



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA FRONTEIRA SUL**  
**CAMPUS ERECHIM**  
**PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA**  
**AMBIENTAL**

**MANUELLA DE MORAIS**

**AVALIAÇÃO DA APLICAÇÃO DE AREIA DESCARTADA DE FUNDIÇÃO**  
**EM BASES E SUB-BASES DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS**

**Erechim**

**2019**

**MANUELLA DE MORAIS**

**AVALIAÇÃO DA APLICAÇÃO DE AREIA DESCARTADA DE FUNDIÇÃO  
EM BASES E SUB-BASES DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental da Universidade Federal da Fronteira Sul – UFFS *Campus* Erechim, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciência e Tecnologia Ambiental, sob a orientação dos Prof<sup>o</sup> Dr. Eduardo Pavan Korf e Prof<sup>o</sup> Dr. Francisco Dalla Rosa.

**Erechim**

**2019**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA FRONTEIRA SUL – CAMPUS ERECHIM**

ERS 135 - Km 72, 200

CEP 99700-970

Caixa Postal 764

Erechim – RS Brasil

**Bibliotecas da Universidade Federal da Fronteira Sul - UFFS**

Morais, Manuella de  
Avaliação da aplicação de areia descartada de fundição em bases e sub-bases de pavimentos asfálticos / Manuella de Moraes. -- 2019.  
34 f.:il.  
Orientador: Doutor Eduardo Pavan Korf.  
Co-orientador: Doutor Francisco Dalla Rosa.  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal da Fronteira Sul, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental-PPGCTA, Erechim, RS, 2019.

1. Areia descartada de fundição. 2. Base e sub-base rodoviária. 3. Índice de Suporte Califórnia. 4. Módulo de resiliência . I. Korf, Eduardo Pavan, orient. II. Rosa, Francisco Dalla, co-orient. III. Universidade Federal da Fronteira Sul. IV. Título.

**MANUELLA DE MORAIS**

**AVALIAÇÃO DA APLICAÇÃO DE AREIA DESCARTADA DE FUNDIÇÃO EM  
BASES E SUB-BASES DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental da Universidade Federal da Fronteira Sul – UFFS *Campus* Erechim como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciência e Tecnologia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Pavan Korf

Coorientador: Prof. Dr. Francisco Dalla Rosa

Esta dissertação foi defendida e aprovada em: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Eduardo Pavan Korf – UFFS *Campus* Erechim

---

Prof. Dr. Francisco Dalla Rosa – UPF

---

Prof. Dr. André Bock – UNIJUÍ

---

Prof. Dr. Mauro Leandro Menegotto – UFFS *Campus* Chapecó

Dedico à minha família, amigos e às mulheres e homens pesquisadores do Brasil, que enxergam a ciência como ferramenta para a construção de um país com mais justiça social, contribuindo com o desenvolvimento sustentável do planeta Terra.

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Manoel e Janete, a minha irmã Sarah e a minha tia Elizete, por todos os aportes existenciais que contribuíram para o meu progresso evolutivo em todos os aspectos da minha existência.

A todos aqueles que lutaram no Movimento Pró-Universidade Federal, que resultou na criação da Universidade Federal da Fronteira Sul, universidade pública, popular e gratuita, que oportunizou a mim desenvolvimento pessoal e profissional e a realização desta pesquisa.

Aos professores Dr. Eduardo Pavan Korf e Dr. Francisco Dalla Rosa, pela orientação, paciência, disponibilidade e por todas as contribuições nesta dissertação.

Aos membros da banca, professores Dr. Mauro Leandro Menegotto e Dr. André Luiz Bock pela disponibilidade e por todas as contribuições prestadas desde a qualificação desta dissertação.

Aos colegas, técnicos e professores pesquisadores do Grupo de Pesquisa em Resíduos, Geotecnia Ambiental e Poluição Atmosférica, especialmente aos amigos Willian, Joice e Hevelin, por todo suporte técnico, intelectual e motivacional e principalmente, por fazerem os dias no laboratório mais felizes.

Ao professor Msc. Pedro Bohel, pelo suporte técnico e intelectual, paciência e por todo o auxílio prestado na realização desta pesquisa.

A todos os professores do PPGCTA e aos colegas de mestrado, especialmente as amigas Helga e Rafaela, por todo apoio e conhecimento compartilhado.

A CERCENA S.A. Indústria Metalúrgica, por confiar em mim para contribuir com o desenvolvimento sustentável da empresa e por todo apoio durante a realização desta pesquisa.

A Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, especialmente ao professor Arthur B. Beskow pela disponibilidade e auxílio na realização de parte desta pesquisa.

Aos colegas pesquisadores do Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, pela disponibilidade e auxílio na realização de parte desta pesquisa.

As minhas amigas e amigos do coração, que prestaram apoio incondicional em todos os momentos desta jornada, contribuindo para que esta trajetória fosse mais leve e feliz.

Aos demais amigos e familiares e a todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para a realização desta pesquisa a minha gratidão e carinho para sempre.

Não importa o que fizeram com você. O que importa é o que você faz com aquilo que fizeram com você.

Jean Paul Sartre



## RESUMO

Os produtos oriundos das indústrias de fundição são essenciais a inúmeras cadeias produtivas, como a de transporte e automação. Contudo a geração de subprodutos residuais é significativa, motivando elevada preocupação ambiental com a destinação final dos mesmos. Neste sentido, o presente trabalho tem como objetivo, fomentar uma aplicação técnica e ambientalmente viável para o resíduo areia descartada de fundição produzido em uma indústria de fundição do município de Erechim-RS. Para isso, propôs-se a incorporação de diferentes teores de ADF como agregado em misturas com outros três materiais tradicionalmente utilizados na construção de bases e sub-bases de pavimentos, empregando a técnica de estabilização granulométrica. Os quatro materiais foram caracterizados quanto aos aspectos granulométricos, o que possibilitou projetar misturas de modo a satisfazer duas faixas de trabalho (“A” e “E”) especificadas pelo órgão federal que controla a construção de rodovias. Além disso, as especificações do órgão quanto aos limites de Atterberg e desgaste por abrasão foram também satisfeitas pelos materiais. As misturas com diferentes teores de ADF, moldadas nas condições ótimas, foram então submetidas a ensaios mecânicos de Índice de Suporte Califórnia (ISC) e Módulo de Resiliência (MR). As misturas projetadas com teores de 12% e 2% de ADF (faixas “A” e “E”, respectivamente) apresentaram a maior capacidade de suporte, chegando a apresentar ISC de 267,50% e 111,35%, respectivamente. No caso da faixa “A”, a adição de ADF melhorou as características de suporte da mistura. Os maiores valores de MR foram observados para misturas contendo teores de 12% e 38% (faixas “A” e “E”, respectivamente), entretanto, a variação do teor de ADF dentro de cada faixa não provocou grande variabilidade quanto as características resilientes. Por meio desses ensaios, verificou-se que a adição da ADF às faixas de trabalho “A” e “E” nos teores máximos de 12% e 38%, respectivamente, garante uma estrutura de alta densidade, resistência e pouco suscetível a deformações, podendo ser utilizada para a construção de bases e sub-bases de pavimentos, sem prejuízos de ordem técnica. A classificação ambiental da mistura contendo teor de 38% de ADF concluiu que esta é um resíduo Não Inerte – Classe II A e portanto, comprova a viabilidade ambiental da mistura para uso em bases e sub-bases de pavimentos.

Palavras-chave: Areia descartada de fundição; Base e sub-base rodoviária; Índice de Suporte Califórnia; Módulo de resiliência.

## ABSTRACT

Products from the foundry industries are essential to numerous production chains, such as transportation and automation. However, the generation of residual by-products is significant, motivating a high environmental concern with their final destination. In this sense, the present work aims to promote a technically and environmentally viable application for the sand waste from foundry produced in a foundry industry in the city of Erechim-RS. For this purpose, it was proposed to incorporate different levels of ADF as aggregate in mixtures with three other materials traditionally used in the construction of pavement bases and sub-bases, using the granulometric stabilization technique. The four materials were characterized in terms of granulometric aspects, which made it possible to design mixtures in order to satisfy two working ranges ("A" and "E") specified by the federal agency that controls the construction of highways. In addition, the organ's specifications regarding Atterberg limits and abrasion wear were also met by the materials. The mixtures with different levels of ADF, molded in optimum conditions, were then subjected to mechanical tests of California Bearing Ratio (CBR) and Resilient Modulus (MR). The projected mixtures with contents of 12% and 2% of ADF (range "A" and "E", respectively) showed the highest support capacity, reaching an CBR of 267.50% and 111.35%, respectively. In the case of range "A", the addition of ADF improved the support characteristics of the mixture. The highest values of MR were observed for mixtures containing levels of 12% and 38% (ranges "A" and "E", respectively), however, the variation of the ADF content within each range did not cause great variability in terms of resilient characteristics. Through these tests, it was found that the addition of ADF to the working ranges "A" and "E" at maximum levels of 12% and 38%, respectively, guarantees a structure of high density, resistance and little susceptible to deformations, it can be used for the construction of pavement bases and sub-bases, without any technical damage. The environmental classification of the mixture containing 38% ADF content concluded that it is a Non-Inert residue - Class II A and therefore, proves the environmental viability of the mixture for use in pavements and sub-floors.

Keywords: Sand waste from foundry; Road base and sub-base; California Bearing Ratio; Resilient modulus.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Materiais: ADF (a), brita $\frac{3}{4}$ (b), pedrisco (c) e pó de brita (d).....	20
Figura 2 - Curvas granulométricas da ADF, pó de brita, pedrisco e brita $\frac{3}{4}$ .....	23
Figura 3 - Curva granulométrica das misturas referentes a faixa “A” do DNIT.....	28
Figura 4 - Curva granulométrica das misturas referentes a faixa “E” do DNIT. ....	28
Figura 5 - Curvas de compactação para amostras ensaiadas com diferentes teores de ADF, relativas a faixa A. ....	29
Figura 6 - Curvas de compactação para amostras ensaiadas com diferentes teores de ADF, relativas a faixa E.....	29
Figura 7 - Relação entre o teor de ADF <i>versus</i> teor de umidade ótimo e <i>versus</i> massa específica seca máxima, relativas a faixa “A”.....	30
Figura 8 - Relação entre o teor de ADF <i>versus</i> teor de umidade ótimo e <i>versus</i> massa específica seca máxima, relativas a faixa "E". ....	31
Figura 9 - Variação do Índice de Suporte Califórnia para misturas com diferentes teores de ADF, referentes as faixas de trabalho “A” e “E”.....	33
Figura 10 - Módulo de resiliência <i>versus</i> pressão confinante em escala logarítmica para a faixa “A”.....	35
Figura 11 - Módulo de resiliência <i>versus</i> pressão confinante em escala logarítmica para a faixa “E”.....	35

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Especificações de materiais a serem utilizados para construção de bases e sub-bases estabilizadas granulometricamente.....	21
Tabela 2 – Teores de material pulverulento da ADF, pó de brita, pedrisco e brita ¾. ....	22
Tabela 3 - Diâmetro efetivo ( $D_{10}$ ), coeficiente de uniformidade (Cu) e de curvatura (Cc) e Classificação HRB para a ADF, pó de brita, pedrisco e brita ¾. ....	23
Tabela 4 - Massa específica, massa específica aparente e absorção de água da ADF para o pó de brita, pedrisco e brita ¾. ....	24
Tabela 5 - Perda por abrasão da brita ¾ e do pedrisco. ....	26
Tabela 6 - Determinação da expansão dos corpos de prova submetidos a determinação do Índice de Suporte Califórnia.....	31
Tabela 7 - Constantes $k_1$ e $k_2$ do modelo melhor ajustado. ....	34
Tabela 8 - Resultados do ensaio de lixiviação para amostra contendo 38% de ADF.....	23
Tabela 9 - Resultados do ensaio de solubilização para amostra contendo 38% de ADF.....	24

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	14
1.1. OBJETIVOS.....	15
1.1.1. Objetivo geral.....	15
1.1.2. Objetivos específicos .....	16
2. ARTIGO CIENTÍFICO.....	16
3. CONCLUSÃO .....	44
4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	45

## 1. INTRODUÇÃO

De acordo com o Censo Mundial de Produção de Fundidos, estima-se que em 2017, foram produzidos mais de 109,9 milhões de toneladas de materiais fundidos, sendo que no *ranking* de produção, o Brasil ocupa a 10ª posição, contribuindo com cerca de 2,2 milhões de toneladas (MODERN CASTING, 2018). Dados da Associação Brasileira de Fundição (2018), estimam que juntas, 1.170 empresas do setor faturaram cerca de US\$ 6,7 bilhões, além de contribuir com a geração de 53 mil empregos diretos. Ao mesmo tempo em que este ramo da indústria apresenta expressiva produtividade a nível mundial e contribui substancialmente com a economia do país, mostra-se de igual significância, a preocupação ambiental com a destinação resíduos provenientes desta atividade, pois somente no ano de 2012, no Brasil, foram gerados cerca de 3 milhões de toneladas de areias descartadas de fundição (ADF) (COUTINHO NETO; FABBRI, 2004).

Devido a propriedade de condutividade térmica, abundância e baixo custo, a areia, juntamente com aglomerantes naturais e aditivos, é empregada nas indústrias de fundição como material de fabricação dos moldes para a produção das peças metálicas, sendo esta mistura, denominada areia verde (KLINSKY *et al.*, 2012). Ao longo de sua vida útil, a areia verde é reintroduzida no processo de fabricação dos moldes até que suas características não estejam mais aptas às funções pretendidas, quando então, faz-se necessária sua substituição e descarte, tornando-se o resíduo conhecido como ADF (ARULRAJAH *et al.*, 2017; BHARDWAJ; KUMAR, 2017).

Apesar da maior parte da ADF ser destinada a aterros industriais de descarte, em virtude de sua classificação como material não inerte, tal opção tem se mostrado inviável em razão dos custos elevados ao empreendedor e da rápida redução da vida útil dos aterros, ambas em decorrência do excessivo montante de resíduo produzido (FERREIRA *et al.*, 2014; YAZOGHLI-MARZOUK *et al.*, 2014). Eventualmente, descartes de ADF diretamente sobre o solo sem qualquer tipo de preparação, potencializam os impactos ambientais sob o solo e a água, bem como, à qualidade de vida da população.

O Brasil já possui capacidade instalada para produzir 4 milhões de toneladas de materiais fundidos ao ano e, estima-se que em 2022, 75% desta capacidade seja usada, resultando num acréscimo do montante de resíduos gerados, especialmente a ADF (ABIFA, 2018). Sendo os produtos fundidos essenciais em inúmeras cadeias produtivas e a geração de resíduos oriundos desse processo inevitável, faz-se necessário viabilizar alternativas

contrárias à disposição final destes.

De modo a propiciar uma destinação técnica, econômica e ambientalmente viável para a ADF, agregando valor a este resíduo, inúmeros estudos vêm sendo realizados no Brasil e no exterior, investigando o comportamento de materiais ante sua incorporação. Dentre as alternativas de seu reaproveitamento, muitos autores enfatizam seu emprego em obras da construção civil, sobretudo em obras de pavimentação (ABICHOU *et al.*, 2004; AGGARWAL; SIDDIQUE, 2014; ARULRAJAH *et al.*, 2017; COSTA *et al.*, 2010; DYER *et al.*, 2018; GUNNEY; AYDILEK; DEMIRKAN, 2006; JAVED, 1992; YAZOGHLI-MARZOUK *et al.*, 2014). Considerando a necessidade de redução do volume de ADF destinada aos aterros e a demanda de agregados em obras de pavimentação, verifica-se um potencial de aplicação direta deste resíduo em bases e sub-bases de rodovias (FERREIRA *et al.*, 2014; KLINSKY; FABBRI, 2009; PASETTO; BALDO, 2016; PEREIRA *et al.*, 2004).

No entanto, nestas pesquisas, não se observou estudos de viabilidade técnica e ambiental para a estabilização granulométrica, aplicada à bases e sub-bases de pavimentos, utilizando-se apenas o resíduo de fundição e materiais britados, que muitas vezes são os agregados disponíveis na região da obra. Outra preocupação, que representa uma lacuna nos estudos levantados na literatura, é o atendimento pleno de diversas condições técnicas, como o eventual problema de expansibilidade devido à presença de argila bentonítica na ADF, e também a vulnerabilidade ambiental, devido ao risco de lixiviação de compostos tóxicos.

O uso da ADF como matéria prima na pavimentação, além de reduzir ou eliminar a necessidade de disposição final em aterros industriais e/ou aterros clandestinos, evitando acidentes e passivos ambientais, promove a redução da exploração de materiais tradicionalmente usados nestas obras, bem como custos de britagem e transporte. Mediante a verificação de alternativas que comportem a utilização da ADF, também poderá ser estimulada a elaboração de normas técnicas e ambientais, visando evitar prejuízos de qualquer ordem.

## 1.1. OBJETIVOS

### 1.1.1. Objetivo geral

Avaliar a aplicação do resíduo areia descartada de fundição (ADF) em misturas com materiais britados destinadas à construção de bases e sub-bases rodoviárias estabilizadas granulometricamente, considerando o comportamento geomecânico e ambiental.

### 1.1.2. Objetivos específicos

- Caracterizar e classificar granulometricamente a ADF e materiais britados tradicionalmente empregados para base e sub-base construção de pavimentos;
- Projetar misturas dos três materiais britados com adição de diferentes teores de ADF, segundo critérios técnicos estabelecidos pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT);
- Estudar a viabilidade técnica do uso da ADF para construção de bases e sub-bases de pavimentos, com a caracterização e avaliação do comportamento mecânico de diferentes teores de resíduo aplicados em substituição à materiais tradicionais utilizados em obras viárias urbanas;
- Estudar a viabilidade ambiental do uso da ADF em bases e sub-bases de pavimentos, por meio da classificação ambiental do resíduo e dos materiais que se constituem deste.

## 2. ARTIGO CIENTÍFICO

### **AVALIAÇÃO DA APLICAÇÃO DE AREIA DESCARTADA DE FUNDIÇÃO EM BASES E SUB-BASES DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS**

Manuella de Moraes

Estudante de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental – Universidade Federal da Fronteira Sul – *Campus* Erechim, ERS 135, km 72, n° 200, 99700-970, Erechim – RS, Brasil, manuellademorais@gmail.com

Joice Batista Reis

Estudante de Engenharia Ambiental e Sanitária e pesquisadora na Universidade Federal da Fronteira Sul – *Campus* Erechim, ERS 135, km 72, n° 200, 99700-970, Erechim – RS, Brasil, joice.jbr.reis@gmail.com

William Mateus Kubiaki Levandoski

Estudante de Engenharia Ambiental e Sanitária e pesquisador na Universidade Federal da Fronteira Sul – *Campus* Erechim, ERS 135, km 72, n° 200, 99700-970, Erechim – RS, Brasil, williankubi@gmail.com

Hevelin Pagliarini



Estudante de Engenharia Ambiental e Sanitária e pesquisadora na Universidade Federal da Fronteira Sul – *Campus* Erechim, ERS 135, km 72, n° 200, 99700-970, Erechim – RS, Brasil, hevelin.p@outlook.com

Msc. Pedro Eugênio Gomes Boehl

Professor Adjunto – Universidade Federal da Fronteira Sul – *Campus* Erechim, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental, ERS 135, km 72, n° 200, 99700-970, Erechim - RS, Brasil, pedro.boehl@uffs.edu.br

Dr. Francisco Dalla Rosa

Professor Adjunto – Universidade de Passo Fundo, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, BR 285, km 292, 99052-900, Passo Fundo - RS, Brasil, dallarosa@upf.br

Dr. Eduardo Pavan Korf

Professor Adjunto – Universidade Federal da Fronteira Sul – *Campus* Erechim, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental, ERS 135, km 72, n° 200, 99700-970, Erechim - RS, Brasil, eduardo.korf@uffs.edu.br

## RESUMO

A geração de subprodutos residuais na indústria da fundição, como a areia descartada de fundição (ADF) é significativa, motivando pesquisas que tenham como enfoque uma destinação sustentável para o resíduo, como a construção de bases e sub-bases de pavimentos. Entretanto, essa alternativa ainda encontra lacunas a serem preenchidas na literatura, tais como o comportamento de uma mistura de ADF com materiais britados, o atendimento de diversas condições técnicas, como eventuais problemas com expansibilidade e também da vulnerabilidade ambiental. Nesse sentido, este estudo teve por objetivo avaliar a aplicação do resíduo areia descartada de fundição (ADF) em mistura com materiais britados destinadas à construção de bases e sub-bases rodoviárias estabilizadas granulometricamente. Os quatro materiais foram caracterizados quanto a granulometria e aspectos físicos e as misturas destes, submetidas a ensaios mecânicos. O conjunto de ensaios possibilitou projetar misturas que satisfizeram as especificações técnicas do órgão federal que regula a construção de bases e sub-bases de pavimentos. Ensaios de Índice de Suporte Califórnia e Módulo de Resiliência permitiram constatar que a adição da ADF em teor máximo de 12% a faixa de trabalho “A” melhorou as características de suporte da mistura, enquanto para a faixa “E”, a adição de ADF até o teor de 38%, não resultou em alterações expressivas das características de suporte da mistura. Sendo assim, garante-se para ambas as faixas de trabalho uma estrutura de alta densidade, resistência e pouco suscetível a deformações, podendo ser utilizada para a construção de bases e sub-bases sem prejuízos técnicos. A classificação ambiental da mistura contendo teor de 38% de ADF concluiu que

esta é um resíduo Não Inerte – Classe II A e portanto, comprova a viabilidade ambiental da mistura para uso em bases e sub-bases de pavimentos.

Palavras-chave: Areia descartada de fundição; Base rodoviária; Índice de Suporte Califórnia; Módulo de resiliência.

## 1. INTRODUÇÃO

Segundo McIntyre *et al.* (1992) estima-se que para cada tonelada de metal fundido, tenha-se equivalência na produção de areia descartada de fundição (ADF) (FAGUNDES *et al.*, 2010; GUNEY; AYDILEK; DEMIRKAN, 2006; KLINSKY; FABBRI, 2009). A ADF é um subproduto originado da areia verde, que consiste em uma mistura de areia de base, aditivos orgânicos, bentonita e água, sendo empregada majoritariamente na etapa de fabricação do molde no qual o metal líquido será vazado para a fabricação da peça de interesse (CARNIN, 2004; SIDDIQUE; SINGH, 2011).

Para reduzir o volume de ADF, as empresas deste ramo costumam adotar estratégias de reaproveitamento interno, reintroduzindo a mistura ao processo até que esta não esteja mais apta às funções pretendidas, quando então é descartada (ABICHOU *et al.*, 2004; DAYTON *et al.*, 2010). O descarte por sua vez, deve ser realizado em aterros industriais ou aterros específicos, seguindo critérios rigorosos de controle, em virtude de sua classificação segundo a NBR 10004 como material Classe II-A, ou seja, não inerte, podendo ter propriedades como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água (ABNT, 2004a). Sendo assim, sua disposição final representa um custo adicional ao setor, além da geração de um passivo ambiental (CHEGATTI *et al.*, 2013; KLINSKY; FABBRI, 2009).

Com objetivo de desenvolver tecnologias para valorização do resíduo de ADF como matéria-prima de outras atividade, muitos autores tiveram como objeto de pesquisa o reaproveitamento secundário da ADF e dentre os nichos de aplicações, destaca-se o da construção civil, em aplicações como agregado em misturas asfálticas, em concreto e peças cerâmicas, na composição de barreiras hidráulicas e barreiras reativas permeáveis e como material de preenchimento de aterros (DYER *et al.*, 2018; PRABHU; HYUN; KIM, 2014; HOSSINEY *et al.*, 2018; ABICHOU; BENSON; EDIL, 2002; OLIVEIRA *et al.*, 2011; ARULRAJAH *et al.*, 2017).

Outro ramo da construção civil que destaca-se entre as alternativas de reaproveitamento de ADF é a indústria de construção e manutenção de rodovias, principalmente em decorrência da demanda acentuada de agregados, que representam de 70

a 80% em volume em suas estruturas, sobretudo nas camadas de base e sub-base (GÖKALP *et al.*, 2018; ALMEIDA *et al.*, 2018). Além disso, o rigor crescente das normativas ambientais geram obstáculos para a exploração dessas matérias primas em jazidas naturais, o que por consequência, aumenta os custos de aquisição desses recursos, bem como, geram a necessidade de transporte de matérias primas a longas distâncias de modo a satisfazer condições específicas de materiais (ARULRAJAH *et al.*, 2019). Sendo assim, além de conferir sustentabilidade a reciclagem do resíduo, a alternativa reflete na redução da exploração de materiais de origem natural (YAZOGHLI-MARZOUK *et al.*, 2014).

Klinsky e Fabbri (2009) e Ferreira *et al.* (2014) verificaram que estabilização granulométrica de um solo argiloso com teores de 60 e 70% de ADF atendem exigências técnicas para a construção de bases e sub-bases de pavimentos com baixo volume de tráfego e sub-base de pavimentos flexíveis, respectivamente. Yazoghli-Marzouk *et al.* (2014) e Guney, Aydilek e Demirkan (2006), evidenciaram que a ADF, se preparada com a adição de 5,5% e 5,0% de ligante hidráulico (cimento), respectivamente, pode ser aplicada como substituta total dos agregados naturais na construção de camadas de sub-base de pavimentos.

Todavia, observam-se lacunas de pesquisa de modo a verificar a aptidão da ADF em integrar misturas com materiais britados, frequentemente utilizados como material de pavimentação. Além disso, outra preocupação é o atendimento pleno a condicionantes técnicas e ambientais, como os problemas de expansibilidade devido à presença de bentonita na composição da ADF e a lixiviação e solubilização de compostos tóxicos oriundos do material residual. A partir do conhecimento acerca das alterações do comportamento mecânico dos materiais britados, provocados pela adição do material residual, será possível assegurar que a alternativa de reciclagem de ADF em bases e sub-bases de rodovias satisfaçam critérios de desempenho estabelecidos pelo órgão responsável, garantindo condições de segurança aos indivíduos e ao meio ambiente. Sendo assim, o objetivo deste trabalho consiste no estudo do comportamento geomecânico e ambiental de misturas de ADF com materiais britados, destinadas a construção de bases e/ou sub-bases rodoviárias estabilizadas granulometricamente.

## **2. MATERIAIS E MÉTODOS**

### **2.1. MATERIAIS**

A areia descartada de fundição (ADF), trata-se de uma areia verde fornecida pela CERCENA S.A. Indústria Metalúrgica, localizada no município de Erechim/RS (Figura 1a).

Os materiais britados, previamente denominados brita  $\frac{3}{4}$ , pedrisco e pó de brita (Figura 1b, 1c e 1d, respectivamente), foram coletados na Central de britagem do Município de Erechim, sob responsabilidade da prefeitura municipal de Erechim-RS, a qual faz uso destes materiais para a construção de pavimentos urbanos. A rocha de origem dos materiais britados são provenientes dos derrames vulcânicos da Formação Serra Geral situados na região centro-sul do Brasil, compostos predominantemente por basaltos e andesitos (BRASIL, 2010).

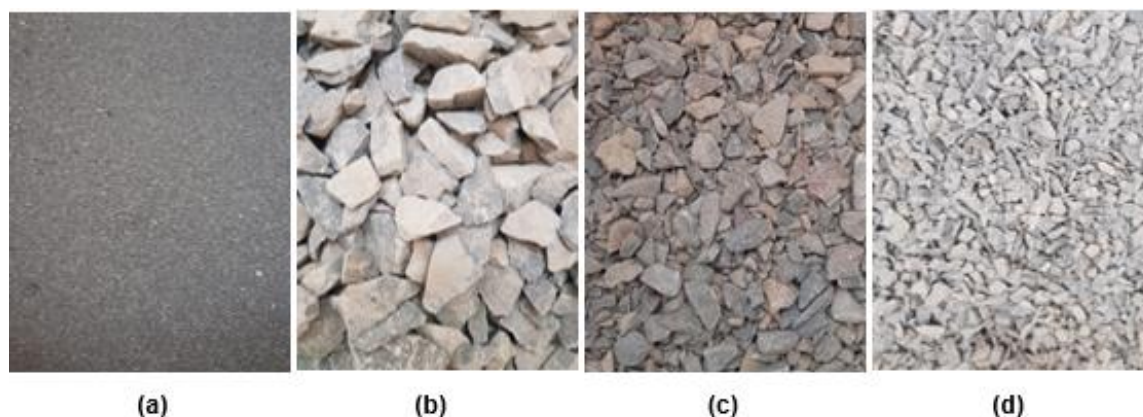


Figura 1- Materiais: ADF (a), brita  $\frac{3}{4}$  (b), pedrisco (c) e pó de brita (d).

Para todos os materiais, os procedimentos de amostragem e redução da amostra por quarteamento foram realizados segundo as metodologias descritas nas normas NBR NM 26 e NBR NM 27 (ABNT, 2001a; ABNT, 2001b).

## 2.2. MÉTODOS

Devido à presença significativa de material pulverulento, os quatro materiais foram ensaiados conforme a norma NBR NM 46 (ABNT, 2003b). Posteriormente, as amostras proveniente desta determinação foram submetidas aos ensaios de granulometria por peneiramento, conforme a norma NBR NM 248 (ABNT, 2003a). Ambos os procedimentos experimentais foram realizados em triplicata e a partir dos seus resultados, obtidos pela média aritmética das determinações, obteve-se a característica granulométrica dos quatro materiais.

Utilizando a NBR NM 52 e a NBR NM 53, foram determinadas as massas específicas dos agregados pela média de duas determinações (ABNT, 2009; ABNT, 2009).

A ADF foi submetida a ensaios para determinação dos limites de Atterberg. Os limites de liquidez (LL) e de plasticidade (LP) seguiram o procedimento experimental descrito nas normas NBR 6459 e NBR 7180, respectivamente (ABNT, 2016; ABNT, 2016).

O desgaste por abrasão foi determinado por meio da NBR NM 51, empregando o equipamento de Abrasão Los Angeles (ABNT, 2001c). A carga abrasiva adicionada junto a amostra, bem como o número de rotações do tambor do equipamento, foram prescritas conforme a graduação da amostra adotada para o ensaio, com base na granulometria do material.

Conforme a norma do DNIT 141/2010 - ES que “define a sistemática a ser empregada na execução de camada de base do pavimento utilizando solo estabilizado granulometricamente”, os materiais a constituintes dessa camada devem possuir composição granulométrica que satisfaça uma das 6 faixas de trabalho apresentadas na norma (DNIT, 2010a). Utilizando a caracterização granulométrica dos materiais, realizou-se os projetos de misturas com diferentes teores de ADF, empregando-se o método das tentativas com auxílio do Software Excel ®.

As normas do DNIT 141/2010 e 139/2010 também preveem especificações físicas e mecânicas para a aprovação deste material para a constituição de bases e sub-bases estabilizadas granulometricamente, respectivamente. Estas especificações estão expressas na Tabela 1.

Tabela 1 - Especificações de materiais a serem utilizados para construção de bases e sub-bases estabilizadas granulometricamente.

<b>Propriedades físicas e mecânicas</b>	<b>Base estabilizada granulometricamente<sup>1</sup></b>	<b>Sub-base estabilizada granulometricamente<sup>2</sup></b>
<b>LL</b>	≤ 25%	-
<b>LP</b>	≤ 6%	-
<b>% passante na peneira n° 200</b>	≤ 2/3 do % passante na peneira n°40	-
<b>ISC</b>	≥ 60% para Número N ≤ 5 X 10 <sup>6</sup> ≥ 80% para Número N > 5 X 10 <sup>6</sup>	≥ 20%
<b>Expansão</b>	≤ 0,5%	≤ 1%
<b>Abrasão Los Angeles</b>	≤ 55%	-
<b>IG</b>	-	= 0

Fonte: <sup>1</sup>DNIT (2010a) <sup>2</sup>DNIT (2010b).

Com base na norma NBR 7182, realizou-se a determinação da massa específica seca máxima e do teor de umidade ótimo para cada mistura, por meio do ensaio de compactação de *Proctor*, empregando para tal, número de camadas e de golpes, bem como, o modelo de soquete correspondente a energia modificada (ABNT, 2016).

Por meio dos procedimentos descritos na norma NBR 9895, foi determinada a expansão e o Índice de Suporte Califórnia (ISC) em corpo de prova moldados nas condições

ótimas para cada mistura, admitindo tolerância de  $\pm 0,5 \%$  para o teor de umidade e  $\pm 0,10 \text{ g/cm}^3$  para massa específica seca (ABNT, 2017).

Corpos de prova também moldados nas condições ótimas, foram utilizados para a determinação do módulo de resiliência das diferentes misturas, empregando o método de ensaio proposto pela norma DNIT 134/2010 – ME no equipamento triaxial cíclico, admitindo tolerância de  $\pm 1,0\%$  para o teor de umidade (DNIT, 2010d).

A fim de estudar os impactos ambientais potenciais gerados com o uso da ADF como material para a constituição de bases e sub-bases de pavimentos, foi realizada a classificação ambiental da mistura ótima conforme a norma NBR 10004 (ABNT, 2004a). Os analitos escolhidos foram selecionados com base nos anexos G e F da NBR 10004 e nos procedimentos experimentais descritos por Biolo (2005) (ABNT, 2004a). A obtenção e análise dos extratos lixiviado e solubilizado foram realizados pela Pró-Ambiente Análises Químicas e Toxicológicas Ltda. de Porto Alegre.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1. CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

Os resultados da determinação do teor de materiais pulverulentos, realizada para a ADF e para os três materiais britados, estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Teores de material pulverulento da ADF, pó de brita, pedrisco e brita  $\frac{3}{4}$ .

Material	ADF	Pó de brita	Pedrisco	Brita $\frac{3}{4}$
Teor de material pulverulento (%)	3,57	7,98	1,55	0,57

Essa determinação é de fundamental importância, uma vez que as faixas de trabalho estabelecidas pelo DNIT, usadas como referência para o projeto de mistura, exigem diferentes quantidades de material de diâmetro inferior a 0,075mm. Nesse contexto, o ensaio de granulometria por peneiramento é ineficaz na determinação do teor de materiais pulverulentos presente em cada agregado, uma vez que estes encontram-se aderidos a superfície dos grãos maiores (DENG e TIKALSKY, 2008). Pode-se verificar, de acordo com a Tabela 2, que o pó de brita apresenta o maior teor de material pulverulento, seguido da ADF, do pedrisco e da brita  $\frac{3}{4}$ . No que diz respeito a ADF, diferentes processos produtivos condicionam diferentes teores de pulverulentos, como pode ser observado nos resultados obtidos por Deng e Tikalsky (2008) e Kleven, Edil e Benson (2000), que caracterizaram

diferentes ADFs. Já os agregados naturais apresentam teores semelhantes aos observados por Gómez-Soberón (2002), que realizou a caracterização de agregados naturais de origem basáltica para a fabricação de concreto.

O teor de pulverulentos de cada material juntamente com os resultados obtidos na análise granulométrica por peneiramento foram utilizados para o cálculo da composição granulométrica. As curvas de distribuição granulométrica dos materiais são apresentadas na Figura 2. Verificou-se que o pedrisco e a brita  $\frac{3}{4}$  tratam-se de agregados graúdos de graduação 2 e 0, respectivamente, enquanto a ADF e o pó de brita, caracterizam-se como agregados miúdos (ABNT, 2003c; ABNT, 2003d; DNER, 1987).

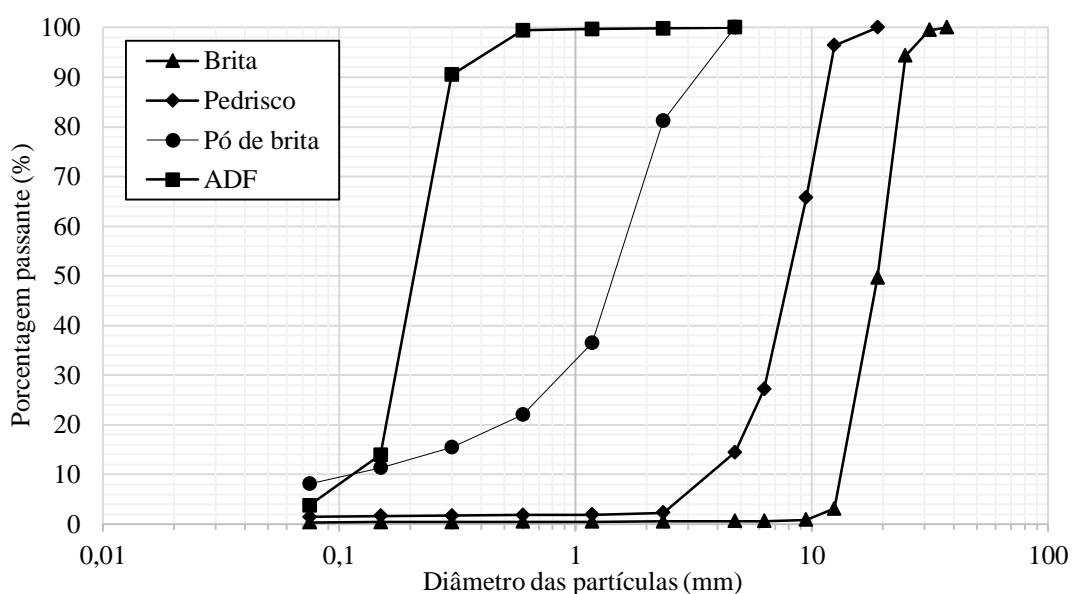


Figura 2 - Curvas granulométricas da ADF, pó de brita, pedrisco e brita  $\frac{3}{4}$ .

Além disso, utilizando-se as curvas granulométricas pode-se obter informações sobre a característica granulométrica dos materiais, como as apresentadas na Tabela 3 para cada agregado. Na Tabela 3, também é apresentada a Classificação *Highway Research Board* (HRB) de cada material, empregada para análise de solos com a finalidade rodoviária.

Tabela 3 - Diâmetro efetivo ( $D_{10}$ ), coeficiente de uniformidade (Cu) e de curvatura (Cc) e Classificação HRB para a ADF, pó de brita, pedrisco e brita  $\frac{3}{4}$ .

Material	ADF	Pó de brita	Pedrisco	Brita $\frac{3}{4}$
<b><math>D_{10}</math> (mm)</b>	0,12	0,11	3,65	13,30
<b>Cu</b>	1,97	15,18	2,47	1,51
<b>Cc</b>	1,10	3,89	1,29	0,95
<b>Classificação HRB</b>	A-3	A-1-b	A-1-a	A-1-a

Por meio da Figura 2 e da Tabela 3, pode-se observar que os quatro materiais estudados possuem características granulométricas distintas, condição imprescindível para o método de estabilização granulométrica. Nesse procedimento construtivo, os materiais de granulometria mais fina preenchem os vazios daqueles de granulometria grossa, garantindo alta densidade, menor permeabilidade e deformabilidade e resistência (BERNUCCI *et al.*, 2008; DNIT, 2010a; DNIT, 2010b).

O  $D_{10}$  pode ser utilizado para se estabelecer uma boa correlação com a condutividade hidráulica do material uma vez que esta é tanto menor quanto menores os vazios deixados pelos grãos que o compõe (CAPUTO, 1988). Pedregulhos são considerados bem graduados quando  $C_u > 4$  e  $1 < C_c < 3$  enquanto para as areias  $C_u > 6$  e  $1 < C_c < 3$ . Sendo assim, verificou-se que nenhum dos materiais atendeu as especificações, sendo considerados desuniformes. Quanto ao material residual, os valores de  $C_u$  e  $C_c$  encontrados são próximos aos apresentados por Arulrajah *et al.* (2017) para uma ADF, 2,06 e 0,92, respectivamente. Segundo a Classificação HRB todos os materiais possuem comportamento excelente a bom no que tange o comportamento dos mesmos como subleito.

A determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água se deu para os quatro materiais e estão apresentadas na Tabela 4. Em virtude do pedrisco possuir mais de 2% de passantes na peneira de abertura 4,75mm, conforme prevê a NBR 53, o material teve sua amostra dividida entre agregados miúdos e graúdos e estas, ensaiadas com as metodologias que as preveem (ABNT, 2009).

Tabela 4 - Massa específica, massa específica aparente e absorção de água da ADF para o pó de brita, pedrisco e brita  $\frac{3}{4}$ .

	Agregados miúdos			Agregados graúdos	
	ADF	Pó de brita	Pedrisco	Pedrisco	Brita $\frac{3}{4}$
<b>Massa específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2,53	2,92	2,98	2,94	2,94
<b>Massa específica aparente (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2,42	2,65	2,70	2,79	2,79
<b>Absorção de água (%)</b>	1,86	3,58	3,52	1,81	1,81

Tratando-se da ADF, a massa específica tem valores próximos aos determinados por Kleven, Edil e Benson (2000), que variaram de 2,52 a 2,73 g/cm<sup>3</sup> para 14 diferentes ADFs. O percentual de absorção é compatível com as determinações realizadas por Deng e Tikalsky (2008), que mencionam que as variações da massa específica e da absorção de água podem ser atribuídas à variação na mineralogia da areia, gradação de partículas, formas de grãos e conteúdo fino. Os três materiais britados tem características de massa específica aparente e



absorção semelhantes as observadas para agregados de origem basáltica, como apresentado por Gökalp *et al.* (2018) e Tunc e Alyamac (2019).

A determinação dos limites de consistência, LL e LP, foi realizada para a ADF considerando que, dos materiais deste estudo, a ADF é o único possuidor de argilominerais, na forma de bentonita. Na determinação do LL observou-se que o fechamento do sulco se dá pela não adesão do material na concha do aparelho de Casagrande e não pelo estado físico do material. O procedimento experimental foi realizado três vezes, obtendo o mesmo comportamento em ambos ensaios e por conseguinte, não se pôde determinar o LL.

O procedimento experimental pelo qual se determina o LP não pode ser realizado, devido à baixa coesividade da ADF, que apresentava aspecto “despedaçado” durante a moldagem do cilindro. Sendo assim, o material foi classificado como não plástico.

Os limites de consistência expressam o comportamento de um solo argiloso em função do seu teor de umidade (CHEGATTI, 2012; PINTO, 2006). Quanto maior o teor de bentonita, argilomineral presente na ADF, maior o teor materiais pulverulentos, uma vez que este material possui diâmetro menor 0,075mm. Verificou-se que a ADF possui teor de materiais pulverulentos de 3,57% e sendo assim, um reduzido teor de bentonita, esclarecendo o comportamento encontrado na determinação dos limites de consistência. Biolo (2005) confirma essa informação, expondo que o teor de bentonita empregada na fabricação da areia verde da CERCENA S.A. Indústria Metalúrgica é de apenas 1%. Arrulhajah *et al.* (2017) e Ferreira (2014) caracterizaram ADFs e apresentaram que a determinação dos limites de Atterberg não são aplicáveis a este material devido ao baixo teor de finos, 2,00% e 1,37%, respectivamente. Além disso, outros autores como Woodson (2011) destacam que areias verdes de fundição com baixos teores de finos são geralmente não plásticas.

Uma vez que a ADF é único material do estudo com conteúdo de argilominerais e esta por sua vez é um material não plástico, uma mistura dos quatro materiais atende os limites observados pela norma DNIT 141/2010 – ES no que diz respeito ao LP e IP (Tabela 1) (DNIT, 2010a).

A determinação do desgaste por abrasão foi realizado para os agregados graúdos, brita  $\frac{3}{4}$  e pedrisco. A norma do ensaio abrasão de Los Angeles prevê que as amostras sejam ensaiadas por meio de procedimentos experimentais específicos conforme sua graduação. Por meio da caracterização granulométrica, verificou-se que a brita  $\frac{3}{4}$  apresentou maior semelhança com a graduação “A”, enquanto o pedrisco, precisou ter sua amostra dividida

em duas graduações, “B” e “C”. Os resultados do desgaste por abrasão estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Perda por abrasão da brita  $\frac{3}{4}$  e do pedrisco.

<b>Material</b>	<b>Pedrisco – Graduação B</b>	<b>Pedrisco – Graduação C</b>	<b>Brita <math>\frac{3}{4}</math> - Graduação A</b>
<b>Perda por abrasão (%)</b>	10,64	16,06	12,26

A importância desta determinação se deve ao fato de que os agregados empregados na construção de bases e sub-bases de pavimentos devem ser robustos e resistentes à abrasão de modo a evitar esmagamento, degradação e desintegração quando armazenados, dispostos em campo com pavimentadora, compactadas com rolos e sujeitos a cargas de tráfego (WU, PARKER & KANDHAL, 1998). Segundo Bernucci *et al.* (2008) “as especificações brasileiras que envolvem o uso de agregados em camadas de base e revestimento de pavimentos, normalmente limitam o valor da abrasão Los Angeles entre 40 e 55%”, garantindo a durabilidade das rodovias. Gökalp *et al.* (2018), estimaram para agregados basálticos perda por abrasão de 9,4%, teor ligeiramente inferior ao encontrado para os materiais britados graúdos. Já Kiliç *et al.* (2008) apresentou teor de abrasão de 23,66% para rocha basáltica. Conforme os critérios da norma DNIT 141/2010 – ES quanto ao desgaste dos materiais submetidos ao ensaio de abrasão Los Angeles (Tabela 1), todos os materiais britados empregados nesse estudo encontram-se aptos a constituir essas camadas.

### 3.2. PROJETOS DE MISTURA

De acordo com os critérios da norma 141/10 – ES do DNIT, realizou-se a seleção de faixas de trabalho que tiveram suas condições satisfeitas com a mistura dos três materiais britados e da ADF (DNIT, 2010a). Sendo assim, procedeu-se por tentativas, a verificação de cada uma das faixas de trabalho.

Na verificação, as faixas “D” e “F” foram imediatamente eliminadas pois mesmo que seja adicionado um percentual de 100% e 98% do material com o maior teor de pulverulentos, respectivamente, a condição da peneira de abertura 0,075mm não é satisfeita. A faixa “C” também foi eliminada em virtude da insuficiência de material capaz de satisfazer as condicionantes das peneiras 0,425 e 0,075mm. Dessa forma, percebe-se que o baixo teor de pulverulentos presente nos materiais foi o principal fator limitante na seleção das faixas.

Considerando a faixa granulométrica “B”, verificou-se limitações nos materiais quanto ao percentual que deve ser retido na peneira de abertura 25mm.

Restaram, deste modo, as faixas “A” e “E”. Reduzindo os teores de agregados graúdos ao mínimo necessário, a brita  $\frac{3}{4}$  e o pedrisco devem representar respectivamente 30% e 20% da mistura no que diz respeito a faixa “A”. Nesta condição os teores de adição de ADF vão de 0 a 12%. As condições da faixa “E” são satisfeitas sem a adição de brita  $\frac{3}{4}$  e pedrisco, possibilitando adicionar à mistura teores de 2% a 38% de ADF.

A duas faixas diferem-se pelo número “N”, que é definido pelo número de repetições de um eixo-padrão de 8,2 t, durante o período de vida útil do projeto, que teria o mesmo efeito que o tráfego previsto sobre a estrutura do pavimento (DNIT, 2006). Sendo assim, bases confeccionadas empregando as faixa “A” destinam-se a pavimentos de alto volume de tráfego ( $N > 5 \times 10^6$ ) enquanto as confeccionadas com as faixas “E” destinam-se a pavimentos de baixo e médio volume de tráfego ( $N < 5 \times 10^6$ ). Sendo assim, optou-se por estudar duas faixas de trabalho, a “A” e “E”, contemplando ambos os critérios de tráfego representado pelo número “N”.

Considerando a faixa de trabalho “A”, as misturas foram projetadas contendo os três materiais britados e o resíduo. Estabeleceram três misturas onde mantiveram-se fixos os teores dos agregados graúdos em 30% e 20%, para a brita  $\frac{3}{4}$  e para o pedrisco, respectivamente. O restante do mistura foi composta com os agregados miúdos, pó de brita e ADF. O resíduo foi adicionado em teores de 0%, 6% e 12%, em substituição ao pó de brita. No caso da faixa de trabalho “E”, foram projetadas 4 misturas contendo somente os agregados miúdos. A ADF foi adicionada em teores de 2%, 10%, 22% e 38%, em substituição ao pó de brita.

As Figuras 3 e 4 apresentam, respectivamente, as curvas granulométricas das misturas projetadas e a serem estudadas, dispostas entre os limites inferior e superior das faixas “A” e “E”, respectivamente. Os teores de mistura foram estabelecidos dentro de cada faixa de modo a estudar a análise da influência da adição progressiva da ADF.

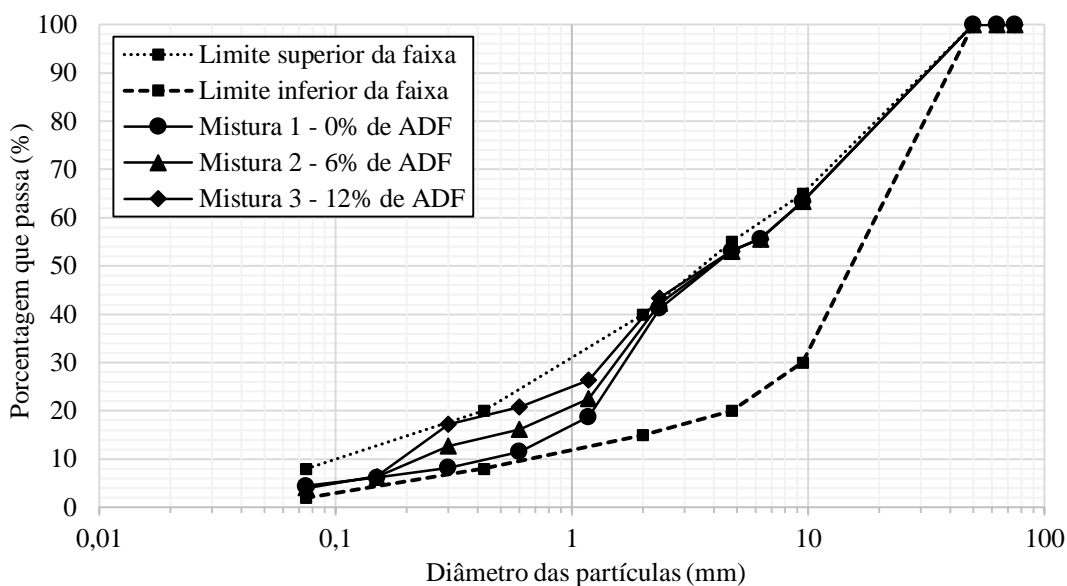


Figura 3 - Curva granulométrica das misturas referentes a faixa “A” do DNIT.

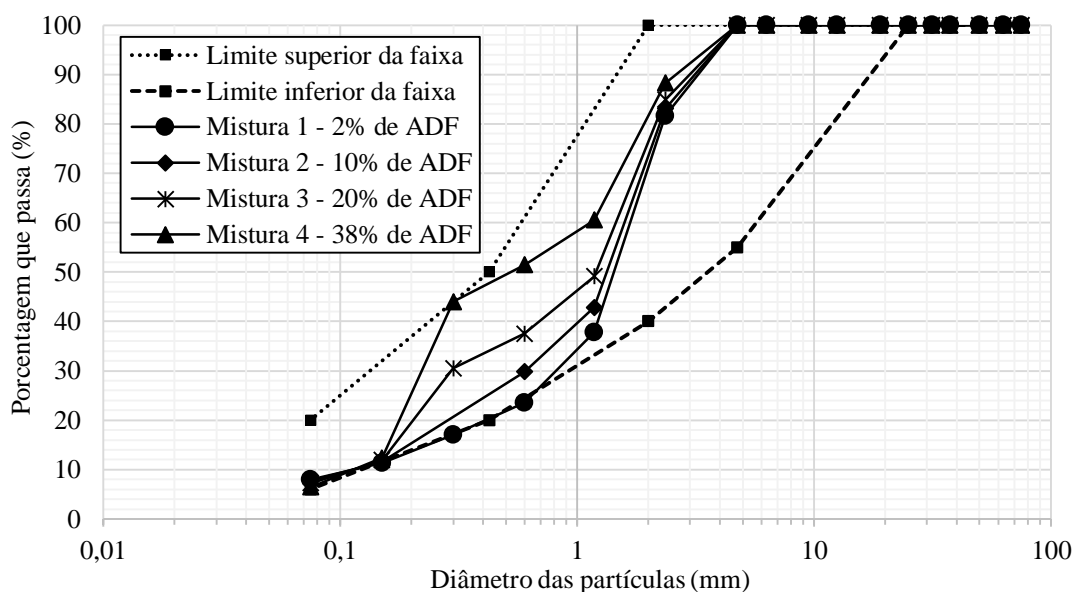


Figura 4 - Curva granulométrica das misturas referentes a faixa “E” do DNIT.

### 3.3. ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO

Na Figura 5 e 6 respectivamente, são apresentadas as curvas de compactação das faixas de trabalho “A” e “E”, obtidas por meio da realização de ensaios de compactação de Proctor na energia modificada.

Inicialmente, percebe-se que para as duas faixas de trabalho há a redução da massa específica seca máxima e o aumento do teor de umidade ótimo conforme ocorre o incremento do teor de ADF. Além disso, as massas específicas alcançadas na compactação, bem como

o formato das curvas obtidas, indicam que as misturas apresentam característica de areias com pedregulho, bem graduadas e pouco argilosas (PINTO, 2006), como a mistura de rocha britada e 27% de ADF estudada por Guney *et al.* (2006), que obtiveram valores de massa específica e teor de umidades próximos aos observados neste estudo.

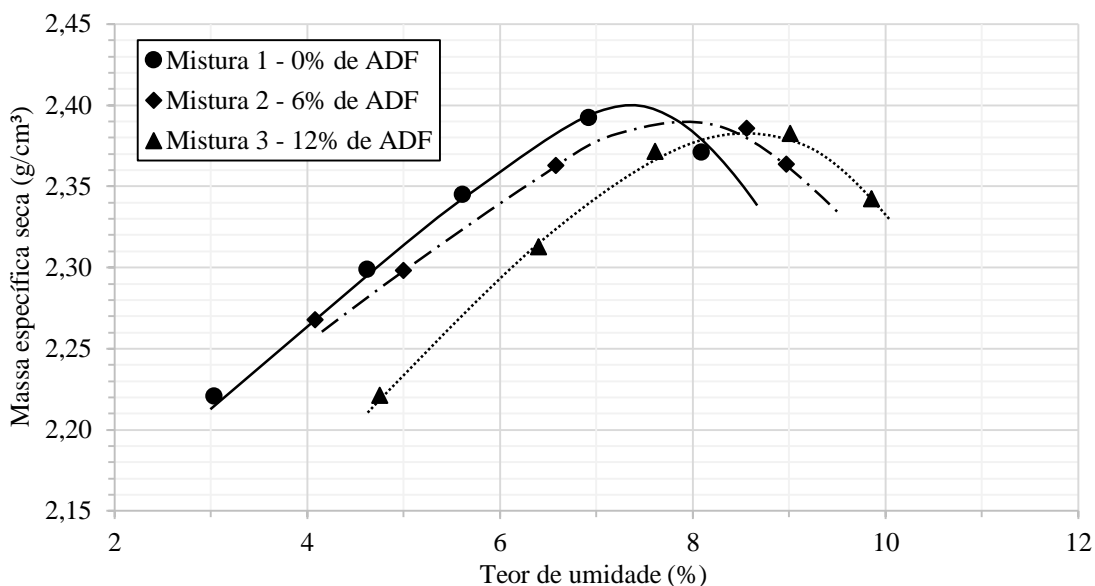


Figura 5 - Curvas de compactação para amostras ensaiadas com diferentes teores de ADF, relativas a faixa A.

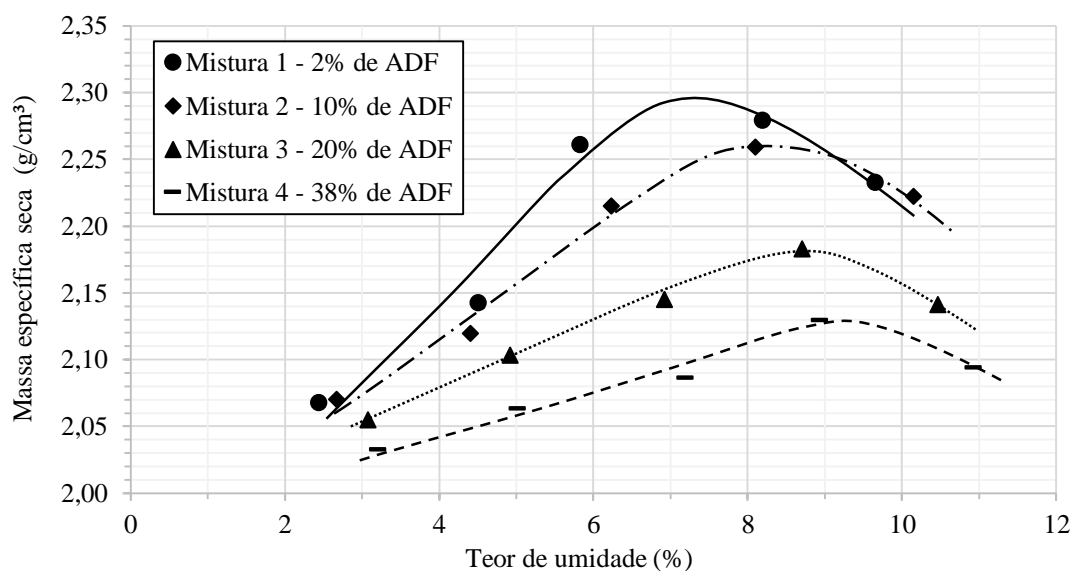


Figura 6 - Curvas de compactação para amostras ensaiadas com diferentes teores de ADF, relativas a faixa E

Esse comportamento pode ser melhor visualizado nas Figuras 7 e 8, onde são apresentadas as relações entre o teor de umidade ótimo e a massa específica seca máxima em função do teor de ADF.

O decréscimo da massa específica seca máxima se deve ao fato da ADF apresentar massa específica mais baixa que os outros materiais constituintes da mistura, inversamente ao que ocorre nos estudos de Pasetto e Baldo (2016), onde o resíduo estudado apresenta massa específica maior que a do solo. Considerando as misturas com teor mínimo e máximo de resíduo, para a faixa de trabalho “A”, a massa específica sofre redução de 0,75%, enquanto para a faixa “E” essa redução é superior, correspondente a 7,07%. Considerando que em ambas faixas de trabalho a adição da ADF se dá em substituição ao pó de brita, a redução mais significativa da massa específica seca máxima na faixa “E” ocorre devido ao teor do resíduo adicionado nas misturas desta faixa ser substancialmente maior.

O teor de umidade sofre aumento de 14,82% e 19,44% para as faixas de trabalho “A” e “E”, respectivamente, considerando as misturas com teor mínimo e máximo de resíduo adicionado. Mohammadinia *et al.* (2017) explicam que a presença de materiais de granulometria mais fina no processo de compactação aumentam a trabalhabilidade da mistura e conseqüentemente reduzem a quantidade de água necessária ao processo. Nesse contexto, o incremento de ADF na mistura causa a redução do teor de material com diâmetro menor que 0,075mm e dessa forma, provoca o aumento do teor de umidade ótimo o que implica em maiores volumes de água necessários para a compactação em campo.

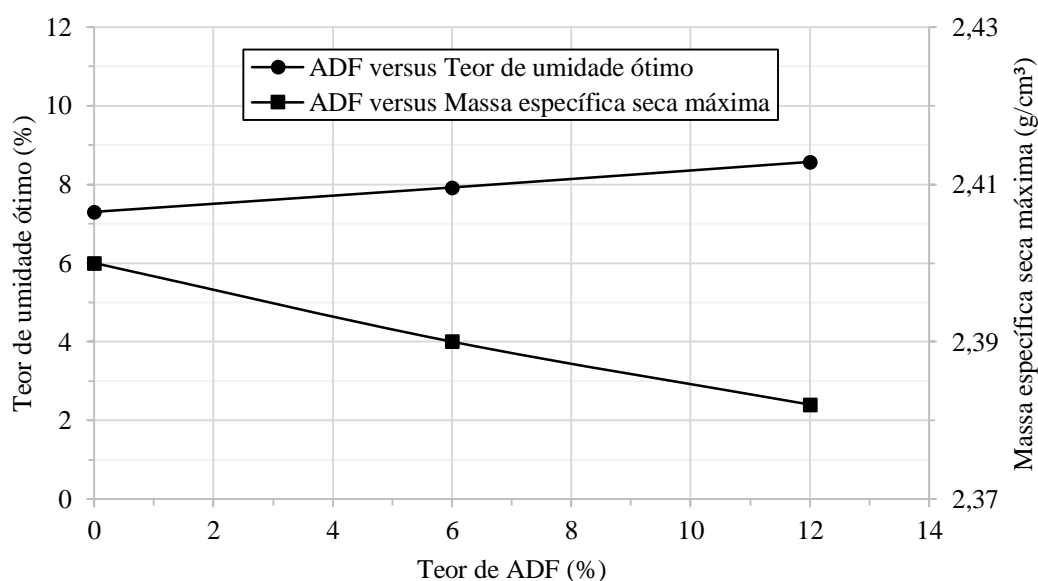


Figura 7 - Relação entre o teor de ADF *versus* teor de umidade ótimo e *versus* massa específica seca máxima, relativas a faixa “A”.

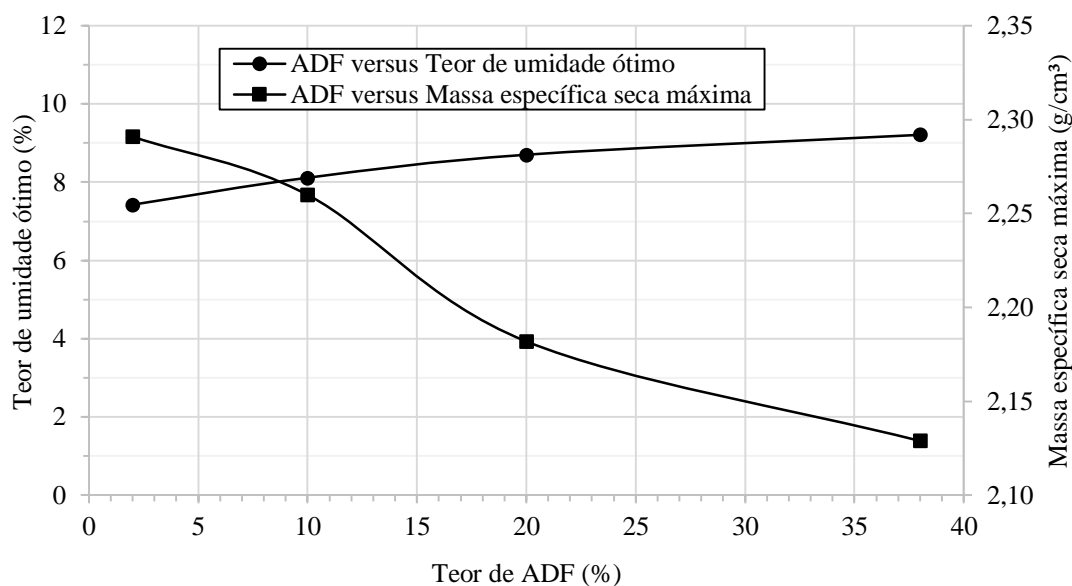


Figura 8 - Relação entre o teor de ADF *versus* teor de umidade ótimo e *versus* massa específica seca máxima, relativas a faixa "E".

### 3.4. EXPANSÃO E ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA

Os resultados dos ensaios de determinação da expansão, realizado para misturas compactadas nas condições ótimas estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Determinação da expansão dos corpos de prova submetidos a determinação do Índice de Suporte Califórnia.

	Faixa E				Faixa A		
Teor de ADF	2%	10%	20%	38%	0%	6%	12%
Expansão (%)	0,01	0,01	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00

Os valores de expansão dos corpos de prova foram todos próximos a zero, estando abaixo dos limites máximos fixados pelas normas brasileiras para aproveitamento de solos para a construção de bases e sub-bases de pavimentos (Tabela 1). Solos com baixos valores de expansão não sofrem deformações expressivas mediante solicitações (BERNUCCI *et al.*, 2008). O resultado obtido evidencia que a adição de ADF não afeta significativamente a expansibilidade da mistura até o teor de 38%, sendo capaz inclusive, de reduzir a expansão de solos argilosos, como observado por Ferreira *et al.*, (2014) e Klinsky e Fabbri (2009). Apesar de possuir bentonita em sua composição, os teores do material argiloso presente na ADF deste estudo é baixo, aproximadamente 1%, como apresentado por Biolo (2005).

Na Figura 9, são apresentados os valores de Índice de Suporte Califórnia para todas as misturas das faixas "A" e "E", nas colunas listradas e pontilhadas, respectivamente,

compactadas nas condições ótimas empregando energia modificada, o que resultou em altos valores de ISC.

No que diz respeito a faixa de trabalho “A”, o incremento de ADF resultou no aumento do ISC em 1,5 vezes comparando as misturas com menor e maior teor de resíduo adicionado, chegando a 267,50% na mistura com teor de 12% de ADF, sendo a maior capacidade de suporte registrada para esta faixa de trabalho. O aumento da capacidade de suporte em decorrência da adição de ADF se deve à melhoria da composição granulométrica da mistura, o que garantiu uma boa estabilização dos materiais.

Os valores observados são bastante superiores aos observados por Arulrajah *et al.*, (2019), com ISC de 130% para um material britado e por Guney, Aydilek e Demirkan (2006), que para misturas de rocha britada e 27% de ADF com e sem ligante cimentício alcançaram ISC de aproximadamente 80% e 155%, respectivamente.

Já para a faixa de trabalho “E”, verificou-se que partindo do teor de 2% de ADF adicionado houve uma tendência geral de redução do ISC para incrementos de ADF resultantes nos teores de 10%, 20% e 38%, respectivamente. Tal comportamento pode ser justificado pela defasagem nas características de resistência do pó de brita para a ADF, considerando as características mineralógica destes materiais, conferindo a mistura menores capacidades de suporte conforme se deu o incremento de ADF. Valores aproximados de ISC foram observados por Saha e Mandal (2017), que estudaram misturas de rocha britada, asfalto recuperado e ligante cimentício em teores de 75%, 25% e 1% respectivamente. A maior capacidade de carga registrada foi correspondente ao teor de 2% de ADF.



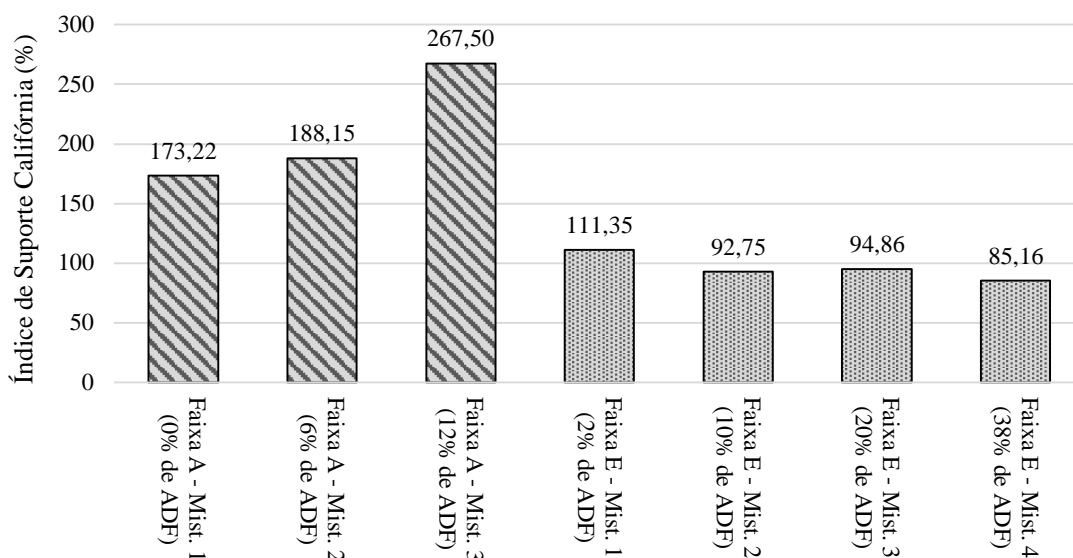


Figura 9 - Variação do Índice de Suporte Califórnia para misturas com diferentes teores de ADF, referentes as faixas de trabalho “A” e “E”.

Tendo em vista que todas os teores de misturas projetados satisfizeram os critérios de desempenho estabelecidos para cada faixa de trabalho e visando propiciar a alocação do maior volume de resíduo possível, para as faixas “A” e “E”, consideram-se os teores ótimos de adição de ADF 12% e 38%, respectivamente.

### 3.5. MÓDULO DE RESILIÊNCIA

Balbo (2007) infere que pelos solos e britas se comportarem de forma elástica não-linear, é fundamental o estabelecimento de modelos comportamentais que sejam capazes de prever as variações no módulo de resiliência em função dos níveis de tensões atuantes nas estruturas. Para solos granulares, onde menos de 50% dos grãos passam na peneira de abertura 0,075mm, os modelos matemáticos mais usados no Brasil estão apresentados na Equação 1 e 2.

$$MR = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \quad \text{Eq. (1)}$$

Em que:  $MR$  é o módulo de resiliência,  $\sigma_3$  a tensão confinante e  $k_1$  e  $k_2$  são as constantes de ajuste do modelo.

$$MR = k'_1 \cdot \Theta^{k'_2} \quad \text{Eq. (2)}$$

Em que:  $MR$ : módulo de resiliência,  $\Theta$  é o primeiro invariante de tensões sob a máxima tensão de desvio e  $k'_1$  e  $k'_2$  são as constantes de ajuste do modelo.

Os módulos de resiliência de cada mistura foram ajustados para os dois modelos e verificou-se que o melhor ajuste corresponde ao modelo proposto na Equação 1, que leva em consideração a tensão confinante. A Tabela 7 apresenta os parâmetros  $k_1$  e  $k_2$  obtidos para o modelo ajustado, bem como o coeficiente de determinação  $R^2$ , que indica a representação do módulo de resiliência em função das tensões aplicadas.

Tabela 7 - Constantes  $k_1$  e  $k_2$  do modelo melhor ajustado.

Faixa de trabalho	Mistura	$MR = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2}$		
		$k_1$	$k_2$	$R^2$
Faixa A	1A	1657.0	0.604	0.959
	2A	1841.3	0.621	0.942
	3A	2308.2	0.651	0.952
Faixa E	1E	1215.4	0.693	0.952
	2E	1220.4	0.675	0.945
	3E	1273.4	0.800	0.946
	4E	1421.0	0.717	0.974

Analisando as faixas de trabalho “A” e “E”, verifica-se que as misturas 3 e 4, respectivamente, apresentam os maiores valores de  $k_1$  e portanto, são as misturas correspondentes aos maiores módulos de resiliência para cada faixa. Os valores de  $k_1$  encontrados para as faixas “A” e “E” correspondem a um granito e um basalto, respectivamente, compactados na condição ótima, empregando energia de compactação modificada na pesquisa conduzida por Marmitt (2002) que estudou as propriedades resilientes de três britas utilizadas em pavimentos no sul do Brasil.

As Figuras 10 e 11 interpretam e confirmam os valores de módulo de resiliência para as faixas de trabalho “A” e “E” respectivamente. Observa-se que para a faixa de trabalho “A” o módulo de resiliência apresenta comportamento crescente conforme o incremento de ADF na mistura, sendo que no teor de 12% de ADF corresponde aos maiores valores de módulo de resiliência. Na faixa de trabalho “E”, de modo geral, há pouca variabilidade nas características resilientes dos materiais conforme se dá a adição do resíduo. O módulo de resiliência das misturas são próximos aos observados por Mohammadinia *et al.* (2017), que estudaram misturas de materiais britados e asfalto reciclado com diferentes teores de cinzas volantes compactadas e curadas em diferentes condições.

A partir dos resultados observados, é possível verificar que o método de estabilização granulométrica é eficiente para que a adição da ADF em mistura com materiais britados garanta uma estrutura coesa, de alta densidade, resistência e pouco suscetível a deformações, por meio do intertravamento dos grãos que compõe a mistura.

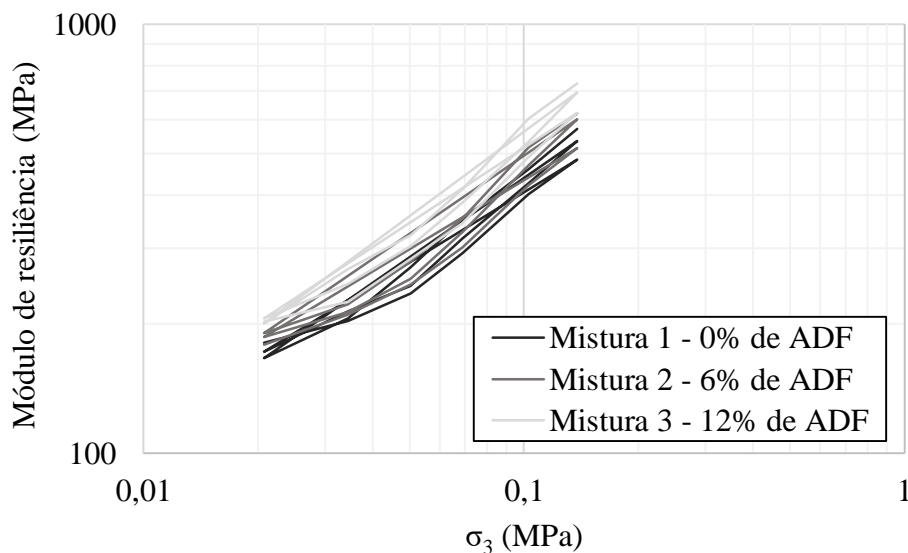


Figura 10 - Módulo de resiliência versus pressão confinante em escala logarítmica para a faixa “A”.

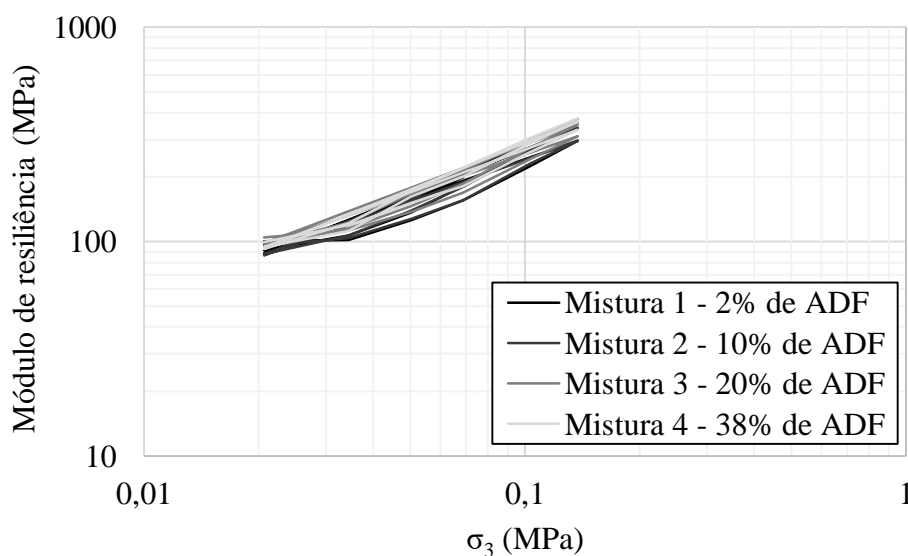


Figura 11 - Módulo de resiliência versus pressão confinante em escala logarítmica para a faixa “E”.

Todas as misturas estudadas atendem os critérios mínimos estabelecidos pela legislação brasileira para emprego em bases estabilizadas granulometricamente destinadas a

rodovias de alto, médio e baixo volume de tráfego ( $N > 5 \times 10^6$  e  $N < 5 \times 10^6$ ), considerando as respectivas faixas de trabalho “A” e “E”. Consequentemente, podem também ser empregadas para constituição de estruturas com critérios menos rigorosos, como as sub-bases. As misturas projetadas podem ser empregadas em teores máximos de 12% de ADF para a faixa de trabalho “A” e 38% para a faixa de trabalho “E”, sem que haja prejuízos de ordem técnica.

### 3.6. CLASSIFICAÇÃO AMBIENTAL

Tendo em vista que todas as misturas estudadas atendem as especificações de materiais a serem utilizados para construção de bases e sub-bases estabilizadas granulometricamente (Tabela 1), optou-se por realizar a classificação ambiental da mistura com o maior teor de ADF, neste caso, a mistura 4 correspondente à faixa “E”, com 38% de ADF. As Tabelas 8 e 9 mostram os resultados dos ensaios de lixiviação e solubilização para a mistura.

A amostra foi classificada como Não Inerte – Classe II A (NBR 10004, 2004a), por excederem no solubilizado a concentração de ferro. Sendo assim, mantém-se a classificação do resíduo bruto (Biolo, 2005), e portanto, comprova a viabilidade ambiental da mistura para uso em bases e sub-bases de pavimentos, sem prejuízos de ordem ambiental.

Tabela 8 - Resultados do ensaio de lixiviação para amostra contendo 38% de ADF.

<b>Parâmetros</b>	<b>Resultados da amostra</b>	<b>Limites máximos (NBR 10004)</b>
<b>Arsênio (mg/L)</b>	ND*	1,0
<b>Bário (mg/L)</b>	ND*	70,0
<b>Cádmio (mg/L)</b>	ND*	0,5
<b>Chumbo (mg/L)</b>	ND*	1,0
<b>Cromo Total (mg/L)</b>	ND*	5,0
<b>Fluoreto (mg/L)</b>	ND*	150,0
<b>Mercúrio (mg/L)</b>	ND*	01
<b>Prata (mg/L)</b>	ND*	5,0
<b>Selênio (mg/L)</b>	ND*	1,0

\*ND – Não detectado

Fonte: Pró-Ambiente Análises Químicas e Toxicológicas Ltda – Laudo Técnico de Classificação de Resíduos Sólidos nº 62655/20.

Tabela 9 - Resultados do ensaio de solubilização para amostra contendo 38% de ADF

<b>Parâmetros</b>	<b>Resultados da amostra</b>	<b>Limites máximos (NBR 10004)</b>
<b>Fenóis Totais</b>	ND*	0,001
<b>Mercurio</b>	ND*	0,001
<b>Arsênio</b>	ND*	0,01
<b>Bário</b>	ND*	0,7
<b>Cádmio</b>	ND*	0,005
<b>Chumbo</b>	ND*	0,01
<b>Cromo Total</b>	ND*	0,05
<b>Alumínio</b>	ND*	0,2
<b>Ferro</b>	2,4	0,3
<b>Manganês</b>	0,05	0,1
<b>Sódio</b>	39,8	200,0
<b>Zinco</b>	ND*	5,0
<b>Cobre</b>	ND*	2,0
<b>Prata</b>	ND*	0,05
<b>Selênio</b>	ND*	0,01
<b>Cianeto</b>	ND*	0,07
<b>Fluoreto</b>	0,7	1,5
<b>Nitrato</b>	ND*	10,0
<b>Cloreto</b>	12,0	250,0
<b>Sulfato</b>	34,3	250,0
<b>Surfactantes</b>	ND*	0,5

\*ND – Não detectado

Fonte: Pró-Ambiente Análises Químicas e Toxicológicas Ltda – Laudo Técnico de Classificação de Resíduos Sólidos nº 62655/20.

#### 4. CONCLUSÃO

Neste estudo, foram avaliados aspectos físicos, geomecânicos e ambientais de misturas de ADF com três materiais britados destinados a aplicação em bases e sub-bases de pavimentos, empregando como método construtivo a estabilização granulométrica. Foram obtidas as seguintes conclusões:

- Verificou-se que o baixo teor de finos presente nos quatro materiais limitou a escolha das faixas de trabalho à duas opções, sendo elas “A” e “E”, com teores máximos de adição do resíduo 12% e 38%, respectivamente;

- Os materiais utilizados nesta pesquisa satisfizeram as especificação quanto ao limite de liquidez e de plasticidade e ao desgaste por abrasão. Sendo assim, quanto a esses critérios, os materiais estão aptos a serem utilizados construção de bases e sub-bases estabilizadas granulometricamente.

- O incremento do teor de ADF em cada faixa de trabalho provocou a redução da massa específica seca máxima e o aumento do teor de umidade ótimo durante a compactação.

- As misturas não apresentaram expansões significativas, descartando eventuais problemas na estrutura dos pavimentos sob a presença de água. Quando submetidos aos ensaios de ISC, os corpos de prova apresentaram alta capacidade de suporte, chegando a valores máximos de 267,50% e 111,35% para os teores de 12% e 2%, correspondentes as faixas “A” e “E”. No que diz respeito a faixa “A”, a adição progressiva de ADF na mistura melhorou as características de suporte da mistura. Estabeleceram-se como teores ótimos de adição de ADF 12% e 38%, respectivos as faixas “A” e “E”.

- Os maiores valores de módulo de resiliência foram observados para misturas contendo teores de 12% e 38% (faixas “A” e “E”, respectivamente), determinados ao analisar  $k_1$ , constante de ajuste ao modelo que leva em consideração a tensão confinante. De forma geral, o aumento progressivo do teor de ADF dentro de cada faixa não provocou grande variabilidade quanto as características resilientes das misturas.

- A análise ambiental da mistura contendo teor de 38% de ADF classificou-a, por meio de análises dos extratos lixiviados e solubilizados, como um resíduo Não Inerte – Classe II A, comprovando além da viabilidade técnica, a viabilidade ambiental do uso misturas de material britado, contendo até 38% de ADF em sua composição, para bases e sub-bases de pavimentos.

## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABICHOU, Tarek *et al.* Beneficial use of foundry by-products in highway construction. **Geotechnical Engineering for Transportation Projects**, v. 1, n. 126, p. 715-722, 2004.

ABICHOU, Tarek; BENSON, Craig H.; EDIL, Tuncer B. Foundry green sands as hydraulic barriers: Field study. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 128, n. 3, p. 206-215, 2002.

ABIFA - Associação Brasileira de Fundição. Anuário ABIFA 2018: Guia ABIFA de

Fundição. São Paulo, 2018.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6459: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1984a.

\_\_\_\_\_. NBR 7180: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1984b.

\_\_\_\_\_. NBR 7182: Solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2016.

\_\_\_\_\_. NBR 9895: Solo – Índice de Suporte Califórnia. Rio de Janeiro, 2017.

\_\_\_\_\_. NBR 10004: Resíduos sólidos – classificação. Rio de Janeiro, 2004a.

\_\_\_\_\_. NBR NM 26: Agregados – Amostragem. Rio de Janeiro, 2001a.

\_\_\_\_\_. NBR NM 27: Agregados - Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório. Rio de Janeiro, 2001b.

\_\_\_\_\_. NBR NM 46: Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003b.

\_\_\_\_\_. NBR NM 51: Agregado graúdo - Ensaio de abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro, 2001c.

\_\_\_\_\_. NBR NM 52: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2003c.

\_\_\_\_\_. NBR NM 53: Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009;

\_\_\_\_\_. NBR NM 248: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003a.

AGGARWAL, Yogesh; SIDDIQUE, Rafat. Microstructure and properties of concrete using bottom ash and waste foundry sand as partial replacement of fine aggregates.

**Construction and Building Materials**, v. 54, p. 210-223, 2014.

ARULRAJAH, Arul *et al.* Recycled waste foundry sand as a sustainable subgrade fill and

pipe-bedding construction material: Engineering and environmental evaluation. **Sustainable Cities and Society**, v. 28, p. 343-349, 2017.

ARULRAJAH, Arul *et al.* Tyre derived aggregates and waste rock blends: Resilient moduli characteristics. **Construction and Building Materials**, v. 201, p. 207–217, 2019.

BALBO, José T. **Pavimentação Asfáltica: materiais, projetos e restauração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

BERNUCCI, Liedi B. *et al.* **Pavimentação Asfáltica - Formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: Petrobras – ABEDA, 2010.

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

BIOLO, Simone M. Reúso do resíduo de fundição areia verde na produção de blocos cerâmicos. Porto Alegre, RS. **Dissertação de mestrado em Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul**, 162p., 2005.

BRASIL. CPRM - Serviço Geológico do Brasil. Ministério de Minas e Energia. **Geodiversidade do estado do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre, 2010.

CAPUTO, Homero P. **Mecânica dos solos e suas aplicações: Fundamentos 6. ed.** Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora TCA, 1988.

CARNIN, Raquel L. P. *et al.* Parte 1: Reaproveitamento do resíduo de areia verde de fundição como material de infra-estrutura para pavimentação e agregado em misturas asfálticas. In: XII Simpósio de Prática de Engenharia Geotécnica da Região Sul – GeoSUL 2004, Curitiba: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica: Universidade Federal do Paraná, v. 4, p. 165-173, 2004.

CHEGATTI, Schirlene. Estudo da influência da bentonita presente nas areias descartadas de fundição na contaminação do solo e águas subterrâneas. Florianópolis, SC. Tese de doutorado em Engenharia Ambiental. Universidade Federal de Santa Catarina, 146p., 2012.



- CHEGATTI, Schirlene *et al.* Avaliação do teor de bentonita em areias descartadas de fundição em função do coeficiente de condutividade hidráulica. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, v. 10, n. 2, p. 146-152, 2013.
- COSTA, Clauber *et al.* Areia descartada de fundição em substituição ao agregado fino em misturas asfálticas para pavimentação. **Revista ABIFA**, v. 123, p. 100–110, 2010.
- COUTINHO NETO, Benedito; FABBRI, Glauco T. P. Avaliação da reutilização da areia de fundição em misturas asfálticas densas do tipo CAUQ. **Revista Transportes**, v.7, p. 50-57, 2004.
- DAYTON, Elizabeth A. *et al.* Characterization of physical and chemical properties of spent foundry sands pertinent to beneficial use in manufactured soils. **Plant and Soil**, v. 329, n. 1, p. 27–33, 2010.
- DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Norma DNER 037 – EM. Agregado graúdo para concreto de cimento – Especificação de material. Rio de Janeiro: IPR, 1987.
- DENG, An; TIKALSKY, Paul J. Geotechnical and leaching properties of flowable fill incorporating waste foundry sand. **Waste Management**, v. 28, n. 11, p. 2161–2170, 2008.
- DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Manual de Estudos de Tráfego. Rio de Janeiro: IPR, 2006.
- \_\_\_\_\_. Norma DNIT 134 – ME. Pavimentação - Solos - Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio. Rio de Janeiro: IPR, 2010d.
- \_\_\_\_\_. Norma DNIT 139 – ES: Pavimentação – Sub-base estabilizada granulometricamente - Especificação de serviço. Rio de Janeiro: IPR, 2010b.
- \_\_\_\_\_. Norma DNIT 141 – ES: Pavimentação – Base estabilizada granulometricamente - Especificação de serviço. Rio de Janeiro: IPR, 2010a.
- DYER, Paulo P. O. L. *et al.* Environmental characterization of foundry waste sand (WFS) in hot mix asphalt (HMA) mixtures. **Construction and Building Materials**, v. 171, p. 474–484, 2018.
- FAGUNDES, Alexandre B. *et al.* Caminhos para a sustentabilidade do setor de fundição no Brasil. **Gestão da Produção, Operações e Sistemas**, v. 5, n. 2, p. 27-40, 2010.

FERREIRA, Gisleiva C. S. *et al.* Viabilidade técnica e ambiental de misturas de solo com areia descartada de fundição. **Revista Transportes**, v. 22, n. 2, p. 62–69, 2014.

PRABHU, Ganesh G.; HYUN, Jung H.; KIM, Yun Y. Effects of foundry sand as a fine aggregate in concrete production. **Construction and Building Materials**, v. 70, p. 514–521, 2014.

GÖKALP, İslam *et al.* Technical and environmental evaluation of metallurgical slags as aggregate for sustainable pavement layer applications. **Transportation Geotechnics**, v. 14, p. 61 – 69, 2018.

GÓMEZ-SOBERÓN, José M. V. Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate: An experimental study. **Cement and Concrete Research**, v. 32, p. 1301 – 1311, 2002.

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

HOSSINEY, Nabil *et al.* In-plant production of bricks containing waste foundry sand: A study with Belgaum foundry industry. **Case Studies in Construction Materials**, v. 9, p. e00170, 2018.

JAVED, Sayeed. Use of waste foundry sand in highway construction: Interim report. **Transportation Research Record**, v. 1, n. JHRP-94/2, p. 0–273, 1992.

KILIÇ, Alaettin M. *et al.* The influence of aggregate type on the strength and abrasion resistance of high strength concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 30, n. 4, p. 290 – 296, 2008.

KLEVEN, Jay. R.; EDIL, Tuncer. B.; BENSON, Craig. H. Evaluation of excess foundry system sands for use as sub-base material. **Transportation Research Record**, v. 1714, n. 00, p. 40–48, 2000.

KLINSKY, Luís M. G.; FABBRI, G. T. P. Reaproveitamento da areia de fundição como material de base e sub-base de pavimentos flexíveis. **Revista Transportes**, v. 1, p. 36–45, 2009.

KLINSKY, L. M. G. *et al.* Reaproveitamento de areia de fundição residual em misturas de areia asfalto usinada a quente. **Revista Transportes**, v. 20, n. 4, p. 27–34, 2012.

MARMITT, Hariane M. Caracterização de propriedades resilientes de três britas graduadas utilizadas em pavimentos no sul do Brasil. Porto Alegre, RS. **Dissertação de mestrado em Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul**, p. 126p., 2022.

MC INTYRE, S. *et al.* Benefication and reuse of foundry sand residuals: A preliminary report. **Transactions of the American Foundrymen's Society**, v. 100, p. 201-208, 1992.

MODERN CASTING. Schaumburg: American Foundry Society, n. 12, dez. 2018.

MOHAMMADINIA, Alireza *et al.* Effect of fly ash on properties of crushed brick and reclaimed asphalt in pavement base/subbase applications. **Journal of Hazardous Materials**, v. 321, p. 547 – 556, 2017.

OLIVEIRA, Patrícia E. F. *et al.* Potential of modified iron-rich foundry waste for environmental applications: Fenton reaction and Cr (VI) reduction. **Journal of Hazardous Materials**, v. 194, p. 393–398, 2011.

PASETTO, Marco; BALDO, Nicola. Recycling of waste aggregate in cement bound mixtures for road pavement bases and sub-bases. **Construction and Building Materials**, v. 108, p. 112–118, 2016.

PINTO, Carlos S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos. 3. ed.** São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

SAHA, Dulal C.; MANDAL, Jnanendranath. Laboratory investigations on reclaimed asphalt pavement (RAP) for using it as base course of flexible pavement. **Procedia Engineering**, v. 189, p. 434 – 439, 2017.

SIDDIQUE, Rafat; SINGH, Gurpreet. Utilization of waste foundry sand (WFS) in concrete manufacturing. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 55, n. 11, p. 885–892, 2011.

TUNC, Esra T.; ALYAMAC, Kursat. E. A preliminary estimation method of Los Angeles abrasion value of concrete aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 222, p. 437 – 446, 2019.

WOODSON, Dodge R. **Concrete Portable Handbook**. Amsterdã: Elsevier, 2011.

WU, Yiping; PARKER, Frazier; KANDHAL, Ken. Aggregate toughness/abrasion resistance and durability/soundness tests related to asphalt concrete performance in pavements. **Transportation Research Record**, v. 1638, p. 85 – 93, 1998.

YAZOGHLI-MARZOUK, O. *et al.* Recycling foundry sand in road construction-field

assessment. **Construction and Building Materials**, v. 61, p. 69–78, 2014.

### 3. CONCLUSÃO

Neste estudo, foram avaliados aspectos físicos, geomecânicos e ambientais de misturas de ADF com três materiais britados destinados a aplicação em bases e sub-bases de pavimentos, empregando como método construtivo a estabilização granulométrica. Foram obtidas as seguintes conclusões:

- A caracterização granulométrica permitiu verificar que os quatro materiais são distintos quanto ao diâmetro dos grãos que compõe suas amostras, sendo esta característica essencial para o emprego da estabilização granulométrica;

- Por meio dos projetos de mistura, verificou-se o baixo teor de finos presente nos materiais tradicionais e na ADF limitou a escolha das faixas à duas opções, sendo elas “A” e “E”, tendo teores mínimos e máximos de adição do resíduo 0-12% e 2-38%, respectivamente;

- A determinação dos limites de liquidez e plasticidade para a ADF concluiu que este é um material não plástico. O desgaste por abrasão dos agregados graúdos foi de 10,64%, 16,06% e 12,26% para o pedrisco (gradação B), pedrisco (gradação C) e brita ¾, respectivamente. Sendo assim, quanto a esses critérios, os materiais satisfazem as especificação presentes na norma do DNIT 141/2010.

- A compactação das misturas atingiu elevadas massas específicas secas e baixos teores de umidade, sendo estes decrescentes e crescentes, respectivamente, conforme o incremento de ADF nas misturas projetadas para ambas faixas de trabalho.

- Os corpos de prova compactados nas condições ótimas não apresentaram expansões significativas, descartando eventuais problemas na estrutura dos pavimentos sob a presença de água. Quando submetidos aos ensaios de ISC, os corpos de prova apresentaram alta capacidade de suporte, chegando a valores de máximos de 267,50% e 111,35% para os teores de 12% e 2%, correspondentes as faixas “A” e “E”, respectivamente, e mínimos de 173,22% e 85,15%, correspondentes as faixas “A” e “E”, respectivamente. No que diz respeito a faixa de trabalho “A”, a adição de ADF melhorou a capacidade de suporte da mistura. Tendo em vista os critérios mínimos de desempenho exigidos pelo órgão regulador para materiais utilizados na construção de bases e sub-bases de pavimentos, todas as misturas projetadas os satisfizeram, considerando cada faixa de trabalho.

- Os maiores valores de módulo de resiliência foram observados para misturas contendo teores de 12% e 38% (faixas “A” e “E”, respectivamente), determinados ao analisar  $k_1$ , constante de ajuste ao modelo que leva em consideração a tensão confinante. De forma geral, o aumento progressivo do teor de ADF dentro de cada faixa não provocou grande variabilidade quanto as características resilientes das misturas.

- A análise ambiental da mistura contendo teor de 38% de ADF classificou-a, por meio de análises dos extratos lixiviados e solubilizados, como um resíduo Não Inerte – Classe II A, comprovando além da viabilidade técnica, a viabilidade ambiental do uso misturas de material britado contendo até 38% de ADF em sua composição para bases e sub-bases de pavimentos.

#### 4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABICHOU, T. *et al.* Beneficial use of foundry by-products in highway construction.

**Geotechnical Engineering for Transportation Projects**, v. 1, n. 126, p. 715–722, 2004.

ABIFA - Associação Brasileira de Fundição. **Anuário ABIFA 2018: Guia ABIFA de Fundição**. São Paulo, 2018.

AGGARWAL, Yogesh; SIDDIQUE, Rafat. Microstructure and properties of concrete using bottom ash and waste foundry sand as partial replacement of fine aggregates.

**Construction and Building Materials**, v. 54, p. 210–223, 2014.

ARULRAJAH, Arul *et al.* Recycled waste foundry sand as a sustainable subgrade fill and pipe-bedding construction material: Engineering and environmental evaluation.

**Sustainable Cities and Society**, v. 28, p. 343–349, 2017.

BHARDWAJ, Bavita; KUMAR, Pardeep. Waste foundry sand in concrete: A review.

**Construction and Building Materials**, v. 156, p. 661–674, 2017.

CARNIN, Raquel L. P. *et al.* Parte 1: Reaproveitamento do resíduo de areia verde de fundição como material de infra-estrutura para pavimentação e agregado em misturas asfálticas. In: XII Simpósio de Prática de Engenharia Geotécnica da Região Sul – GeoSUL 2004, Curitiba: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica: Universidade Federal do Paraná, v. 4, p. 165-173, 2004.

COSTA, Clauber *et al.* Areia descartada de fundição em substituição ao agregado fino em misturas asfálticas para pavimentação. **Revista ABIFA**, v. 123, p. 100–110, 2010.

COUTINHO NETO, Benedito; FABBRI, Glauco T. P. Avaliação da reutilização da areia de fundição em misturas asfálticas densas do tipo CAUQ. **Revista Transportes**, v.7, p. 50-57, 2004.

DYER, Paulo P. O. L. *et al.* Environmental characterization of foundry waste sand ( WFS ) in hot mix asphalt (HMA) mixtures. **Construction and Building Materials**, v. 171, p. 474–484, 2018.

FERREIRA, G. C. S. *et al.* Viabilidade técnica e ambiental de misturas de solo com areia descartada de fundição. **Revista Transportes**, v. 22, n. 2, p. 62–69, 2014.

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

JAVED, S. Use of waste foundry sand in highway construction. **Transportation Research Record**, v. 1, n. JHRP-94/2, p. 0–273, 1992.

KLINSKY, Luís M. G.; FABBRI, G. T. P. Reaproveitamento da areia de fundição como material de base e sub-base de pavimentos flexíveis. **Revista Transportes**, v. 1, p. 36–45, 2009.

KLINSKY, L. M. G. *et al.* Reaproveitamento de areia de fundição residual em misturas de areia asfalto usinada a quente. **Revista Transportes**, v. 20, n. 4, p. 27–34, 2012

MODERN CASTING. Schaumburg: American Foundry Society, n. 12, dez. 2018.

PASETTO, Marco; BALDO, Nicola. Recycling of waste aggregate in cement bound mixtures for road pavement bases and sub-bases. **Construction and Building Materials**, v. 108, p. 112–118, 2016.

YAZOGHLI-MARZOUK, O. *et al.* Recycling foundry sand in road construction-field assessment. **Construction and Building Materials**, v. 61, p. 69–78, 2014.