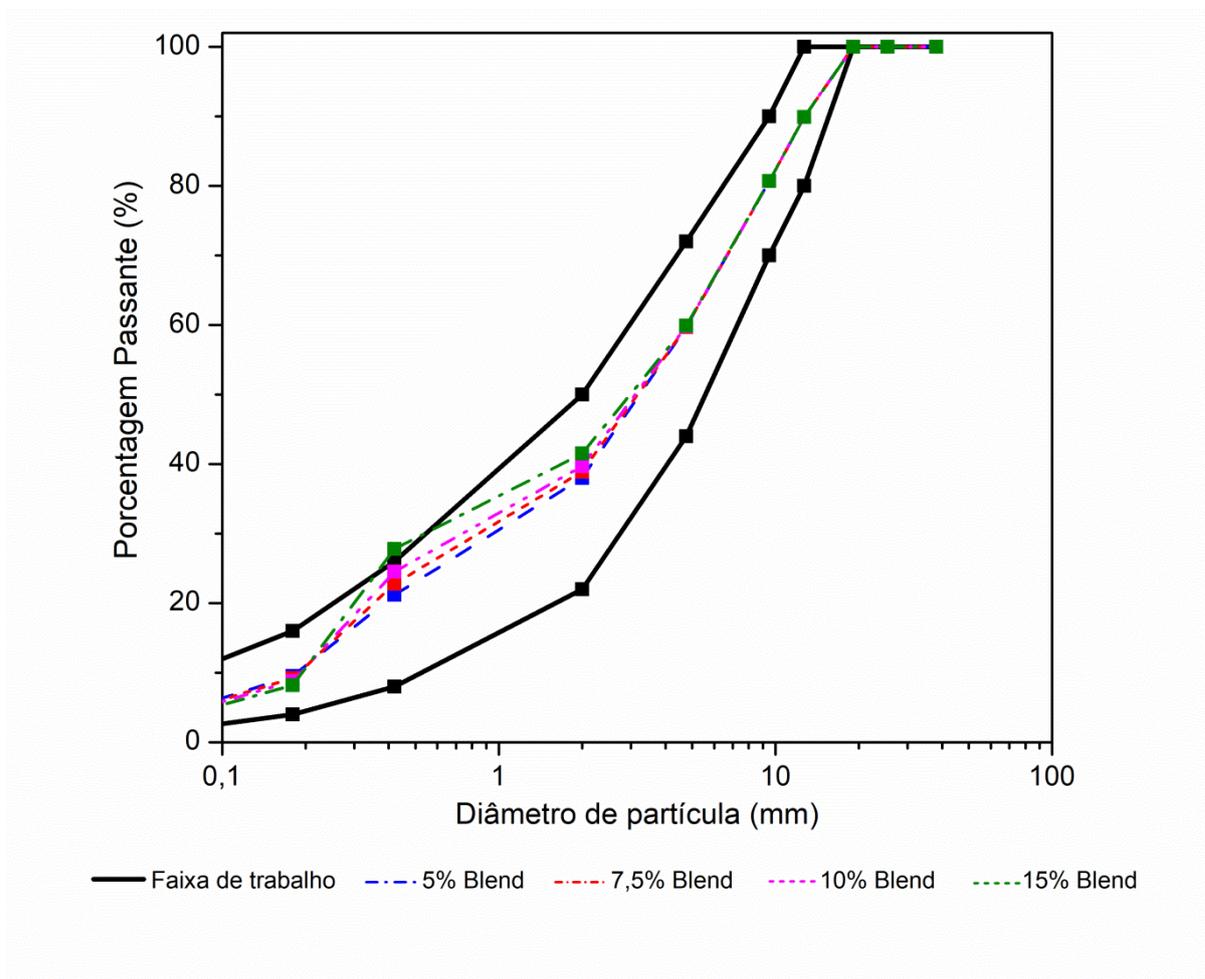
Para fins de seleção, a ADF *blend* favorece o processo de coleta no gerador, já que não é necessário separar cada fração (moldagem e finos de exaustão). O *blend* é o que normalmente se encontra depositado nas pilhas e montes para descarte.

O teor de CAP de 5% para a amostra de ADF *blend* foi a que atendeu a todos os requisitos normativos, ficando dentro dos limites estabelecidos e, portanto, definido como teor fixo para as demais variações nos percentuais de ADF *blend* definidos para esse trabalho.

### **5.5.2 Influência da quantidade de substituição de ADF.**

Para validar a aplicação da ADF em misturas asfálticas, a quantidade de ADF precisa ser ajustada a fim de verificar a influência desta quantidade nas propriedades de volume de vazios, relação betume/vazios, estabilidade, fluência, em propriedades mecânicas e na toxicidade. Os teores de 5, 7,5 e 10% foram possíveis do ponto de vista da granulometria se comparados com os padrões normativos estabelecidos. Entretanto, conforme Figura 35, o teor de 15% de incorporação de ADF não cumpre os requisitos para faixa granulométrica normativa. Dessa forma, os demais ensaios foram realizados para os teores de 5, 7,5 e 10% de ADF.

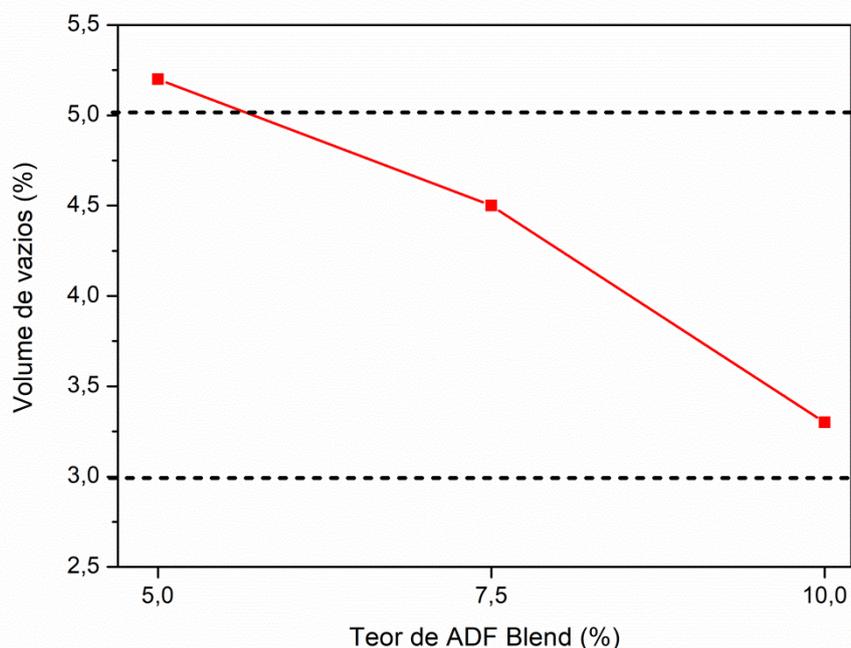
Figura 35 - Curvas granulométricas com teores de 5, 7,5, 10 e 15% de ADF e faixa de trabalho normativa.



FONTE: Do autor (2022).

#### 5.5.2.1 Volume de vazios

Inicialmente, foram medidas as densidades das misturas para os percentuais de incorporação de ADF na massa asfáltica. Esses teores foram adequados do ponto de vista da granulometria. A partir dos cálculos de densidade real e aparente, obteve-se o volume de vazios. A Figura 36 mostra os resultados obtidos para o volume de vazios dos corpos de prova para 5, 7,5 e 10% de substituição do pó de pedra por ADF *blend*. Também mostra a faixa de tolerância, conforme estabelecido pela norma do DNIT 031/2006.

Figura 36 - Volume de vazios (Vv) em função do teor de ADF *blend*.

FONTE: Do autor (2022).

Analisando a Figura 36, é possível identificar a relação direta entre a redução no percentual de ADF *blend* com o aumento no volume de vazios (Vv). Isso se deve pelo fato de ocorrer maior capacidade de preenchimento, por contra das características granulométricas (partículas mais finas) dos “vazios” da massa asfáltica pela incorporação de maiores percentuais de ADF *blend*.

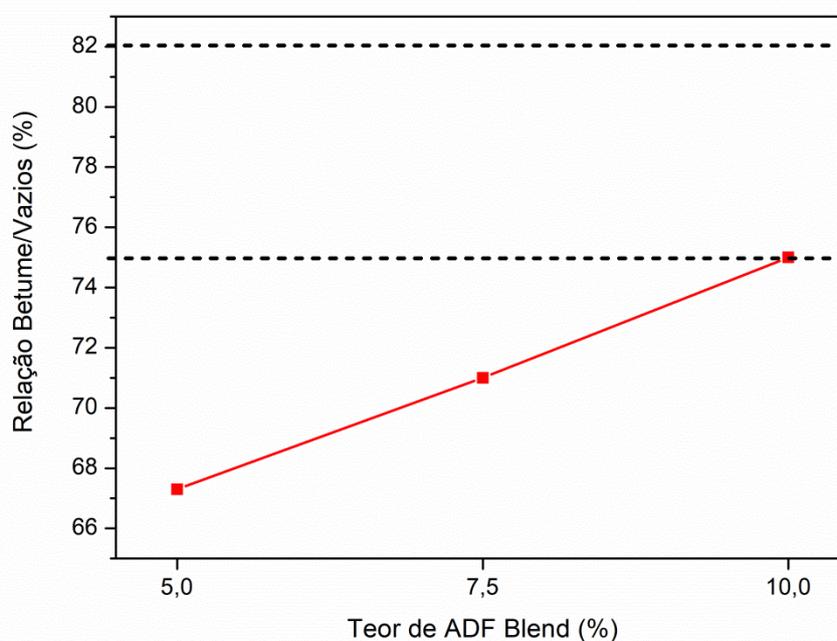
Os percentuais de incorporação de ADF *blend* em massa asfáltica possíveis, sob o ponto de vista de volume de vazios (Vv), são os teores de 7,5% e 10%. Já 5% de ADF *blend* resulta em um volume de vazios acima de 5%, o que não é indicado para aplicação. Além disso, possivelmente, quantidades de ADF superiores a 10% resultariam em um volume de vazios muito pequeno, o que também é prejudicial para o asfalto.

#### 5.5.2.2 Relação Betume/Vazios

A Figura 37 mostra os resultados obtidos para a relação betume/vazios dos corpos de prova para 5, 7,5 e 10% de substituição do pó de pedra por ADF *blend*.

Também mostra a faixa de tolerância conforme estabelecido pela norma do DNIT 031/2006.

Figura 37 - Relação betume/vazios (RBV) em função do teor de ADF *blend*.



FONTE: Do autor (2022).

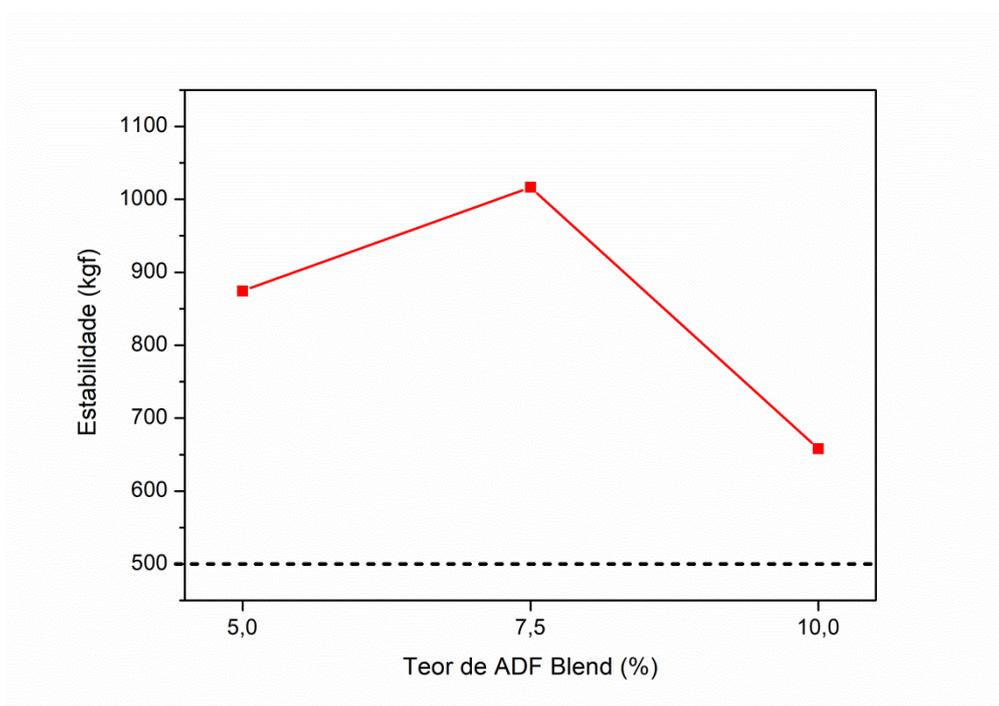
Conforme mostra a Figura 37, a amostra de ADF *blend* 10% contendo 5% de CAP apresentou resultado de 75%, ou seja, dentro dos limites estabelecidos. Contudo, ao reduzir o percentual de incorporação de ADF *blend* da mistura, o percentual da relação betume/vazios também reduz, ficando fora da faixa de tolerância normativa. Para o ADF *blend* 7,5, observa-se que a relação betume/vazios chega a 71% e ADF *blend* 5% a 67,3%.

Como observado para volume de vazios, a relação betume/vazios possui relação direta com a granulometria da mistura. É notório que a redução da granulometria, por conta dos menores teores de incorporação de ADF *blend* na mistura, reduz os percentuais da relação betume/vazios, indicando que o teor de 10% de incorporação é o mínimo aceitável perante os limites normativos.

### 5.5.2.3 Estabilidade

A Figura 38 mostra os resultados obtidos para a estabilidade dos corpos de prova para 5, 7,5 e 10% de substituição do pó de pedra por ADF *blend*. Também mostra a faixa de tolerância conforme estabelecido pela norma do DNIT 031/2006.

Figura 38 - Estabilidade em função do teor de ADF *blend*.



FONTE: Do autor (2022).

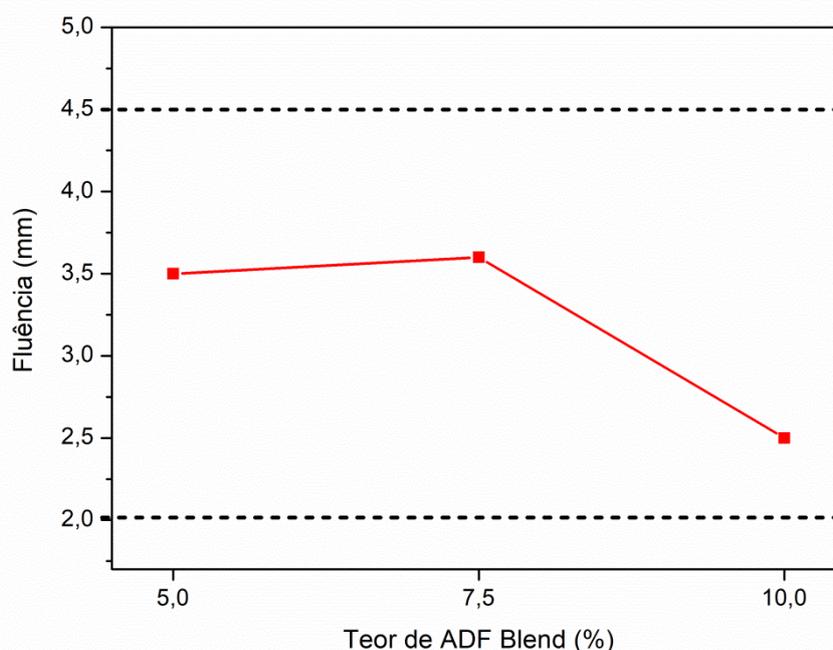
Inicialmente, observa-se elevação na estabilidade de 874,50 kgf (ADF 5%) para 1016,6 kgf (ADF 7,0 %) com o aumento na incorporação de ADF *blend* na mistura. Contudo, ao incorporar 10% de ADF *blend*, observa-se que há uma redução significativa para 658,20 kgf.

Por fim, analisando as especificações do DNIT 031/2006 e comparando-as como os resultados obtidos para cada amostra de incorporação de ADF *blend* com teor fixo de CAP em 5%, é possível classificar como “em conformidade”, com vista a estabilidade, todos os percentuais ensaiados.

#### 5.5.2.4 Fluência

Observa-se na Figura 39 que há um aumento na fluência com a redução na incorporação de ADF *blend* (de 10 para 7,5%), passando de 2,5 para 3,6 mm, voltando a reduzir a fluência para 3,5 mm quando o teor de ADF *blend* reduziu para 5% de incorporação. A elevação da fluência, que é entendida como a deformação diametral do corpo de prova que é medida na ruptura, no Figura 39 expressa em “mm”. Todos os corpos de prova contendo ADF submetidos ao ensaio de fluência apresentaram deformação com valores dentro dos limites de 2 a 4,5 mm, conforme estabelecidos pela norma.

Figura 38 - Fluência em função do teor de ADF *blend*.



FONTE: Do autor (2022).

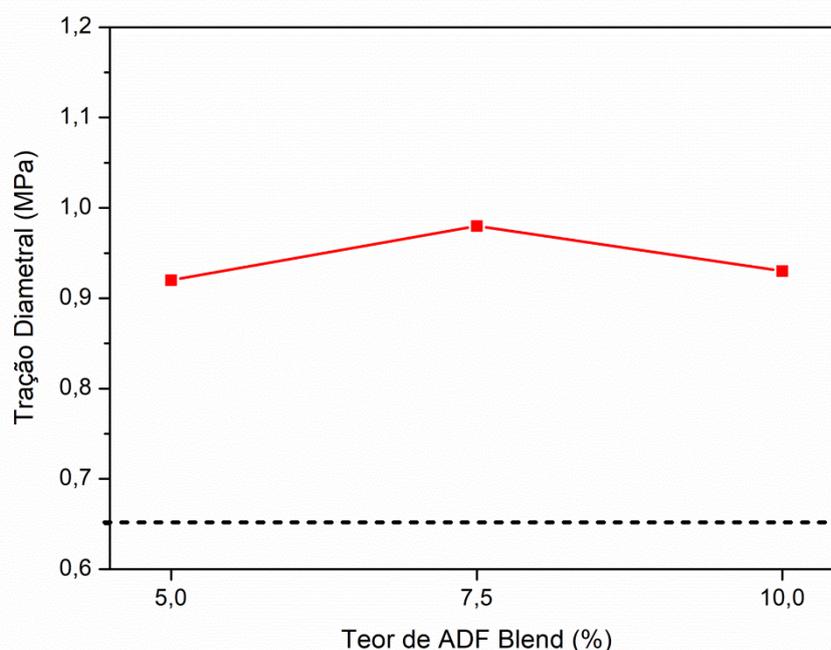
Analisando-se os valores obtidos, é possível também estabelecer a relação com a granulometria da mistura. Quando se incorpora maiores teores de ADF *blend* (10%), há um maior preenchimento de vazios, o que pode promover maior empacotamento da massa asfáltica, dificultando a mobilidade e elevando a resistência à fluência do material ensaiado.

Observando-se as especificações normativas e comparando-as com os resultados obtidos, para cada amostra de incorporação de ADF *blend*, é possível classificar como conformes, com vista à fluência, todos os teores ensaiados.

#### 5.5.2.5 Resistência à Tração por Compressão Diametral

A Figura 40 mostra os resultados obtidos para resistência à tração por compressão diametral dos corpos de prova para 5, 7,5 e 10% de substituição do pó de pedra por ADF *blend*.

Figura 40 – Resistência à tração por compressão diametral em função do teor de ADF *Blend*



FONTE: Do autor (2022).

O teor de incorporação de 10% de ADF *blend* apresentou resistência à tração por compressão diametral de 0,93 MPa, sendo que o limite estabelecido pela norma é de 0,65 MPa. Para 7,5% de ADF *blend*, o valor obtido foi ainda maior, passando para 0,98 MPa, enquanto que para 5% de ADF *blend* o valor reduziu para 0,92 MPa.

Aparentemente, conforme análise dos dados obtidos, não houve interferência significativa na resistência mecânica dos corpos de prova por conta das variações nos teores de ADF *blend*. Todos os valores são muito similares.

Observando as especificações normativas e comparando-as com os resultados obtidos, para cada amostra de incorporação de ADF *blend*, é possível classificar como conformes, com vista à resistência à tração por compressão diametral, todos os teores ensaiados.

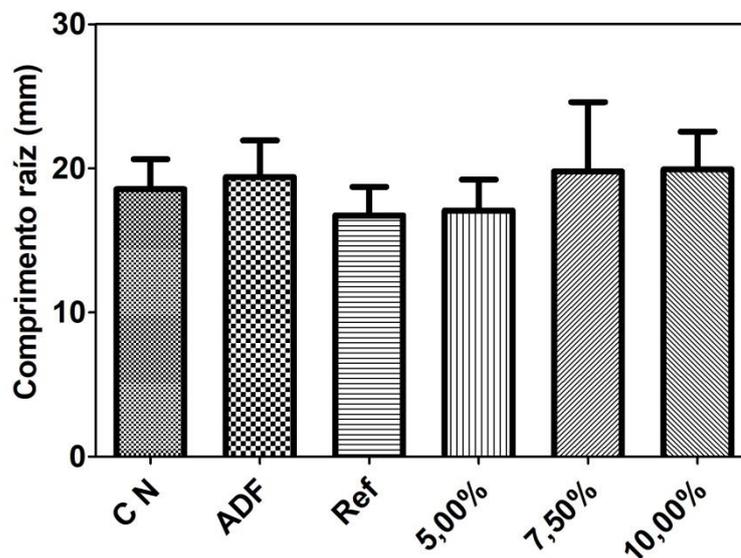
#### 5.5.2.6 Ecotoxicidade

O ensaio pela Norma NBR 10004:2004 revelou o enquadramento da amostra de ADF com classificação de resíduo Classe IIA – Não Inerte. Além desse ensaio, a análise química, bem como as análises térmicas, aponta a presença de contaminantes possivelmente tóxicos nas amostras avaliadas. Com a finalidade de observar e determinar o comportamento frente à toxicidade de tais amostras em ambientes onde possam ser aplicadas, foram realizados bioensaios com modelos experimentais distintos, analisando-se as diferentes concentrações de amostras e suas respostas. Dessa forma, foi possível determinar o potencial tóxico das amostras solubilizadas descritas nesse trabalho.

O ensaio de germinação de sementes de *Lactuca sativa* (alface) é mostrado nas Figuras 41 (Comprimento da raiz), 42 (Comprimento da radícula) e 43 (Comprimento do hipocótilo). A Figura 43 mostra as imagens da germinação de sementes *Lactuca sativa*.

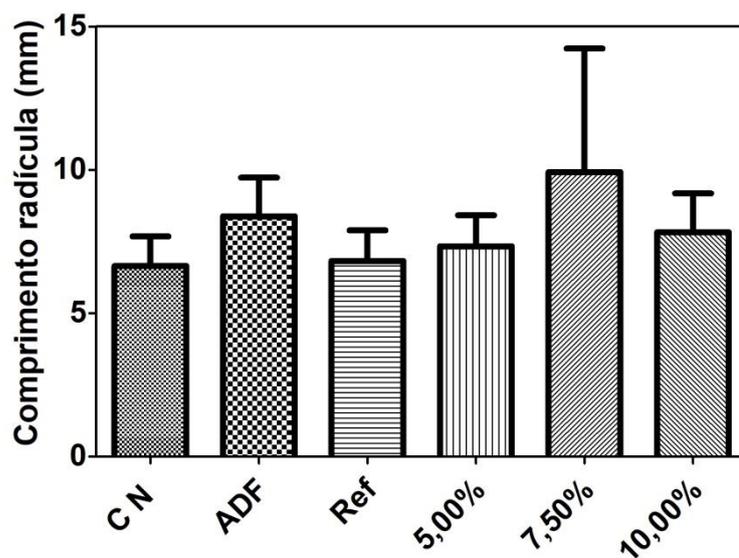
Observa-se pelos resultados apresentados no ensaio de germinação, que não houve nível de significância estatístico que possam sugerir que os extratos solubilizados de ADF *blend* nos teores de 5, 7,5, 10% e referência (pó de pedra) sejam capazes de promover alterações nos níveis de germinação das sementes da hortaliça *Lactuca sativa* (alface) (Figura 44), se comparadas à amostra de água mineral (grupo controle). Ou seja, a areia de fundição pode ser utilizada na aplicação sugerida, pois não afetaria a germinação de sementes em locais nas proximidades.

Figura 41 - Comprimento da raiz de *Lactuca sativa* após exposição a solubilizados dos corpos de prova estudados, em relação à água mineral (CN) e ao corpo de prova referência (Ref).



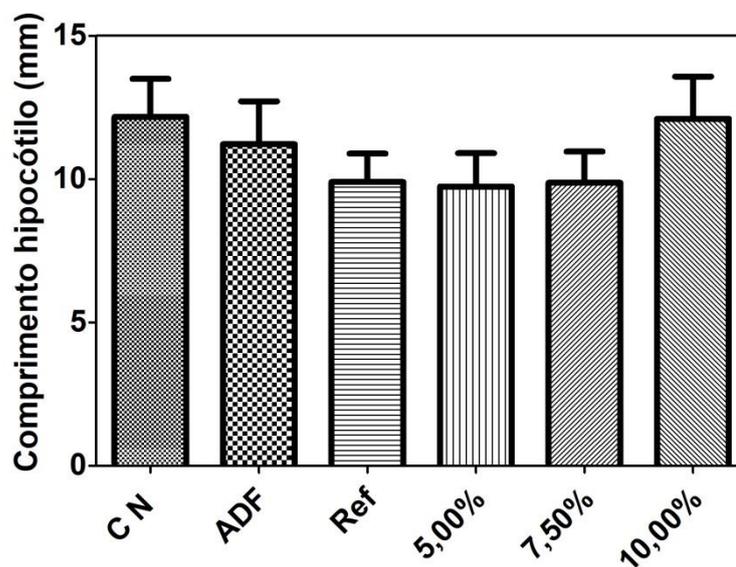
FONTE: Do autor (2022).

Figura 42 - Comprimento da radícula de *Lactuca sativa* após exposição a solubilizados dos corpos de prova estudados em relação à água mineral (CN) e ao corpo de prova referência (Ref).



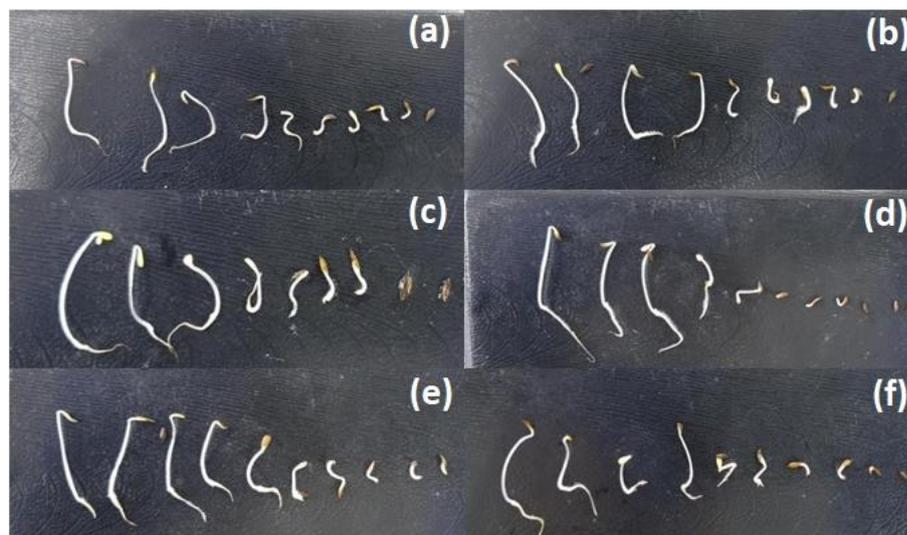
FONTE: Do autor (2022).

Figura 43 - Comprimento do hipocótilo de *Lactuca sativa* após exposição a solubilizados dos corpos de prova estudados em relação à água mineral (CN) e ao corpo de prova referência (Ref).



FONTE: Do autor (2022).

Figura 44 - Germinação de sementes *Lactuca sativa* (alface): (a) corpo de prova 5%; (b) corpo de prova 7,5%; (c) corpo de prova 10%%; (d) ADF; (e) água mineral e (f) corpo de prova referência.



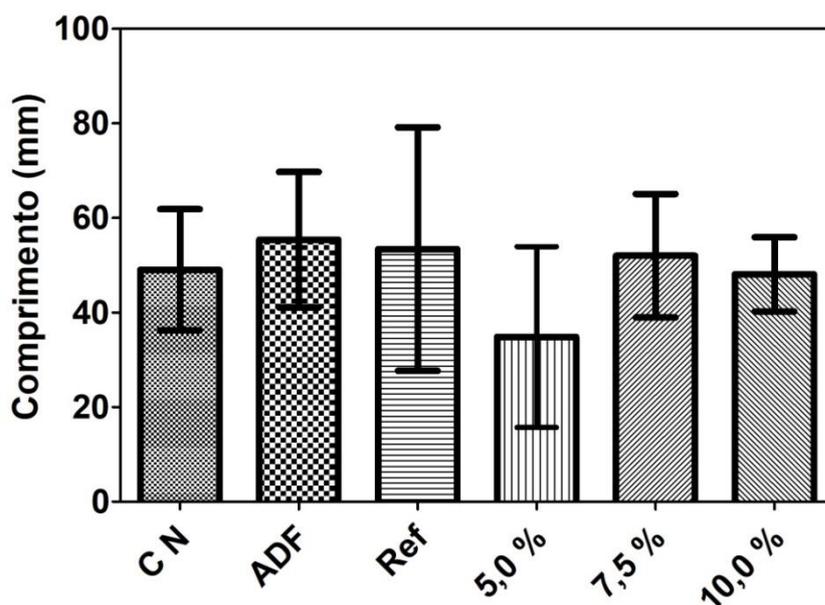
FONTE: Do autor (2022).

O ensaio de crescimento de raízes de *allium cepa sp.* (cebola) é mostrado nas Figuras 45 (Comprimento da raiz) e 46 (Biomassa, peso das raízes).

Para o ensaio de *allium cepa sp.* (cebola), o extrato solubilizado das amostras de ADF *blend* contendo 5, 7,5 e 10%, revelam que não houve significância estatística no comprimento da raiz e biomassa comparadas ao grupo controle. Dessa forma, pode-se determinar que não houve alterações capazes de promover diferenças significativas com o comprimento das raízes e a biomassa expostas aos extratos solubilizados, se comparadas à amostra de água mineral (grupo controle).

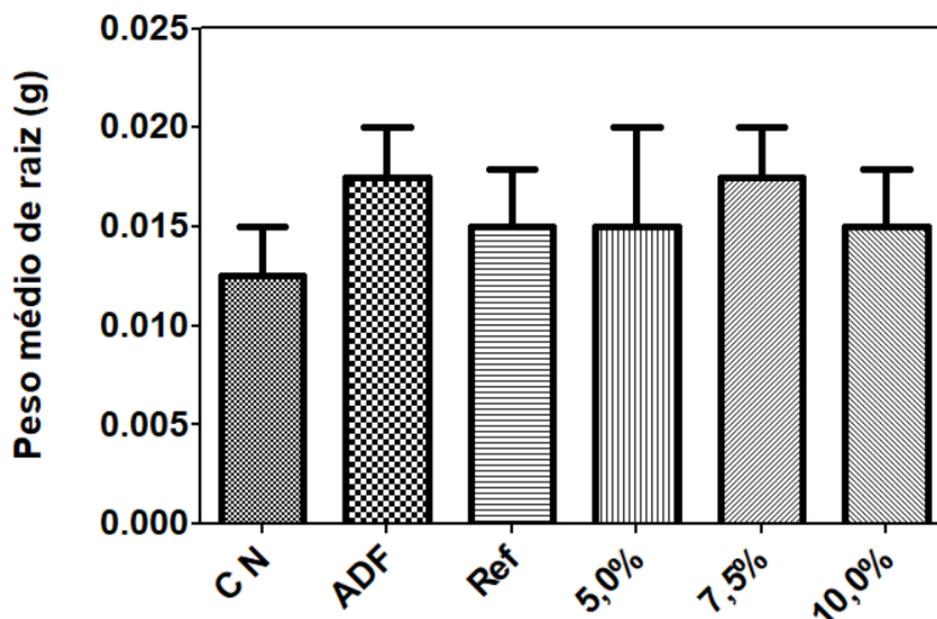
A Figura 47 mostra uma imagem fotográfica das raízes. Percebe-se uma leve coloração amarelada nas raízes submetidas ao extrato solubilizado das amostras de ADF e da referência (pó de pedra), quando comparadas às amostras de Água Mineral (CN). Contudo, essa característica não interferiu nos resultados conforme exposto acima.

Figura 45 - Comprimento de raiz de *allium cepa sp.* (cebola) após exposição a solubilizados dos corpos de prova estudados em relação à água mineral (CN) e ao corpo de prova referência (Ref).



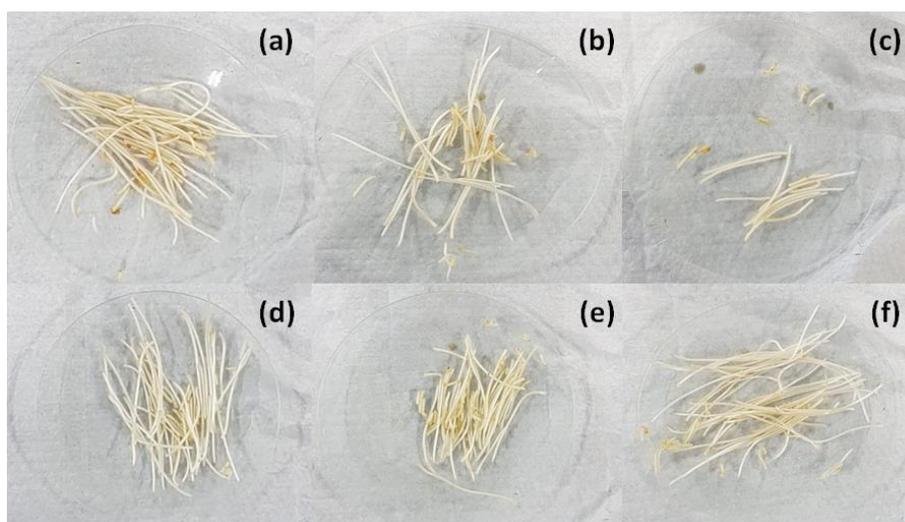
FONTE: Do autor (2022).

Figura 46 - Biomassa de *Allium cepa* sp. (cebola) após exposição a solubilizados dos corpos de prova estudados em relação à água mineral (CN) e ao corpo de prova referência (Ref).



FONTE: Do autor (2022).

Figura 47 - Raízes *allium cepa* sp. (cebola): (a) corpo de prova 5%; (b) corpo de prova 7,5%; (c) corpo de prova 10%; (d) ADF; (e) água mineral e (f) corpo de prova referência.

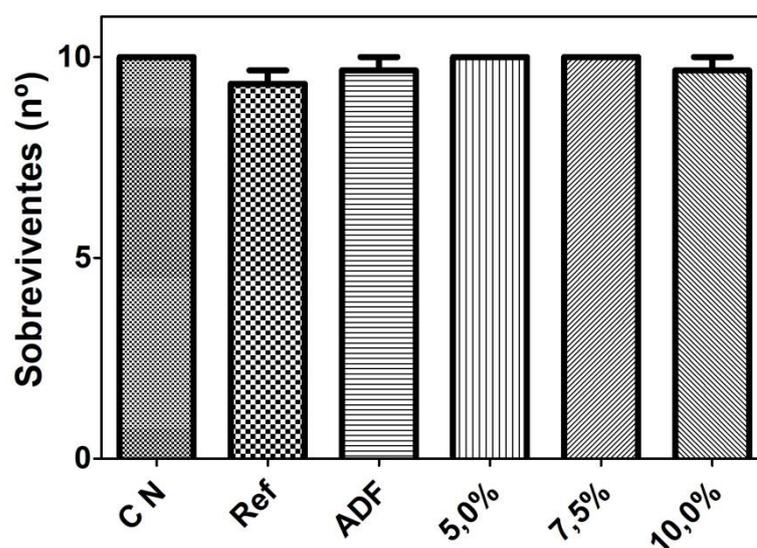


FONTE: Do autor (2022).

Os resultados obtidos para ensaio com *Artemia* sp., mostrado na Figura 48 para 24 h de exposição e Figura 49 para 48 h de exposição as amostras, revelam

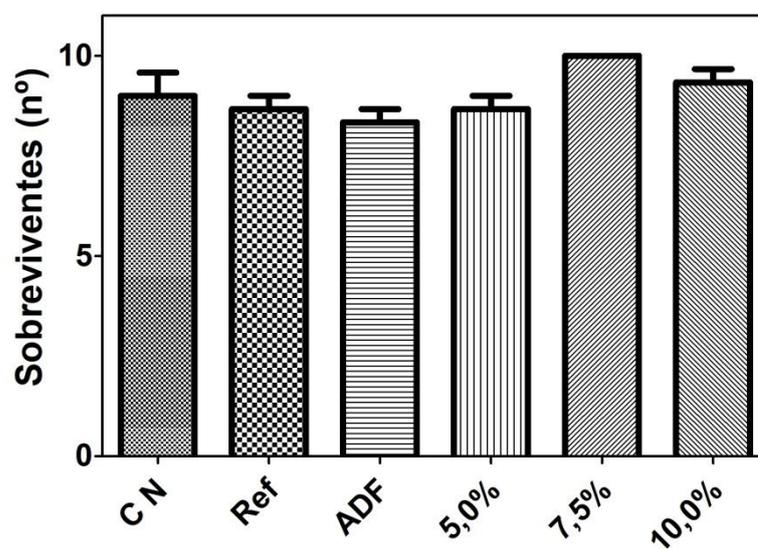
que não houve grau de letalidade, considerando as diferentes amostras testadas. Todos os organismos sobreviveram às condições de exposição (Figura 50), ou seja, não há alterações significativas dentre as amostras testadas e o grupo controle.

Figura 48 - Número de sobreviventes de *artemia sp.* após 24 h de exposição a solubilizados dos corpos de prova estudados em relação à água mineral (CN) e ao corpo de prova referência (Ref).



FONTE: Do autor (2022).

Figura 49 - Número de sobreviventes de *artemia sp.* após 48 h de exposição a solubilizados dos corpos de prova estudados em relação à água mineral (CN) e ao corpo de prova referência (Ref).



FONTE: Do autor (2022).

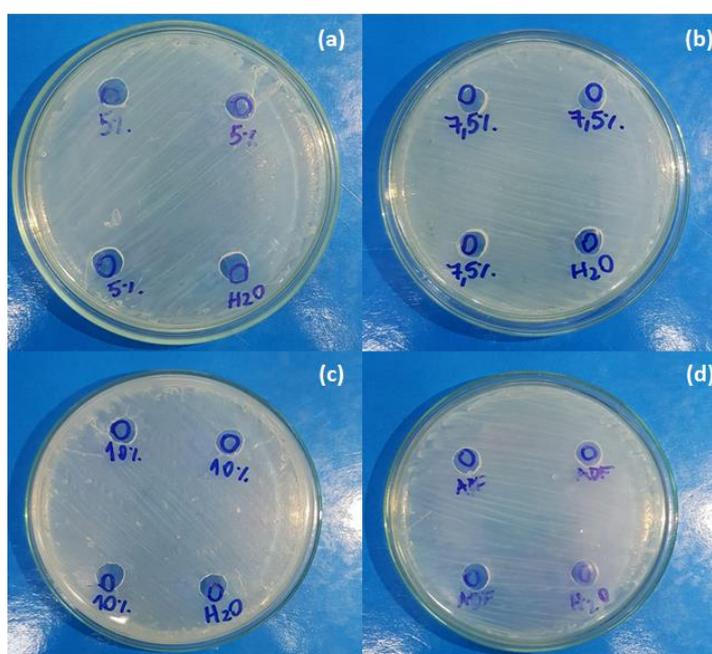
Figura 50 - Imagem de microscópio das *artemias sp* após exposição às amostras.



FONTE: Do autor (2022).

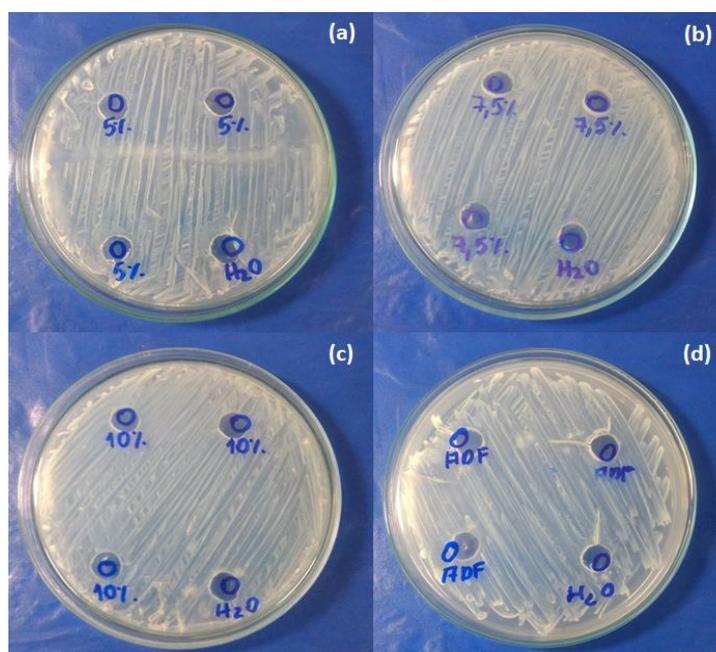
O ensaio com bactérias *Escherichia coli* (Figura 51) e *Staphylococcus aureus* é apresentado na Figura 52. Os resultados mostram que não apresentaram sensibilidade à exposição às amostras solubilizadas de ADF *blend*, corpos de prova fragmentados nos teores de 5, 7,5, 10% e referência (pó de pedra). O ensaio revela que as bactérias possuem algum mecanismo de resistência aos compostos presentes nas amostras testadas. Não houve formação de halo de inibição entre a cultura bacteriana e os poços de aplicação de amostras, ou seja, não há ação antibacteriana.

Figura 51 - Ensaio bactérias *Escherichia coli*. (a) corpo de prova 5%; (b) corpo de prova 7,5%; (c) corpo de prova 10%; (d) ADF.



FONTE: Do autor (2022).

Figura 52 - Ensaio bactérias *Staphylococcus aureus*. (a) corpo de prova 5%; (b) corpo de Prova 7,5%; (c) corpo de Prova 10%; (d) ADF.



FONTE: Do autor (2022).

Os ensaios de ecotoxicidade realizados revelam que as amostras solubilizadas não apresentam níveis de significância estatística que ultrapassem os limites de valor de  $p > 0,05$  (95% de confiança para toxicidade comparado ao grupo controle – água), considerando os bioindicadores testados. Ou seja, não há alteração significativa entre as amostras de forma que possa sugerir grau de toxicidade.

Mastella (2013) apontou que testes realizados com ADF em minhocas e daphinas (gênero de crustáceo) não apresentaram mortalidade. Contudo, houve significância estatística para o crescimento das raízes de cebola. Apontou, ainda, que tal fenômeno pode ter relação com a presença de formaldeído e altas concentrações de metais presentes nas amostras de ADF. Este comportamento não foi observado para os ensaios realizados neste trabalho.

Segundo Neto (2004), ensaios de lixiviação com corpos de prova de mistura asfáltica com incorporação de 15% de ADF não apresentaram valores acima dos limites toleráveis para substâncias como fenol e elementos de alta toxicidade, como: mercúrio, cádmio, chumbo e cromo conforme norma 10004/87. As análises químicas foram realizadas com extratos oriundos de corpos de prova com incorporação de 15% de ADF. Ainda, segundo Neto (2004), ensaios de classificação realizados com

massa asfáltica com ADF comparando com a classificação apenas da ADF, apresentam resultados que sugerem que há um encapsulamento do resíduo quando aplicado em massa asfáltica.

Segundo Walden (2003) e Chegatti (2012), a ADF não é considerada um resíduo sólido perigoso. Tal condição é caracterizada por não apresentar qualquer toxicidade e por não possuir em sua composição constituintes acima dos limites estabelecidos pelas legislações correspondentes.

Para comprovar ainda mais essa afirmação, a quantidade de alumínio e ferro no extrato solubilizado das amostras *blend* 10% e referência foi analisado por ICP. O resultado é mostrado na Tabela 19. Observa-se que as quantidades encontradas tanto para *blend* quanto para a referência estão abaixo de 0,06 mg/L (que também é a menor quantidade medida pelo equipamento), e não é superior ao estipulado pela norma ABNT NBR 10004:2004, indicando que de fato há um encapsulamento da parte tóxica do resíduo quando aplicado em massa asfáltica.

Tabela 19 – Quantidade de alumínio e ferro para amostra de corpo de prova *blend* 10% e referência.

|   | Alumínio (mg/L) | Ferro (mg/L) |
|---|-----------------|--------------|
| <i>Blend</i> 10%  | <0.06           | <0.06        |
| Referência  | <0.06           | <0.06        |
| Limites estabelecidos de acordo com a ABNT NBR 10004:2004 | 0.2             | 0.3          |

FONTE: Do autor (2022).

Por fim, conclui-se que as amostras de ADF e seus teores de incorporação de 5, 7,5 e 10% em substituição ao pó de pedra na mistura asfáltica não apresentam alterações significativas, do ponto de vista estatístico, que possam sugerir qualquer nível de toxicidade e poderiam ser aplicadas em massa asfáltica sem prejudicar o ambiente em que forem aplicadas.

## 6 CONCLUSÃO

Foi possível valorizar a areia descartada de fundição proveniente do processo de moldagem *cold-box* por meio da substituição parcial ao pó de pedra em misturas asfálticas do tipo concreto betuminoso usinado a quente.

Primeiramente à ADF foi classificada como resíduo classe IIA – Não inerte, o que permitiu o avanço do trabalho para os ensaios de caracterização.

Um percentual fixo de 10% de incorporação de ADF foi utilizado para os ensaios iniciais e avaliação do teor ótimo de CAP em relação às amostras de ADF moldagem e *blend*.

Os resultados mostraram que a composição contendo 10% de *blend* apresentou volume de vazios de 3,3%, relação betume/vazios de 75, estabilidade de 658,2 kgf, fluência de 2,5 mm e resistência à tração por compressão diametral de 0,93 MPa. Esses valores foram obtidos para o teor ótimo de CAP de 5%, sendo esse percentual definido como adequado do ponto de vista normativo para projetos de asfalto do tipo concreto betuminoso usinado a quente, faixa “C”.

Percentuais de 5 e 7,5% de incorporação de ADF também foram submetidos aos mesmos ensaios para verificação da conformidade técnica e ambiental, apresentando resultados fora dos limites normativos para volume de vazios e relação betume vazios. Contudo, para os demais ensaios, esses percentuais apresentaram resultados satisfatórios, tanto do ponto de vista técnico (estabilidade, fluência, compressão diametral) como ambiental (classificação e ecotoxicidade).

O teor de 15% de incorporação de ADF não apresentou valores de granulometria adequados para os limites da faixa de trabalho normativo. Portanto, não foram realizados ensaios de verificação de conformidade técnica e ambiental.

Por fim, a incorporação de 10% de ADF *blend* com teor de CAP de 5% apresentou possibilidade de incorporação do ponto de vista técnico e ambiental.

Embora os resultados obtidos sejam favoráveis à incorporação da ADF em massa asfáltica do tipo concreto betuminoso usinado a quente, importante salientar que, para cada projeto de asfalto requerido e processo de geração de ADF há particularidades que devem ser consideradas. As características do resíduo ADF, por exemplo, são altamente dependentes do tipo de processo de moldagem (ligantes como resinas e catalisadores) e do próprio material moldado (ferrosos e não ferrosos).

## 7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Considerando os resultados obtidos nesse trabalho, configurando um cenário técnico e ambiental apropriado para a valorização da ADF com aplicação na valorização em substituição ao agregado pó de pedra em massa asfáltica do tipo concreto betuminoso usinado a quente – CBUQ, como sugestão para trabalhos futuros, está o estudo da viabilidade econômica relacionando possíveis regiões onde há geração de ADF e demanda para produção de asfalto. Contudo, conforme previsão legal há uma série de possíveis aplicações da ADF que podem ser exploradas, tais como em:

- Concreto e argamassa para artefatos de concreto;
- Fabricação de telhas, tijolos e outros artigos;
- Assentamento de tubulações e de artefatos para pavimentação;
- Base, sub-base, reforço de subleito para execução de estradas, rodovias, vias, urbanas e para cobertura diária em aterro sanitário.

## 8 REFERÊNCIAS

ALVES, Bárbara Q. **Estudo da Viabilidade Ambiental da Reutilização das Areias Descartadas de Fundição**. 2012. 218f. Dissertação (Pós-graduação em Engenharia Ambiental). Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC. Florianópolis, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FUNDIÇÃO. Indústria da fundição números no setor demonstram crescimento. **ABIFA**. 2020. Disponível em: <https://www.abifa.org.br/industria-de-fundicao-numeros-do-setor-indicam-crescimento-consistente-em-2020/>. Acesso em: 02 nov. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT 10004 Resíduos sólidos classificação**. Disponível em: <https://analiticaqmresiduos.paginas.ufsc.br/files/2014/07/Nbr-10004-2004-Classificacao-De-Residuos-Solidos.pdf>. Acesso em: 15 nov. 2022.

\_\_\_\_\_. **ABNT 10005 Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos**. Disponível em: <https://wp.ufpel.edu.br/residuos/files/2014/04/ABNT-NBR-10005-Lixiviacao-de-Residuos.pdf>. Acesso em: 15 nov. 2022.

\_\_\_\_\_. **ABNT 10006 Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos**. Disponível em: <https://engcivil20142.files.wordpress.com/2018/04/nbr-10006.pdf>

\_\_\_\_\_. **ABNT 10007 Amostragem de resíduos sólidos**. Disponível em: <https://wp.ufpel.edu.br/residuos/files/2014/04/nbr-10007-amostragem-de-resc3adduos-sc3b3lidos.pdf>. Acesso em: 15 nov. 2022.

\_\_\_\_\_. **ABNT 15702 Areia descartada de fundição — Diretrizes para aplicação em asfalto e em aterro sanitário**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

BALDAM, Roquemas de Lima. VIEIRA, Estéfano Aparecido. **Fundição: processos e tecnologias correlatas**. São Paulo: Érica, 2014.

BIOLO, Simone Maríndia. **Reúso de resíduo de fundição areia verde na produção de blocos cerâmicos**. 2005. 162f. Dissertação (Mestrado Acadêmico em Engenharia Área de Concentração: Tecnologia Mineral / Metalúrgica Extrativa) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2005.

BONET, Ivan Ideraldo. **Valorização do resíduo areia de fundição (R.A.F) incorporação nas massas asfálticas do tipo C.B.U.Q.** 2002. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. Florianópolis, 2002.

BORTOLOTTO, T.; BERTOLDO, J. B.; SILVEIRA, F. Z.; DEFAVERI, T. M.; SILVANO, J.; PICH, C. T. Evaluation of the toxic and genotoxic potential of landfill leachates using bioassays. **Environmental Toxicology and Pharmacology**, v. 28, n. 2, p. 288-293, 2009.

BRASIL. **DNIT 031/2004 – ES:** pavimentos flexíveis – concreto asfáltico – especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2004. Disponível em: [https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/especificacao-de-servico-es/dnit031\\_2006\\_es.pdf](https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/especificacao-de-servico-es/dnit031_2006_es.pdf). Acesso em: 15 mar. 2022.

BRASIL. **DNIT 031/2006 – ES:** Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico - Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2006. Disponível em: [https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/especificacao-de-servico-es/dnit031\\_2006\\_es.pdf](https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/especificacao-de-servico-es/dnit031_2006_es.pdf). Acesso em: 15 mar. 2022.

\_\_\_\_\_. **DNER-ME 035/95:** Peneiras de malhas quadradas para análise granulométrica de solos: especificação de material. Rio de Janeiro. IPR, 1995. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/especificacao-de-material-em/dner-em035-95.pdf>. Acesso em: 14 mar. 2022.

\_\_\_\_\_. **DNER-ME 043/95:** Misturas asfálticas a quente – ensaio Marshall: método de ensaio. Rio de Janeiro. IPR, 1995. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/metodo-de-ensaio-me/dner-me043-95.pdf>. Acesso em: 15 mar. 2022.

\_\_\_\_\_. **DNER-ME 053/94:** Misturas asfálticas – percentagem de betume: método de ensaio. Rio de Janeiro. IPR, 1994. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/metodo-de-ensaio-me/dner-me053-94.pdf>. Acesso em: 15 mar. 2022.

\_\_\_\_\_. **DNER-ME 079/94:** Agregado – adesividade a ligante betuminoso. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/metodo-de-ensaio-me/dner-me079-94.pdf>. Acesso em: 15 mar. 2022.

\_\_\_\_\_. **DNER-ME 083/98:** Agregados – análise granulométrica: método de ensaio. Rio de Janeiro. IPR, 1998. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/metodo-de-ensaio-me/dner-me083-98.pdf>. Acesso em: 16 mar. 2022.

\_\_\_\_\_. **DNER-ME 084/95:** Agregado muído – determinação a densidade real. Disponível em: [https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/metodo-de-ensaio-me/dner\\_me\\_084\\_95-1.pdf](https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/metodo-de-ensaio-me/dner_me_084_95-1.pdf). Acesso em: 16 mar. 2022.

\_\_\_\_\_. **DNER-ME 195/97:** Agregados - determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/metodo-de-ensaio-me/dner-me195-97.pdf>. Acesso em: 16 mar. 2022.

\_\_\_\_\_. **Resolução ANP nº 19, de 11.7.2005 DOU 12.7.2005 Republicada DOU 13.7.2005 – Retificada DOU 25.7.2005 – Retificada DOU 17.3.2006.** Disponível em: <http://www.abeda.org.br/wp-content/uploads/2018/10/resoluo-anp-n-19-de-11.7.2005-atualizacao-das-especificacoes-do-cap.pdf>. Acesso: 15 mar. 2022.

BRONDINO, O. C.; BRONDINO, N. C. M.; GALDINO, J. P. O problema do descarte da areia de fundição: ensino para o desenvolvimento sustentável. In: **COBENGE - CALLISTER Jr., W. Ciência e engenharia de materiais: uma introdução.** Tradução: Soares, S. S. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2008.

CHEGATTI, Shirlene. **Aplicação de resíduos de fundição em massa asfáltica, cerâmica vermelha e fritas cerâmicas.** 2004. 122 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. Florianópolis, 2004.

CONCEITOS básicos de toxicologia. **Governo de São Paulo.** 2021. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/emergencias-quimicas/aspectos-gerais/toxicologia/conceitos-basicos-de-toxicologia/>. Acesso em: 08 fev. 2022.

DNIT. Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. **Manual de Pavimentação.** 3 ed. Rio de Janeiro: ENGESUR LTDA, 2006.

FUNDIÇÃO Tupy doa 72 mil toneladas de areia de moldagem para pavimentação da “Costa do Encanto” em Araquari. **Governo de Araquari.** 2016. Disponível em <https://www.araquari.sc.gov.br/noticia/1366/fundicao-tupy-doa-72-mil-toneladas-de-ar>. Acesso em: 09 fev. 2022.

GROOVER, Mikell P. **Introducción a los procesos de manufactura.** México: McGraw-Hill Interamericana, 2014.

GUNEY, Y.; AYDILEK, A. H.; DEMIRKAN, M. M. Geoenvironmental behavior of foundry sand amended mixtures for highway subbases. **Waste Management**, v. 26, n. 9, p. 932–945, jan. 2006.

IMA – Instituto de Meio Ambiente. **IMA.** 2021. Disponível em: <https://www.ima.sc.gov.br/index.php/qualidade-ambiental/residuos-solidos/mtr>. Acesso em: 11 abr. 2022.

IPAT. Instituto de Pesquisas Ambientais e Tecnológicas, UNESC – Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC. **Relatório de análise nº316/2006.** Análise de caracterização de resíduos sólidos. 5 f. Criciúma, 2006.

JAVED, S. LOVELL, C. **Waste foundry sand in asphalt concrete.** Berlim: ISBN, 1995.

KNOP, A.; SCHEIB, W. **Chemistry and Application of Phenolic Resins.** Berlim: ISBN, 1979.

LIEDI, Bariani.; et al. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros.** Rio de Janeiro: ABEDA, 2006.

LYRA J. S. et al. Consolidation of polycarboxylates containing cement pastes: a calorimetric and rheological study. **Cerâmica**, v.58 n.346, p. 104-124, São Paulo, apr/jun, 2012.

MANIA, Bianca Goulart de Oliveira. **Valorização de areias de fundição e conchas de ostras na produção de vidros sódico – cálcicos**. 2017. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

MASTELLA, M. A. **Avaliação mecânica e toxicológica de pavimentos de concreto contendo resíduos de areia de fundição**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências Mecânicas). Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC. Criciúma, 2013.

MONOSI, S.; et al. Effect of two different sources and washing treatment on the properties of UFS by-products for mortar and concrete production. **Construction and Building Materials**, v. 44, n. 1, p. 260–266, jul. 2013.

MOURITZ, A.P.; MATHYYS Z.; et al. Composites part a: applied science and manufacturing. **Science Direct**, v 37 n. 7, p.1040-1054, jul, 2006.

NETO, Benedito Coutinho. **Avaliação do reaproveitamento de areia de fundição como agregado em misturas asfálticas densas**. 2004. 271 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2004.

NGOHANG, F.E.; FONTAINE, G.; GAY, L.; BOURBIGOT, S. Revisited investigation of fire behavior of ethylene vinyl acetate/aluminum trihydroxide using a combination of mass loss cone, Fourier transform infrared spectroscopy and electrical low pressure impactor, **Polym. Degrad. Stab. Polymer Degradation and Stability**, v. 28, n. 106, p. 26–35, mar. 2014.

ORIGEM da cebola, suas partes e morfologia. **Mundo Ecologia**. 2019. Disponível em: <https://www.mundoecologia.com.br/plantas/origem-da-cebola-suas-partes-e-morfologia/>. Acesso em: 09 fev. 2022.

PADILHA, Angelo Fernando. **Materiais de engenharia: microestrutura e propriedades**. São Paulo: Hemus, 2000.

PARTRIDGE, B. K. et al. Field demonstration of highway embankment construction using waste foundry sand. **Transportation Research Record**, n. 99, p. 98–105, jan. 1999.

ROBERTS, F.L.; et al. **Hot Mix Asphalt Materials, Mixture design, and Construction**. Estados Unidos: NAPA Education Foundation, 1991.

SANTOS, C. C. D. **Análise do uso do pó de exaustão proveniente do sistema de regeneração de areia de macharia em concreto convencional**. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) - UDESC, Joinville. 2011.

SENÇO, Wlastermile de. **Manual de técnicas de pavimentação**. 2 ed. São Paulo: Pini, 2008.

SINGH, G.; SIDDIQUE, R. Abrasion resistance and strength properties of concrete containing waste foundry sand (WFS). **Construction and Building Materials**, v. 28, n. 1, p. 421–426, 1 mar, 2012b.

SINGH, G.; SIDDIQUE, R. Effect of waste foundry sand (WFS) as partial replacement of sand on the strength, ultrasonic pulse velocity and permeability of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 26, n. 1, p. 416–422, 1 jan, 2012a.

SIDDIQUE, R. 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, n. 12, p. 216–222, maio, 2015.

SIDDIQUE, R.; et al. Strength, durability, and micro-structural properties of concrete made with used-foundry sand (UFS). **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 4, p. 1916–1925, abr, 2011.

SIDDIQUE, R.; NOUMOWE, A. Utilization of spent foundry sand in controlled low-strength materials and concrete. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 53, n. 1–2, p. 27–35, 2008.

SIDDIQUE, R.; SCHUTTER, G. DE; NOUMOWE, A. Effect of used-foundry sand on the mechanical properties of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 2, p. 976–980, fev, 2009.

SIROMA, Rodrigo Shigueiro. **Avaliação da deformação permanente em misturas asfálticas densas formuladas com areia descartada de fundição (ADF)**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências Mecânicas). Universidade Federal de Santa Catarina. Joinville, 2018.

SOUZA, Carime dos Santos. **Utilização de pó de exaustão de areia de fundição para oxidação eletrolítica assistida por plasma em liga de alumínio**. 2016. 79 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. São Paulo, 2016.

SULFATO de hidrogênio. **Instituto Nacional de Segurança e Saúde Ocupacional (NIOSH)**. 2017. Disponível em: <https://www.cdc.gov/niosh/npg/npgd0337.html>. Acesso em: 08 fev. 2022.

TÂMEGA, Fabio. **Fundição de processos siderúrgicos**. Londrina: Distribuidora Educacional S.A., 2017.

TANG, G.; et al. Effect of aluminum diethylphosphinate on flame retardant and thermal properties of rigid polyurethane foam composites. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 140, n. 2, p. 625–636, 2020.

USER guidelines for waste and byproduct materials in pavement construction - foundry sand. **Report**. 2021. Disponível em: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/97148/027.cfm>. Acesso em: 08 fev. 2022.

VAN VLACK, L. H. **Princípios de ciência e tecnologia dos materiais**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2003.