

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO DE JOINVILLE – CJOI
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIAS DA MOBILIDADE – EMB
CURSO DE ENGENHARIA DE INFRAESTRUTURA

RODRIGO SHIGUEIRO SIROMA

ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DE AREIA DESCARTADA DE FUNDIÇÃO (ADF) NA
FORMULAÇÃO E NO DESEMPENHO MECÂNICO DE MISTURAS DE CONCRETO
ASFÁLTICO

Joinville
2016

RODRIGO SHIGUEIRO SIROMA

ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DE AREIA DESCARTADA DE FUNDIÇÃO (ADF) NA
FORMULAÇÃO E NO DESEMPENHO MECÂNICO DE MISTURAS DE CONCRETO
ASFÁLTICO

Trabalho de conclusão de Curso
apresentado à Universidade Federal de
Santa Catarina (UFSC), Centro de
Joinville, como requisito parcial para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia de Infraestrutura.

Orientador: Prof. Dr. Breno Salgado Barra

Joinville

2016

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Siroma, Rodrigo Shigueiro

Estudo da utilização de areia descartada de fundição (ADF) na formulação e no desempenho mecânico de misturas de concreto asfáltico / Rodrigo Shigueiro Siroma ; orientador, Breno Salgado Barra - Joinville, SC, 2016. 135 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville. Graduação em Engenharia de Infraestrutura.

Inclui referências

1. Engenharia de Infraestrutura. 2. Reaproveitamento da areia descartada de fundição (ADF). 3. Mistura asfáltica densa. 4. Agregado granítico. 5. Comportamento Mecânico. I. , Breno Salgado Barra. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia de Infraestrutura. III. Título.

**ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DE AREIA DESCARTADA DE FUNDIÇÃO (ADF) NA
FORMULAÇÃO E NO DESEMPENHO MECÂNICO DE MISTURAS DE
CONCRETO ASFÁLTICO**

Este trabalho foi julgado para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Infraestrutura, e aprovado em sua forma final pela banca examinadora perante o curso de Engenharia de Infraestrutura da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Centro de Joinville.

Prof^a. Me. Valéria Bennack
UFSC
Centro de Joinville
Coordenadora do Curso de Engenharia de Infraestrutura

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Breno Salgado Barra
Orientador
UFSC
Centro de Joinville

Prof Dr. Yader Alfonso Guerrero Pérez
UFSC
Centro de Joinville

Prof. Dr. Leto Momm
UFSC
Centro de Joinville

AGRADECIMENTOS

Acima de tudo, agradeço a Deus por ter sempre iluminado o meu caminho e me guiado sempre na direção correta, mesmo em períodos de incertezas. Acredito que se hoje eu conquisto essa vitória, não foi apenas pelo meu esforço próprio, mas também pelo apoio de pessoas que acreditaram meu potencial, por isso, eu agradeço novamente a Deus por ter colocado essas pessoas em minha jornada.

Ao meu pai Valdir Shigueiro Siroma e minha mãe Marilda Yamashiro por nunca ter poupado esforços em prover as ferramentas necessárias para o meu desenvolvimento pessoal e profissional. Pelos valores familiares e comportamentais ensinados ao longo da vida. Hoje gostaria de ressaltar os meus agradecimentos as duras e amargas palavras que, por vezes me fizeram voltar a andar no caminho correto, e também as palavras doces que me confortaram em momentos de dificuldade e fraqueza.

Ao meu padrasto Pedro Guenji Nishi e madrasta Priscila Aiko Hiane, que também nunca pouparam esforços em me auxiliar quando precisei. Agradeço ao apoio e por sempre me aconselhar em momentos de dúvidas. Considero-os como verdadeiros pai e mãe para mim.

À minha avó Hatsue Siroma, por ser um símbolo de persistência e fé para mim. Por transmitir sempre os ensinamentos da vida e de nossos antepassados e, por mostrar até hoje que quando gostamos do que fazemos, o trabalho nunca é árduo. Também gostaria de agradecer aos meus avós Maria Fumi Yamashiro e Koho Yamashiro.

Aos meus irmãos Thais, Valdir, Rodolfo, Ayumi e Arissa pelo apoio e carinho incondicional de vocês. Tenho muito orgulho e torço para o sucesso de todos vocês.

À minha namorada, Sandra Tiyoka Deai, por estar sempre ao meu lado e me apoiar em momentos cruciais. Por, mesmo sem saber, me incentivar a ser uma pessoa melhor com sua dedicação, perseverança e bondade. Por ser minha companheira em todos os momentos, até nos ensaios laboratoriais realizados nessa pesquisa. Saiba que se hoje eu colho frutos doces, foi porque você me ajudou a cultivá-los.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Breno Salgado Barra, pela confiança e oportunidade concedida a mim em trabalhar com um tema desafiador. Quero te agradecer

imensamente por toda a paciência e apoio para a concretização desse trabalho. Quero agradecer-lo por ser mais do que um professor, por ser um “parceiro”, em tirar as minhas dúvidas mesmo nos finais de semana e em transmitir ensinamentos que vão além do conhecimento da academia. Saiba que as conversas e conselhos dados pelo professor durante todos esses anos me fazem enxergar com maior clareza as oportunidades para o crescimento pessoal e profissional. Por isso, meu muito obrigado.

Aos meus colegas de laboratório Arethusa Naara Goedert, Gustavo Araldi, Jéssica Lemke Gumiel, Marco Aurélio Coppini e Pedro Augusto Zagolin pelo auxílio nos ensaios laboratórios e as descontrações que fizeram das atividades laboratoriais mais leves e agradáveis.

Aos meus colegas desde a saudosa Turma A de 2011/1, João Vitor Alves, Victor Hugo Benevenuti Muller e Thiago Chierighini que se tornaram mais que amigos, verdadeiros irmãos para mim. Ao meu conterrâneo, e também irmão, Rafael Kiem por me ajudar a se estabelecer em Joinville. Obrigado a todos pelos momentos de descontração em todos esses anos de faculdade.

A todos os meus colegas da faculdade, pelos momentos de descontração e estudos em grupos durante todos esses anos.

Ao bolsista George, do Laboratório de Microfluídica da UFSC-Joinville, pelas belas imagens obtidas da microscopia de elevada resolução.

À técnica do Laboratório de Química da UFSC-Joinville, Vanessa, e ao professor responsável Cláudio Carminatti, por emprestar as instalações do laboratório para dar prosseguimento aos ensaios.

A todos os meus professores de graduação, em especial ao professor Dr. Yader Alfonso Guerrero Pérez e Dr. Marcelo Heidemann, por serem os responsáveis em aumentar o meu interesse na área de pavimentação e mecânica dos solos. Eu gostaria de agradecer também ao ex-professor da UFSC-Joinville, Dr. Murilo Espíndola, pois foram graças às suas aulas que despertou em mim o interesse na área de geologia, definindo assim a minha escolha em seguir a Engenharia de Infraestrutura.

Ao professor Dr. Leto Momm, por ter aceitado prontamente compor a banca de defesa desse trabalho. Quero agradecê-lo também pelas aulas empolgantes da disciplina “Formulação e Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas”. Os ensinamentos e a apresentação, junto ao professor Breno, da metodologia francesa de dimensionamento de pavimentação, abriu minha mente para o estudo de novas abordagens, visando sempre aprimorar a engenharia aplicada em nossa sociedade.

À professora Vanessa Lima por esclarecer todas as minhas dúvidas, desde o início deste trabalho, relacionadas à formatação, conforme normas brasileiras.

À empresa Tupy S.A. de Joinville/SC por ceder os materiais utilizados nesse estudo. Em especial à engenheira Raquel Luiza Pereira Carnin pelo apoio e disposição em me receber na empresa para apresentar um pouco desse vasto mundo da fundição. Gostaria de agradecer também aos funcionários Gilberto e André por enriquecer a visita técnica com informações de anos de experiências.

À ABIFA PR/SC, representado pelo gerente Rangel Carlos Eisenhut, pelo apoio com materiais relacionados aos índices setoriais.

Ao laboratório LAMIR da UFPR (Centro Politécnico) por realizar alguns ensaios desse trabalho e, principalmente, por me receber em seu laboratório e me explicar detalhadamente todos os ensaios.

Ao Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento (CNPq), pelo apoio financeiro concedido através da bolsa de pesquisa.

“Se eu vi mais longe, foi por estar sobre ombros de gigantes.”
Isaac Newton (1676)

RESUMO

A areia descartada de fundição (ADF) é um dos resíduos sólidos industriais de maior volume, e é proveniente do desmolde de peças metálicas produzidas em indústrias de fundição. Dependendo do processo de fundição e da composição do material moldado, a areia resultada pode conter elementos, ou compostos químicos, danosos ao meio ambiente. Visando reduzir possíveis impactos ambientais, o volume gerado de ADF vem se acumulando em aterros industriais ao longo dos anos, implicando no aumento de custos para os produtores e, conseqüentemente, elevando os preços finais dos produtos fundidos. O objetivo desse trabalho é apresentar um estudo comparativo e aplicado na utilização de dois tipos de ADF na composição parcial do esqueleto mineral de misturas asfálticas densas. Para tanto, foram realizados ensaios de caracterização e revisão da literatura técnica para a obtenção de dados referentes ao agregado pétreo granítico e das ADF, provenientes do município de Joinville/SC; e do ligante asfáltico (CAP 50/70) oriundo da refinaria REPAR (Petrobrás), de Araucária/PR. Também foram realizados ensaios de Fluorescência de Raio X (FRX), Difração de Raio X (DRX) e análise com Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS) no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV). No ensaio de Fluorescência de Raio X constatou-se uma elevada presença de dióxido de silício (SiO_2), elemento eletronegativo, em todos os agregados utilizados nesse estudo, explicando a má adesividade desses com o CAP 50/70, também eletronegativo. A formulação dos esqueletos minerais das misturas asfálticas foi definida pela equação de Füller ou Talbot, ou seja, a partir de um método racional. A moldagem dos corpos de provas de misturas asfálticas convencionais (sem adição de ADF) e de misturas asfálticas com cada uma das ADF foi pela metodologia Marshall, recomendada pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) para a obtenção do teor ótimo de betume. Visando obter outros parâmetros do comportamento mecânico, foram realizados os seguintes ensaios: Resistência à Tração Indireta e Resistência à Tração por Umidade Induzida (Lottman Modificado). Todos os resultados referentes à resistência estão em conformidade com os limites normativos. Os valores das estabilidades do ensaio Marshall e os resultados do ensaio de Resistência à Tração Indireta foram levemente inferiores nas misturas asfálticas com ADF, comparadas às convencionais. Entretanto, no ensaio Lottman Modificado, uma das misturas asfálticas com ADF obteve uma resistência à tração indireta superior à da mistura asfáltica convencional. Durante a execução dos ensaios observou que, apesar dos corpos de prova não condicionados do ensaio Lottman Modificado passarem pelos mesmos procedimentos dos utilizados no ensaio de Resistência à Tração Indireta, diferindo apenas na quantidade de golpes realizados na compactação, todas as resistências à tração indireta do Lottman Modificado foram superiores aos do ensaio de Resistência à Tração Indireta. Esses resultados podem indicar uma possível influência do tipo de compactação sobre o comportamento mecânico de misturas asfálticas. O trabalho conclui que, do ponto de vista mecânico, as areias descartadas de fundição analisadas podem ser reaproveitadas na composição parcial do esqueleto mineral de misturas asfálticas densas.

Palavras-chave: reaproveitamento da areia descartada de fundição (ADF), mistura asfáltica densa, agregado granítico, comportamento mecânico

ABSTRACT

The Spent Foundry Sand (SFS) is one of the largest industrial solid waste volume, and it is from the sand casting process in foundry industries. Depending on the foundry process and the composition of the metal, the sand may contain elements or chemical compounds harmful to the environment. Thus, aiming at reducing possible potential environmental impacts, the generated amount of SFS has been accumulating in industrial landfills over the years, implying an increase in costs of the foundry companies and, consequently, raising the final prices of cast products. The main goal of this work is to present a comparative and applied study on the reuse of this material on partial composition of mineral skeleton in dense-graded hot mix asphalt (HMA). Therefore, characterization tests were carried out and a review of the technical literature was made to obtain more information about the granite aggregate and the SFS, from Joinville; and the 50/70 pen bitumen from REPAR Refinery (Petrobras), from Araucária/PR. X-Ray Fluorescence (XRF), X-Ray Diffraction (XRD), and Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) on the Scanning Electron Microscope (SEM) were also conducted. In the XRF analysis were found a higher presence of Silicon Dioxide (SiO_2), electronegative element, in all the aggregates used in this study, explaining the poor adhesion between the aggregates and the bitumen, which is also electronegative. The formulation of the mineral skeletons of asphalt mixtures were defined by the Füller's or Talbot's Equation, i.e., from a rational procedure. The molding of the conventional asphalt mix (without SFS) and SFS asphalt mixes specimens were made according to the Marshall test, recommended by the Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (DNIT) for obtain the optimum bitumen content. Aiming to obtain other mechanical behavior parameters, the following tests were carried out: Indirect Tensile Strength and Modified Lottman. All the test results referring to the resistance were in accordance with the limits established by technical standards. The Marshall stabilities and the Indirect Tensile Strength test results of SFS asphalt mixes were slightly lower than the same conventional asphalt mix parameters. However, the Modified Lottman test presented one of the SFS asphalt mix indirect tensile strength value higher than the conventional asphalt mix indirect tensile strength. During the execution of the tests, it was noted that although the Modified Lottman unconditioned specimens have the same procedures as the Indirect Tensile Strength test specimens, differing only in the number of blows, all the Modified Lottman indirect tensile strength values were higher than the Indirect Tensile Strength test results. These results may indicate a possible influence of the type of compaction on the mechanical behavior of dense-graded hot mix asphalt. From the point of view of mechanical behavior, this work concludes that the spent foundry sand (SFS) analyzed can be reused on partial composition of mineral skeleton in dense-graded hot mix asphalt.

Keywords: reuse of spent foundry sand (SFS), dense-graded hot mix asphalt, granite aggregate, mechanical behavior.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 - Atividades realizadas para alcançar o objetivo dessa pesquisa	23
Figura 2.1 - Classificação dos processos de fundição	27
Figura 2.2 - Maiores produtores de produtos fundidos no ano de 2014	28
Figura 2.3 - Gráfico da série anual da produção brasileira de fundidos	29
Figura 2.4 - Misturador utilizado para fabricar a AVF	30
Figura 2.5 - Molde de areia verde de fundição	31
Figura 2.6 - Macho posicionado dentro do molde	31
Figura 2.7 - Metal líquido sendo vertido na caixa de moldagem	31
Figura 2.8 – ADF E0 (esquerda) e ADF FUC (direita)	33
Figura 2.9 - Componentes principais da Areia Verde de Fundição (AVF)	35
Figura 2.10 - Seção do trecho implantado com ADF em Extrema/MG	44
Figura 3.1 - Localização da Jazida Vogelsanger em relação a Joinville/SC	46
Figura 3.2 - Adesão e coesão do sistema granular-betume	47
Figura 3.3 - Esquema da estrutura coloidal do CAP	48
Figura 3.4 – Várias curvas enquadradas nos limites da Faixa C do DNIT	52
Figura 3.5 - Curva Teórica pelo Método Racional	53
Figura 3.6 - Camadas de uma estrutura de pavimento	55
Figura 4.1 - Frações comercializada da brita fornecida para o estudo	58
Figura 4.2 – Materiais retidos nas peneiras utilizadas para esta pesquisa	58
Figura 4.3 - Ensaio de abrasão Los Angeles	60
Figura 4.4 - Ensaio de Densidade Aparente do agregado graúdo	60
Figura 4.5 - Ensaio de Densidade Real a Vácuo	61
Figura 4.6 - Massa Específica pelo frasco Chapman	62
Figura 4.7 – Massa Específica de material finamente pulverulento (Le Chatelier)	62
Figura 4.8 - Ensaio de Durabilidade	63
Figura 4.9 - MEV utilizado no LAMIR-UFPR	64
Figura 4.10 - Imagens com MEV do pó de brita	64
Figura 4.11 – Sistema EDS acoplado no MEV	66
Figura 4.12 - Imagens microscópicas de elevada resolução. Brita retida na 0,15mm	68
Figura 4.13 - Imagens microscópicas de elevada resolução. Brita retida na 0,6mm	68
Figura 4.14 - Ensaio de Adesividade	70
Figura 4.15 – Descolamento da película de ligante asfáltico	70
Figura 4.16 - Amostra do ensaio ID _M	71
Figura 4.17 - Curva granulométrica do ensaio ID _M	71
Figura 4.18 - Curva Granulométrica da ADF E0 e ADF FUC	73
Figura 4.19 - Grumos encontrados na ADF	73
Figura 4.20 – Esqueleto mineral das misturas asfálticas ADF E0	74
Figura 4.21 - Microscopia de elevada resolução da ADF E0 (retido 0,15mm)	75
Figura 4.22 - Microscopia de elevada resolução da ADF E0 (retido 0,30mm)	76
Figura 4.23 - Microscopia de elevada resolução da ADF FUC (retido 0,15mm)	76
Figura 4.24 - Microscopia de elevada resolução da ADF FUC (retido 0,30mm)	77
Figura 4.25 - MEV da ADF E0	78
Figura 4.26 - MEV da ADF FUC	78

Figura 4.27 - Resultado 1 do sistema EDS para ADF E0 e conjunto de espectros...	79
Figura 4.28 - Resultado 2 do sistema EDS para ADF E0 e conjunto de espectros.....	81
Figura 4.29 - Resultado 1 do sistema EDS para ADF FUC e conjunto de espectros	82
Figura 4.30 - Resultado 2 do sistema EDS para ADF FUC e conjunto de espectros	84
Figura 4.31 – Aparelhos de Difração de Raio X (esquerda) e Fluorescência de Raio X (direita).....	85
Figura 4.32 - Análise mineralógica DRX da ADF E0	86
Figura 4.33 - Análise mineralógica DRX da ADF FUC	86
Figura 4.34 - Resultado da adesividade com ADF FUC e ADF E0	88
Figura 4.35 - Ensaio IDm da ADF E0	89
Figura 4.36 - Ensaio IDm da ADF FUC	89
Figura 4.37 - Curva de Viscosidade	92
Figura 5.1 - Fração graúda (esquerda) e miúda (direita) do esqueleto mineral da ADF E0.....	94
Figura 5.2 - Realização das misturas asfálticas	95
Figura 5.3 - Soquete automático Marshall.....	95
Figura 5.4 - Extração do corpo de prova	96
Figura 5.5 - Corpos de prova Marshall	97
Figura 5.6 - Medição das alturas com paquímetro	97
Figura 5.7 - Corpo de prova parafinado (esquerda) e antes de receber a parafina (direita)	98
Figura 5.8 – Pesagem a seco (esquerda) e pesagem hidrostática (direita)	98
Figura 5.9 - Prensa Marshall	102
Figura 5.10 - Corpo de prova antes (esquerda) e depois (direita) da ruptura	102
Figura 5.11 - Molde para tração indireta	104
Figura 5.12 – Corpo de prova rompido pelo Ensaio de Tração Indireta	104
Figura 5.13 - Saturação do corpo de prova no dessecador	105
Figura 5.14 - Vedação dos corpos de prova.....	106
Figura 5.15- Condicionamento no freezer dos corpos de prova.....	106
Figura 5.16 - Condicionamento na estufa dos corpos de prova	107
Figura 6.1- Densidade Aparente, Teor de Vazios e VCB	109
Figura 6.2 – VAM e RBV	110
Figura 6.3 – Estabilidade e Fluência	111
Figura 6.4 - Diferença de "brilho" de misturas asfáltica de teores de ligante 4,54% e 4,86%	114
Figura 6.5 - Papel de filtro utilizados em diferentes teores.....	115
Figura 6.6 - Diferença de opacidades dos corpos de provas 4,54% e 4,86%	116
Figura 6.7 - Gráfico dos resultados do ensaio de RTI	117
Figura 6.8 - Gráfico das resistências condicionadas e não condicionadas dos materiais.....	120
..... Figura 6.9 - Corpo de prova condicionado (esquerda) e não condicionado (direita) ADF E0.....	122
Figura 6.10 - Corpo de prova condicionado (esquerda) e não condicionado (direita) ADF FUC.....	122
Figura 6.11-Corpo de prova condicionado (esquerda) e não condicionado (direita) Brita.....	122

Figura 6.12 - Gráfico comparativo dos resultados dos ensaios RTI e Lottman 123

LISTAS DE TABELAS

Tabela 2.1 - Variação da composição da AVF	34
Tabela 2.2 - Características física e química do pó de carvão	38
Tabela 2.3 - Classificação de resíduos conforme a ABNT NBR10.004/2004.....	39
Tabela 3.1 - Faixas determinadas pelo DNIT	51
Tabela 4.1 - Resultados dos ensaios de caracterização do agregado pétreo	59
Tabela 4.2 - Resultado do ensaio de Fluorescência de Raio X.....	69
Tabela 4.3 - Resultados de ensaios de caracterização de agregados pétreo e ADF74	
Tabela 4.4 – Análise elementar por Fluorescência de Raio X.....	87
Tabela 4.5 - Resultados dos ensaios de caracterização do ligante asfáltico	90
Tabela 6.1 - Resumo dos valores médios obtidos pelo Ensaio Marshall	108
Tabela 6.2 - Resultados do ensaio de Resistência à Tração Indireta	117
Tabela 6.3 - Resultado do ensaio Lottman Modificado	119
Tabela 6.4 -Relação entre as resistências condicionadas e não condicionadas.....	119
Tabela 6.5 - Relação dos resultados dos ensaios RTI e Lottman	123

LISTA DE ABREVIATURAS

AASHTO	- American Association of State Highway and Transportation Officials
ABIFA	- Associação Brasileira de Fundição
ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
ADF	- Areia Descartada de Fundição
AVF	- Areia Verde de Fundição
CAP	- Cimento Asfáltico de Petróleo
CBUQ	- Concreto Betuminoso Usinado a Quente
CEMP	- Comissão de Estudos de Matérias-primas
CNT	- Confederação Nacional do Transporte
CETESB	- Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
CONSEMA	- Conselho Estadual do Meio Ambiente
DAER	- Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem
DEINFRA/SC	- Departamento Estadual de Infraestrutura de Santa Catarina
DNER	- Departamento Nacional de Estradas de Rodagens
DNIT	- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DRX	- Difração de Raio X
EDS	- Energy Dispersive Spectroscopy
ES	- Especificação de Serviço
FHWA	- Federal Highway Administration
FIRST	- Foundry Industry Recycling Starts Today
FRX	- Fluorescência de Raio X
IP	- Índice de Pfeiffer e Van Doormaal
IPR	- Instituto de Pesquisas Rodoviárias
IME	- Instituto Militar de Engenharia
LAMIR	- Laboratório de Análises de Minerais e Rochas
LCPC	- Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
LDTPav	- Laboratório de Desenvolvimento e Tecnologia em Pavimentação
ME	- Método de Ensaio
MEV	- Microscopia Eletrônica de Varredura

NBR	- Norma Brasileira
PMF	- Pré-Misturado a Frio
RBV	- Relação Betume/Vazio
RTI	- Resistência à Tração Indireta
TKU	- Toneladas por quilômetro útil
UFPR	- Universidade Federal do Paraná
UFSC	- Universidade Federal de Santa Catarina
VAM	- Vazio do Agregado Mineral
VCB	- Vazio Cheio de Betume
%V	- Teor de Vazio

SUMÁRIO

RESUMO.....	9
ABSTRACT	10
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	11
LISTAS DE TABELAS	14
LISTA DE ABREVIATURAS.....	15
SUMÁRIO.....	17
1 INTRODUÇÃO	19
1.1 OBJETIVOS	21
1.1.1 - Objetivo Geral	21
1.1.2 - Objetivos Específicos	21
1.2 PROCEDIMENTOS PARA ALCANÇAR O OBJETIVO	22
1.3 DELIMITAÇÃO DO ESPAÇO DE PESQUISA.....	23
1.4 RELEVÂNCIA DO TEMA	24
1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	24
2 NOÇÕES GERAIS DO PROCESSO DE OBTENÇÃO DA AREIA DESCARTADA DE FUNDIÇÃO (ADF)	26
2.1 CENÁRIO NACIONAL E INTERNACIONAL	27
2.2 CICLO DA AREIA EM PROCESSOS DA FUNDIÇÃO EM AREIA VERDE.....	29
2.3 AREIA DESCARTADA DE FUNDIÇÃO (ADF)	33
2.3.1 - Areia-base.....	35
2.3.2 - Bentonita	35
2.3.3 - Água.....	36
2.3.4 - Pó de carvão	37
2.3 PROBLEMÁTICA DOS RESÍDUOS DE FUNDIÇÃO	38
3 MATERIAIS DE MISTURAS ASFÁLTICAS E CURVA GRANULOMÉTRICA	45
3.1 MATERIAIS UTILIZADOS NA MISTURA ASFÁLTICA	45
3.1.1 - Agregados pétreos	45
3.1.2 - Ligante Asfáltico	46
3.2 CURVA GRANULOMÉTRICA	49
3.1.1 - Método por Tentativa	50
3.1.2 - Método por equação (Método Racional)	52
3.3. MISTURAS ASFÁLTICAS	54
4 MATERIAIS UTILIZADOS NAS MISTURAS ASFÁLTICAS.....	57
4.1 AGREGADO PÉTREO	57
4.2 - AREIA DESCARTADA DE FUNDIÇÃO (ADF).....	72

4.3 LIGANTE ASFÁLTICO	89
5 ENSAIOS LABORATORIAIS	93
5.1 ENSAIO MARSHALL.....	93
5.2 ENSAIO DE TRAÇÃO INDIRETA	103
5.3 ENSAIO LOTTMAN MODIFICADO	104
6 RESULTADOS DOS ENSAIOS LABORATÓRIAS	108
6.1 ENSAIO MARSHALL.....	108
6.2 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO INDIRETA (RTI)	116
6.3 ENSAIO LOTTMAN MODIFICADO	118
7 CONCLUSÕES	124
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA	128

1 INTRODUÇÃO

O aumento expressivo da população mundial nos séculos XX e XXI e, conseqüentemente, dos índices de consumo, tem impulsionado a exploração em grande escala de recursos naturais do planeta. Estamos caminhando para uma grave crise ambiental devido: as reduções drásticas de reservas de matérias-primas, geralmente não renováveis; e ao aumento massivo do volume de resíduos gerados por uma sociedade cada vez maior e mais consumista.

Esse cenário se agrava devido a diversos materiais descartados serem erroneamente classificados como rejeitos. Pela Lei nº12.305/2010 referente a Política Nacional de Resíduos Sólidos, rejeitos são resíduos sólidos que, depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento para reutilização, não possuam outra possibilidade, a não ser a destinação final ambientalmente adequada (BRASIL, 2010).

A indústria de fundição é responsável pela geração de volumes gigantescos de resíduos sólidos, como a areia descartada de fundição (ADF). Apesar de antigo, a moldagem em areia é ainda o método mais utilizado por essa indústria. Os moldes utilizados nesses processos são formados por uma areia silicosa misturada a um aglomerante (argila, cimento, resina) e água. As vantagens dessa técnica se dão pela economia, produções de boa qualidade e admite uma boa sincronia entre a operação de moldagem e a fusão do metal, logo favorecendo a produção em série. Entretanto a areia utilizada na indústria se torna um grande passivo ambiental, já que a mesma fica contaminada por elementos, e compostos químicos, danosos ao meio ambiente (COUTINHO NETO, 2004).

Nesse cenário, a reutilização e a reciclagem mostram-se como opções interessantes. Em ambos os casos, o reaproveitamento de resíduos sólidos visa substituir, parcial ou totalmente, a utilização de matérias-primas naturais em novos produtos.

Os elevados custos dos materiais tradicionais utilizados na pavimentação, aliada a redução da disponibilidade desses recursos na natureza e, até mesmo, da

carência de recursos financeiros, tem gerado o interesse de muitos órgãos governamentais, privados e instituições em investir em pesquisas relacionadas a utilização de materiais reciclados no âmbito da construção rodoviária (STEFENON, 2003).

Essas organizações têm como objetivo conciliar a crescente necessidade na reutilização de resíduos com as exigências técnicas, operacionais e econômicas exigidas pela indústria da construção rodoviária. Devido aos recursos financeiros cada vez mais escassos e a demanda rodoviária a ser construída e mantida ser muito extensa, têm se implementado soluções alternativas construtivas mais econômicas, visando maximizar o efeito de cada unidade monetária disponível (CARNIN, 2008).

De acordo com o Anuário 2016 da Confederação Nacional dos Transportes (CNT, 2016a), a extensão da malha rodoviária brasileira no ano de 2015 era aproximadamente 1.720.643,20 km, porém desta, apenas 210.618,8 km são pavimentadas, representando 12,24% da extensão total. O cenário nacional é preocupante, já que pelo Boletim Estatístico de janeiro de 2016 da CNT (2016b), 61,1% dos transportes de cargas realizados no país, correspondente a 485.625 milhões de toneladas por quilômetro útil (TKU), foram movimentados pelas rodovias, que frequentemente se encontram em condições inadequadas de segurança, conforto de rolamento e economia ao usuário da via.

Nesse contexto, o presente trabalho visa explorar a viabilidade técnica na utilização de 2 tipos de areias descartadas de fundição (ADF E0 e ADF FUC), provenientes de diferentes linhas de produção da sede da empresa Tupy, em Joinville/SC, em misturas asfálticas densas.

A análise foi feita através de um estudo comparativo do comportamento mecânico de misturas asfálticas convencionais (não possuem ADF em sua formulação) e misturas asfálticas compostas com cada uma das ADF. Pretendendo obter-se parâmetros para possibilitar a avaliação do comportamento mecânico, foram realizados os seguintes ensaios: Marshall (Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT NBR 15785/2010), Resistência à Tração Indireta (ABNT NBR 15087/2012) e Resistência à Tração por Umidade Induzida (*American Association of State Highway and Transportation Officials - AASHTO T-283/1989*).

O trabalho é de cunho experimental, se baseando em resultados obtidos através de ensaios laboratoriais das misturas asfálticas produzidas. Realizou-se

também uma revisão na literatura técnica, objetivando complementar informações referentes aos materiais utilizados para compor as misturas asfálticas deste trabalho, e assim possibilitar análises e discussões fundamentadas sobre um embasamento teórico já consagrado em trabalhos anteriores dessa área da pesquisa.

A areia descartada de fundição será apresentada adiante como ADF, por se tratar de uma sigla já consagrada no âmbito das fundições e dos órgãos ambientais do Brasil.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 - Objetivo Geral

Estabelecer uma análise comparativa e aplicada sobre a influência da utilização de areia descartada de fundição (ADF) no desempenho mecânico de misturas asfálticas formuladas com esqueletos minerais densos.

1.1.2 - Objetivos Específicos

- Executar ensaios de caracterização e busca de dados e informações complementares na bibliografia técnica, referentes aos materiais que irão compor as misturas asfálticas analisadas nesse trabalho (ADF, agregado pétreo e ligante asfáltico);
- Compor conjuntos de corpos de prova de mistura asfáltica convencional (sem adição de ADF) e de misturas asfálticas com cada uma das ADF estudadas (ADF E0 e ADF FUC);
- Determinar a dosagem ótima do ligante betuminoso dos diferentes conjuntos de misturas asfálticas produzidas nessa pesquisa, a partir do método Marshall, adotado oficialmente no Brasil para obras de pavimentação pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (DNIT);
- Avaliar o comportamento mecânico dos diversos conjuntos de misturas asfálticas formuladas neste trabalho, através dos resultados obtidos a partir

dos seguintes ensaios: Dosagem Marshall, Resistência à Tração Indireta e Resistência à Tração por Umidade Induzida (Lottman Modificado).

1.2 PROCEDIMENTOS PARA ALCANÇAR O OBJETIVO

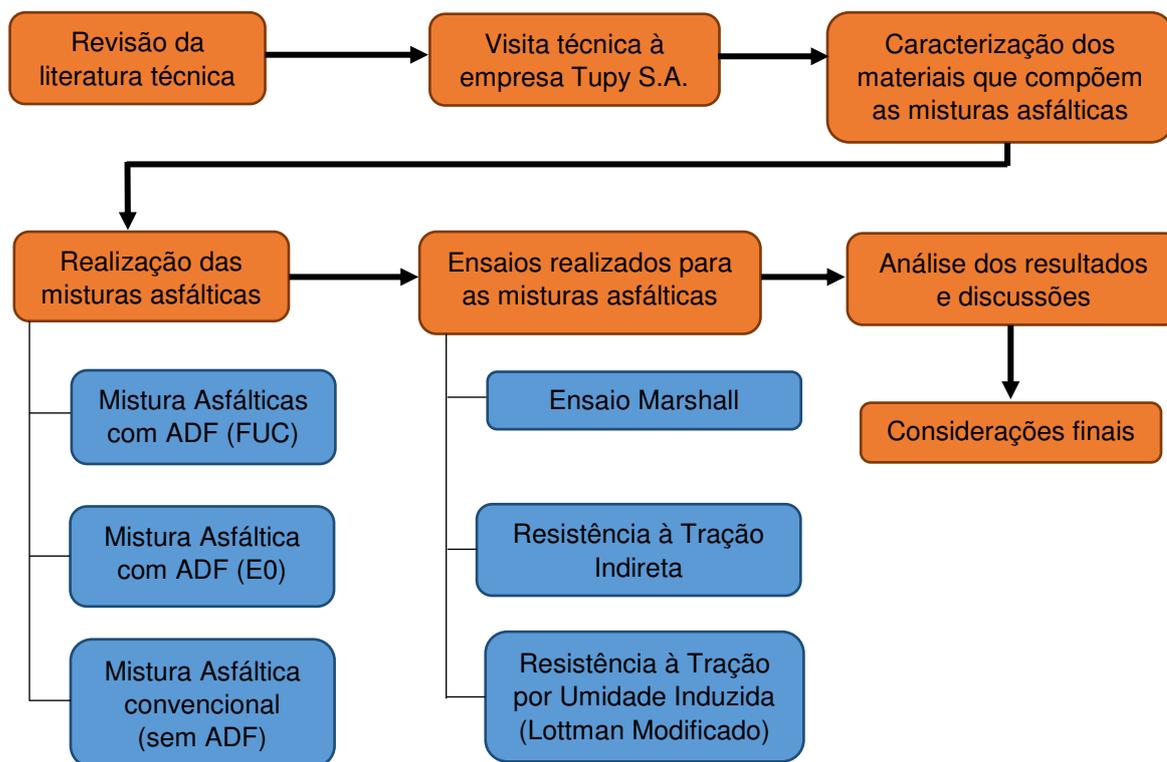
O desenvolvimento desse trabalho iniciou-se com a execução de ensaios de caracterização e obtenção de dados na literatura, referentes aos materiais utilizados para compor as misturas asfálticas analisadas nessa pesquisa, como: agregado pétreo, ligante asfáltico e ADF. Essas informações têm como objetivo fornecer um melhor entendimento sobre o comportamento mecânico das misturas asfálticas produzidas.

Em seguida, foram moldados 3 conjuntos de 25 corpos de prova a partir do ensaio Marshall, resultando um total de 75 corpos de prova. O primeiro conjunto teve seu esqueleto mineral formado apenas por brita (sem ADF), diferente do segundo e terceiro conjunto, onde cada um foi composto por um tipo de ADF proveniente de diferentes linhas de produção da empresa Tupy S.A.

Visando uma análise mais aprofundada em relação ao comportamento mecânico de misturas asfálticas, foram realizados os seguintes ensaios: Resistência à Tração Indireta e Resistência à Tração por Umidade Induzida (Lottman Modificado). Para cada um desses ensaios mencionados, foram produzidos 18 corpos de prova cilíndrico.

Foram moldados um total de 111 corpos de prova cilíndricos durante esta pesquisa. A quantidade de materiais utilizados para realização de todos os ensaios estabelecidos para este trabalho foram aproximadamente: 51kg de ADF, 150kg de brita e 6,1 litros de cimento asfáltico de petróleo (CAP) 50/70. As atividades e os ensaios laboratoriais das misturas asfálticas executados para alcançar o objetivo desta pesquisa estão representados na Figura 1.1.

Figura 1.1 - Atividades realizadas para alcançar o objetivo dessa pesquisa



Fonte: Autor

1.3 DELIMITAÇÃO DO ESPAÇO DE PESQUISA

O desenvolvimento desta pesquisa foi restrito ao âmbito laboratorial, visando estudar os concretos asfálticos elaborados com os materiais granulares oriundos do município de Joinville/SC, a saber: agregado pétreo da empresa Vogelsanger; e 2 tipos de ADF provenientes de diferentes linhas de produções da sede da empresa Tupy S.A. Já o ligante asfáltico é proveniente da refinaria REPAR da Petrobrás, localizada em Araucária/PR.

Os ensaios de caracterização física dos agregados, ADF e das misturas asfálticas formuladas foram realizados no Laboratório de Desenvolvimento e Tecnologia em Pavimentação (LDTPav) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Centro de Joinville.

As imagens de Microscopia de Elevada Resolução das frações finas de brita e das ADF foram obtidas no Laboratório de Microfluídica, também da UFSC, Centro de Joinville.

Já as análises de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), ensaios de Difração de Raio X (DRX) e Fluorescência de Raio X (FRX) foram realizadas no Laboratório de Análise de Minerais e Rochas (LAMIR) da Universidade Federal do Paraná (UFPR) - Centro Politécnico, em Curitiba.

As composições das misturas asfálticas produzidas neste trabalho se aplicam apenas para as condições estabelecidas nessa pesquisa.

1.4 RELEVÂNCIA DO TEMA

As indústrias de fundição brasileira geraram cerca de 2.315.900 toneladas de produtos fundidos em 2015 (Associação Brasileira de Fundição - ABIFA, 2016). Klinsky (2008), Casotti, Bel Filho e Castro (2011) e Chegatti (2012) afirmam que para cada tonelada de metal produzida, são gerados aproximadamente 0,8 a 1 tonelada de ADF. Logo conclui-se que o passivo ambiental gerado pelas fundições no país é preocupante.

O reaproveitamento da ADF, seja no reuso ou na reciclagem, traz grandes benefícios ao meio ambiente e também para as indústrias. Ambientalmente falando, a reutilização desse material resulta em uma redução na quantidade de areia extraída da natureza, logo preservando as reservas presentes em rios e cavas, mitigando os impactos ambientais. Do ponto de vista econômico, a reutilização da ADF pode reduzir os custos do produtor, referentes a diminuição de gastos com o transporte de material até os locais de deposição e também com taxas de armazenamentos nos referidos espaços.

Estudos preliminares sobre o uso da ADF como agregados na pavimentação já foram realizados no Brasil (CARNIN, 2008; COSTA, 2008; COUTINHO NETO, 2004; PEREIRA, 2004; STEFENON, 2003; BONET, 2002) e em outros países com resultados satisfatórios.

1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

A organização desse trabalho está disposta da seguinte maneira:

Capítulo 1: Panorama geral do contexto ao qual está inserido o tema abordado. Relata os objetivos, justificativas, delimitação do espaço de pesquisa, informações prévias sobre os materiais utilizados e alguns procedimentos realizados nesse trabalho.

Capítulo 2: Apresenta dados gerais referentes ao cenário nacional e internacional das indústrias de fundição. É realizada uma contextualização sucinta sobre fundição e suas principais etapas, que resultam na ADF estudada nessa pesquisa. Em seguida, são explicados os principais materiais que compõem a areia verde de fundição (AVF) e discutido brevemente a problemática ambiental da ADF, de acordo com a NBR10.004/2004 e algumas normas estaduais. Ao final desse capítulo é apresentado uma revisão bibliográfica sobre a utilização de ADF nos Estados Unidos e no Brasil.

Capítulo 3: Realiza uma revisão bibliográfica referente a misturas asfálticas. São explanados individualmente os materiais que compõem as misturas asfálticas, como: agregado pétreo e ligante asfáltico. Também são abordadas algumas metodologias de formulações de esqueletos minerais que irão compor as misturas asfálticas analisadas nessa pesquisa.

Capítulo 4: Apresenta os materiais selecionados para compor as misturas asfálticas formuladas nesse trabalho (agregado mineral pétreo, ADF e ligante asfáltico) e os respectivos resultados dos ensaios de caracterização física e mineralógica.

Capítulo 5: Descreve os procedimentos laboratoriais de cada ensaio, referente as análises das propriedades mecânicas das misturas asfálticas.

Capítulo 6: Exposição e discussões referentes aos resultados obtidos dos ensaios laboratoriais das misturas asfálticas.

Capítulo 7: Apresenta as conclusões referentes ao estudo e possíveis temas para trabalhos futuros.

2 NOÇÕES GERAIS DO PROCESSO DE OBTENÇÃO DA AREIA DESCARTADA DE FUNDIÇÃO (ADF)

A fundição consiste no processo de fusão do metal, transformando-o em um líquido homogêneo. E seguida ocorre o vazamento do mesmo em moldes adequados onde, após sua solidificação, resulta em uma peça de forma sólida adequada (BRADASCHIA *et al.*, 1971; KONDIC, 1973; SIEGEL *et al.*, 1981).

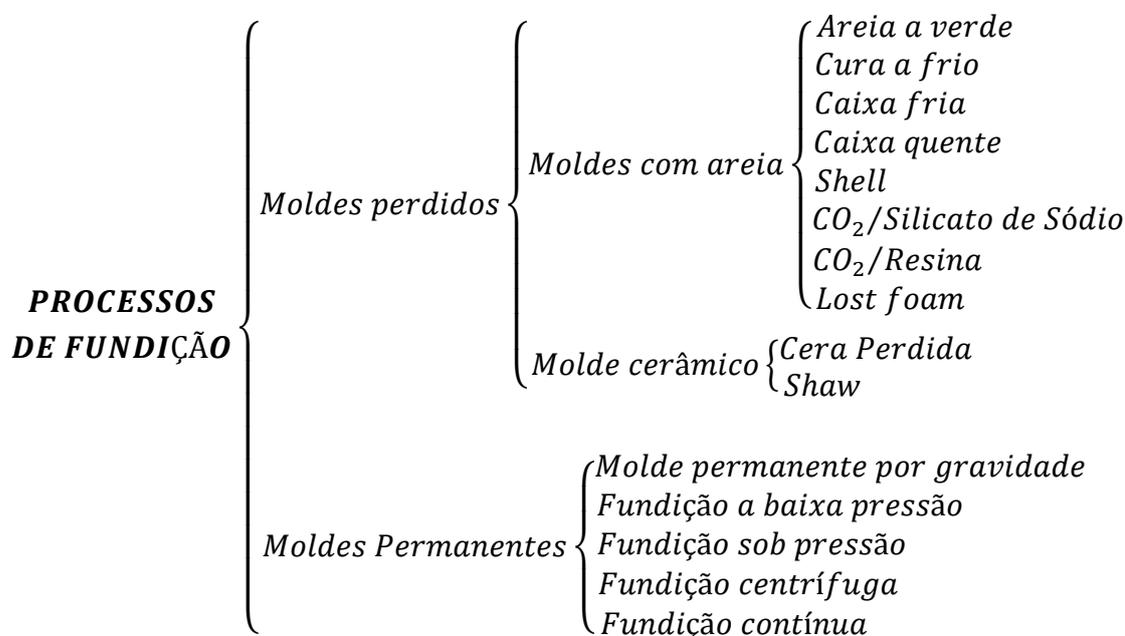
Dentre os diversos métodos utilizados para fabricação de objetos metálicos (usinagem, metalurgia em pó, soldagem, entre outros), a fundição se mostra como a mais versátil, devido a possibilidade de gerar peças de vários formatos, pesos e propriedades metalúrgicas. As tecnologias existentes nessa indústria tornam seus produtos essenciais para os mais diversos tipos de atividades econômicas, como para fins mecânicos, industriais, utilização doméstica, artísticos, entre outros (SIEGEL *et al.*, 1981).

O processo de fundição utilizado determina o grau de precisão dimensional, acabamento e propriedades mecânicas da peça que se pretende fabricar. O tipo de material utilizado no molde influencia na taxa de dissipação de calor, determinando assim o tamanho final dos grãos do material e, conseqüentemente, a resistência mecânica da peça fundida. Por essa razão, os processos dessa atividade são, em geral, classificados de acordo com o tipo de molde escolhido (COUTINHO NETO, 2004; CASOTTI; BEL FILHO; CASTRO, 2011).

Dentre os vários processos de moldagens existentes, o processo de areia verde destaca-se devido: a facilidade de obtenção dos moldes; a quantidade produzida, a possibilidade de reutilização da areia após a desmoldagem; e principalmente ao baixo custo de suas matérias-primas. Entretanto, apesar das vantagens citadas, o molde de areia é o mais suscetível a possibilidade de ocorrer refugo da peça moldada. Além disso, o esforço necessário para se preparar uma areia de moldagem com qualidade é muito superior comparado ao preparo do metal (HERMANN; REINERT; DUARTE, 2014).

Apesar de não ser o foco deste trabalho se aprofundar na área de fundição, serão apresentados alguns tópicos que abrangem essa atividade, que resulta na ADF estudada nesse trabalho. Neste capítulo será realizado uma breve apresentação do cenário nacional e internacional da indústria de fundição e dos principais processos dessa atividade que resultam na areia analisada. Em seguida, serão explanados como cada uma das matérias-primas que compõem a areia de molde e de macharia influenciam nas propriedades da ADF. Para finalizar, será apresentada uma revisão bibliográfica de alguns trabalhos referentes à área de pesquisa.

Figura 2.1 - Classificação dos processos de fundição



Fonte: Hermann, Reinert, Duarte (2014, p.15)

2.1 CENÁRIO NACIONAL E INTERNACIONAL

O Brasil possui aproximadamente 1.300 empresas de fundição, onde sua maioria é composta de empresas de pequeno e médio porte. Esse mercado é marcado pelo uso intensivo de mão de obra e matérias-primas nacionais, resultando em uma independência do mercado externo (ABIFA, 2015).

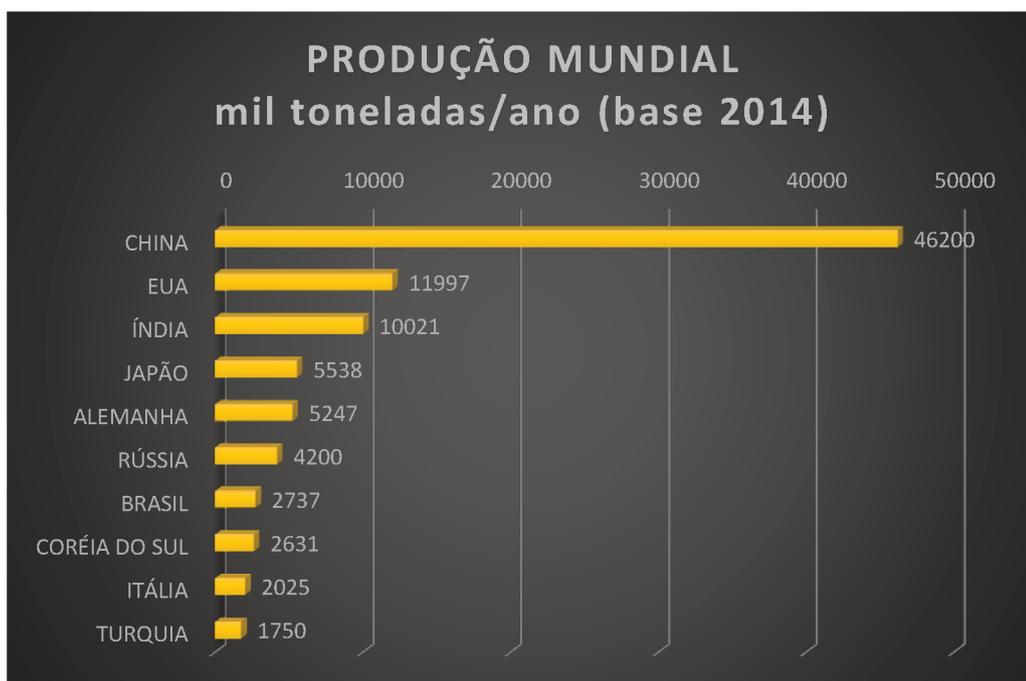
Em 2014, foram produzidas aproximadamente 103.641.518 toneladas de produtos fundidos no mundo. O Brasil se enquadra na 7ª posição entre os maiores

produtores de fundidos, conforme dados da *Global Casting Magazine* (2016) representado na Figura 2.2. A série histórica da produção nacional do setor (Figura 2.3) apresentava um crescimento contínuo até 2008. Entretanto, observa-se que a queda em 2009 foi devido à uma crise internacional, e a partir de 2014, devido à uma crise interna brasileira.

De acordo com dados da ABIFA (2015), o estado de Santa Catarina possui 58 fundições e produziu aproximadamente 771.417 toneladas de produtos fundidos em 2014. A produção em 2014 da empresa Tupy S.A, a maior fundição da América Latina, foi de 363.000 toneladas em sua sede, situada em Joinville/SC, e 77.000 toneladas em sua filial, no município de Mauá/SP.

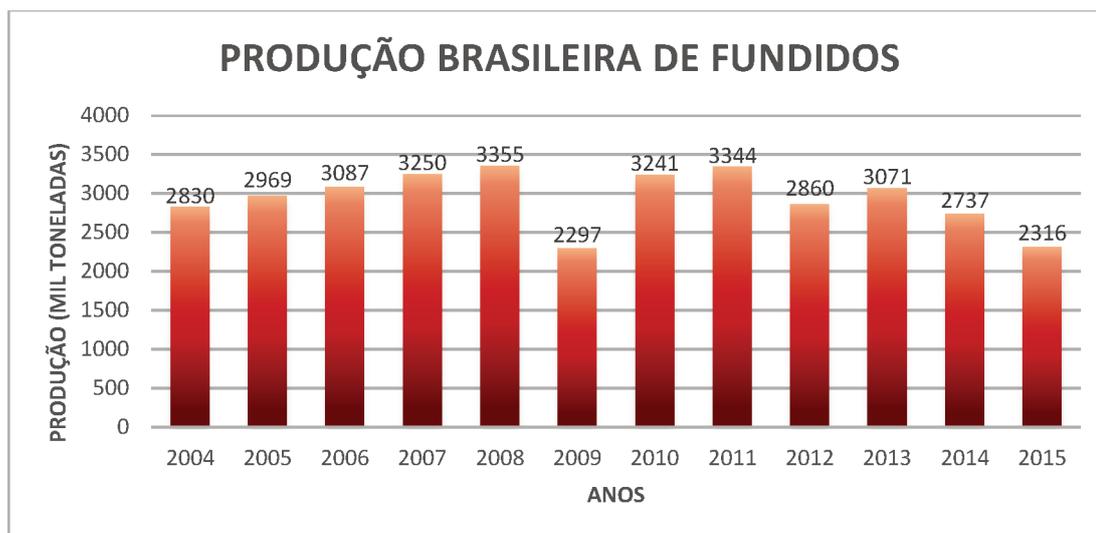
Através desses dados, é possível estimar a quantidade de ADF produzida anualmente, mostrando assim a importância e, até mesmo, a necessidade de estudos acerca do reaproveitamento desse material em outras atividades.

Figura 2.2 - Maiores produtores de produtos fundidos no ano de 2014



Fonte: Adaptado de *Global Casting Magazine* (2016)

Figura 2.3 - Gráfico da série anual da produção brasileira de fundidos



Fonte: Adaptado de ABIFA (2016)

2.2 CICLO DA AREIA EM PROCESSOS DA FUNDIÇÃO EM AREIA VERDE

A ADF utilizada nesse trabalho é proveniente do processo de fundição conhecido como moldagem a verde. É considerada verde toda areia que possui como aglomerante uma argila (bentonita) e seus moldes não sofrem secagem antes do vazamento (ALVEZ, 2012).

A areia de moldagem a verde é recomendada apenas para peças de tamanhos pequenos e médios. Devido à elevada velocidade de resfriamento dos corpos de dimensões reduzidas, reduzem a possibilidade de reação do metal líquido com a umidade do molde. Apesar da umidade ser rigorosamente controlada, para peças maiores é conveniente que o molde seja secado previamente antes do vazamento (BRADASCHIA *et al.*, 1971; SIEGEL *et al.*, 1981).

Os principais estágios do processo de fundição de uma peça metálica podem ser resumidos em: modelação, moldagem, macharia, fusão, vazamento, desmoldagem, rebarbação e limpeza (SIEGEL *et al.*, 1981). Como o foco desse trabalho é areia utilizada na fundição, será dado um enfoque maior nos processos que há a presença desse material.

O modelo da peça consiste em uma réplica da peça a ser produzida, porém com suas dimensões acrescidas, prevendo a contração do metal durante sua solidificação (SIEGEL *et al.*, 1981).

Os moldes têm a função de moldar a forma externa das peças. São constituídos de areia verde de fundição (AVF), sendo esta composta geralmente por: areia base, bentonita, pó de carvão e água. A mistura desses componentes é realizada em um misturador pneumático (Figura 2.4) e a quantidade de cada material é rigorosamente controlada por sistemas automatizados.

As principais propriedades da areia verde de fundição (AVF) são: moldabilidade, compatibilidade, refratariedade, coesão, resistência aos esforços mecânicos, ausência de expansividade volumétrica acentuada, permeabilidade e boa desmoldagem. A formulação da AVF a ser utilizada depende do tipo de metal ou liga a ser fundido (BONIN; ROSSINI; ZABIM, 1995).

O molde é realizado a partir da compactação da areia verde de fundição (AVF) em torno do modelo. Esse conjunto deve estar contido em uma caixa de moldagem, onde essa estrutura serve para conter as faces laterais do molde.

Figura 2.4 - Misturador utilizado para fabricar a AVF



Fonte: Carnin (2008, p. 15)

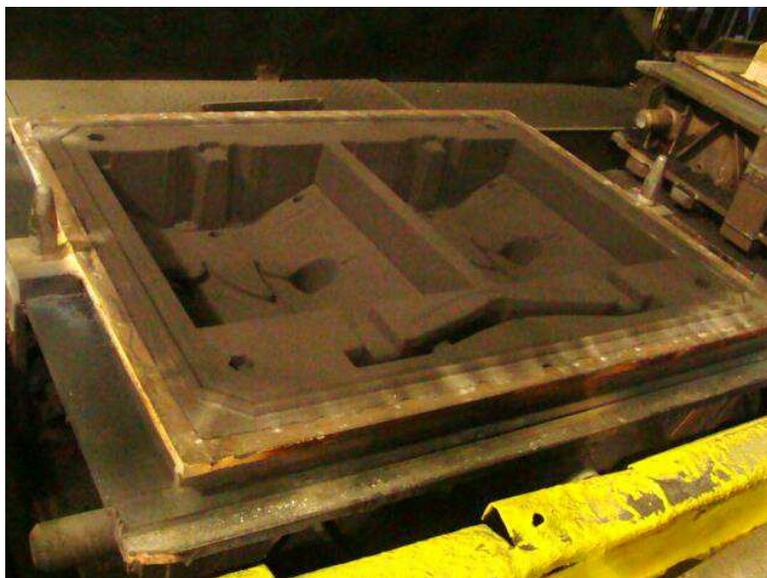
Após a confecção do molde (Figura 2.5), ocorre a inserção do macho (Figura 2.6), responsável pela moldagem de elementos vazados e cavidades internas da peça fundida. No molde é implantado o canal, orifício que permite a entrada do metal líquido no molde fechado e, em seguida, ocorre o vazamento do metal líquido (Figura 2.7).

Após o término do vazamento, ocorre o processo de resfriamento. De acordo com o funcionário Gilberto¹ da Tupy S.A., nessa etapa é importante salientar que

¹ Declaração oral durante visita técnica à empresa Tupy S.A., em 30 de março de 2016.

devido as altas temperaturas do metal líquido, o macho praticamente se desfaz, já que sua parte fenólica se volatiliza a aproximadamente 600°C.

Figura 2.5 - Molde de areia verde de fundição



Fonte: Autor

Figura 2.6 - Macho posicionado dentro do molde



Fonte: Autor

Figura 2.7 - Metal líquido sendo vertido na caixa de moldagem



Fonte: Mello (2004, p. 34)

Em seguida, a peça é transportada para outra linha de produção, onde ocorre o desmolde da peça, ou seja, a separação da peça metálica da areia. Em seguida ocorre a quebra do canal das peças metálicas resultadas através de pistões mecânicos, ou até mesmo com golpes de martelo e são retirados o excesso de areia que ainda são encontradas na peça.

Um dos benefícios em se utilizar o processo de areia verde na fabricação de peças complicadas é a sua facilidade de desmoldagem e limpeza após a fundição, reduzindo assim o risco de rupturas a quente durante sua solidificação (SIEGEL et al., 1981; KLINSKY, 2008).

Toda a areia retirada nas etapas de desmoldagem e limpeza da peça são transportadas por correias para o início do processo.

Uma das principais vantagens do uso da areia verde de fundição (AVF) é a sua capacidade de reutilização. Após o vazamento do metal líquido no molde, parte da argila perde seu poder aglomerante, uma parcela da umidade do molde evapora e os aditivos são parcialmente destruídos ou alterados, formando produtos de decomposição incorporados à areia. Entretanto, caso a AVF ainda satisfaça alguns critérios, ela pode ser novamente utilizada na composição dos moldes, através das correções e incorporações dos ingredientes iniciais (areia lavada, bentonita, água e pó de carvão), fechando assim o “sistema de areia” (KONDIC, 1973; MARIOTTO, 1978).

O descarte da AVF, tornando-se ADF, ocorre devido à perda de volume e descaracterização excessiva de seus componentes. Nesse caso o material não consegue mais desempenhar seu papel como molde, resultando em defeitos frequentes em peças fundidas, como escamação, rugosidade, entre outros (STEFENON, 2002; CARNIN, 2008).

2.3 AREIA DESCARTADA DE FUNDIÇÃO (ADF)

A ADF é proveniente da areia verde de fundição (AVF), sendo esta, um produto largamente utilizado na indústria de fundição para a fabricação de moldes, responsável em moldar o formato externo da peça fundida, enquanto o macho é responsável pela formação das cavidades e orifícios internos da peça.

A AVF tem sua coloração preta devido à presença de material carbonáceo, e contém grande porcentagem de partículas finas, menores que 150 μ m (ALVEZ, 2012).

Para essa pesquisa, a empresa Tupy S.A. forneceu dois tipos de areia descartada de fundição (ADF), denominadas de E0 e FUC. As duas se diferem por serem provenientes de diferentes linhas de produção e pelos produtos fabricados com cada uma delas. As ADF estão representadas na Figura 2.8.

Figura 2.8 – ADF E0 (esquerda) e ADF FUC (direita)



Fonte: Autor

Vale ressaltar que as areias utilizadas nessa pesquisa são de moldagem, logo não é o interesse deste trabalho aprofundar no assunto da areia de macharia. Entretanto, no próximo parágrafo é realizado uma breve explicação sobre a areia do macho, devido a incorporação desse material, na forma desagregada, na areia de moldagem.

O material utilizado para a fabricação dos machos é a areia ligada quimicamente, que possui diversas denominações, como areia resinada, fenólicas ou de macharia. Elas se diferenciam das areias de molde devido ao seu aglomerante, composto geralmente por resinas orgânicas, formadas por: metanol; formol; fenol; ureia e álcool furfurílico (ALVEZ, 2012).

O amido de milho é um material orgânica na forma granular, utilizado como aglomerante da areia de moldagem. Normalmente é utilizado em moldes muito grande, que necessitam de muita plasticidade (MELLO, 2004).

A Tabela 2.1 mostra os principais componentes da areia verde de fundição.

Tabela 2.1 - Variação da composição da AVF

Componentes da AVF	Percentual em volume
Areia regenerada	90,00 a 96,00
Areia-base (nova)	3,00 a 5,00
Pó de carvão	0,15 a 0,50
Argila ativa (bentonita)	0,50 a 2,50
Amido de milho	0,00 a 0,10
Água	2,00 a 5,00

Fonte: Mello (2004, p. 22)

As porcentagens apresentadas na Tabela 2.1 são dos chamados componentes primários da AVF. A quantidade de cada componente varia conforme a necessidade de produção e também do tipo de material a ser fundido. Essa verificação dos teores é realizada continuamente, visando manter a qualidade dos produtos fundidos (MELLO, 2004).

Em seguida, serão explanados os principais elementos que compõem a areia verde de fundição (AVF).

Figura 2.9 - Componentes principais da Areia Verde de Fundição (AVF)



Fonte: Carnin (2008, p. 15)

2.3.1 – Areia-base

A areia-base mais utilizada pelas fundições, do ponto de vista mineralógico, é a de quartzo (sílica), seguida pelas de cromita, zirconita e de olivina (MARIOTTO, 1978).

A areia é largamente utilizada na indústria de fundição por serem baratas, altamente refratária e possuírem uma boa coesão ao ser misturados com argilas ou outros aditivos (MELLO, 2004).

De acordo com Comissão de Estudos de Matérias-primas (CEMP)² (1996, *apud* Mello, p. 24), a areia de sílica possui: grãos com formato predominantemente subangular e/ou arredondado; Ph entre 5 e 7; e teor de sílica (SiO₂) mínimo de 98%.

2.3.2 - Bentonita

O termo bentonita representa uma argila composta basicamente por montmorilonita, sendo esse argilomineral integrante do grupo das esmectitas. A bentonitas podem ser classificadas em função de seus cátions trocáveis, como cálcica ou sódica. Esses materiais podem apresentar uma grande expansibilidade em contato com a água (LUZ; OLIVEIRA, 2005).

A estrutura da bentonita é composta por lamelas e é classificada pela espessura das mesmas. Ela é um silicato de alumina hidratado, que contem em sua composição: silício, alumínio, ferro, cálcio, magnésio, potássio e sódio (PEREIRA *et al.*, 2004).

² COMISSÃO DE ESTUDOS DE MATÉRIA-PRIMAS (CEMP). **Processo de moldagem em areia verde**. Fundição e Matérias-Primas – Caderno Técnico, 13. ed, São Paulo, jun./ago. 1996.

Atualmente é muito comum a utilização da bentonita ativada, que se dá por meio do carbonato de sódio, resultando no aumento significativo da absorção de água e uma melhora em suas propriedades mecânicas (ALVEZ, 2012).

A bentonita é o principal componente responsável pela coesão da areia quando em contato com a água. Esse aglomerante proporciona as seguintes características ao material do molde: escoabilidade, plasticidade e consistência. Sua função coesiva fornece resistência suficiente para que a caixa de moldagem não rompa durante o vazamento do metal líquido, e também permite a obtenção de moldes uniformemente compactados, reproduzindo fielmente as dimensões da peça projetada (CARNIN, 2008).

A resistência obtida na areia de moldagem é resultado da adesão e da coesão. Adesão é a ligação da argila ao grão de areia, enquanto coesão é a ligação entre as partículas de argila (HERMANN; REINERT; DUARTE, 2014).

Durante o vazamento do metal líquido, as bentonitas perdem suas propriedades plásticas, resultando em uma redução progressiva em sua coesão, logo sendo necessária uma reposição constante dessa matéria-prima nas AVF (BONIN; ROSSINI; ZABIM, 1995).

2.3.3 – Água

A principal função da água é tornar possível a propriedade coesiva dos componentes da mistura, através de sua tensão superficial (MARIOTTO, 1978; CARNIN, 2008).

A quantidade de água deve ser dosada com muita precisão, visando obter a umidade e a compactação desejada da areia verde de fundição (AVF). Além disso, a qualidade da água utilizada deve ser a melhor possível, já que alguns sais presentes podem reduzir a resistência à tração a úmido (RTU) da areia preparada (ROMANUS, 2005)

Mariotto (1978), Hermann, Reinert e Duarte (2014) afirmam que, a rigor, o verdadeiro ligante da areia verde de fundição (AVF) é a água, devido a atração de moléculas vizinhas serem resultadas da tensão superficial proveniente da água. Entretanto há diversos motivos de se utilizar a argila na AVF, como:

- A área de contato grão a grão em uma areia isenta de argila seria muito pequena para que apenas as “pontes” de água pudessem exercer a força coesiva necessária para a atividade de moldagem;
- Apesar das ligações da água serem intensas, a plasticidade proveniente das estruturas lamelares das argilas é fundamental para os materiais de moldagem;
- A ausência de argila não resultaria na retração do material por perda de água durante o aquecimento, logo não compensaria os efeitos de expansão dos grãos de areia, resultando um possível problema na estabilidade dimensional do molde;
- O efeito ligante da água seria facilmente perdido a temperaturas relativamente baixas durante o aquecimento. As argilas são capazes de reter a água por mais tempo e a temperaturas mais elevadas;

Os autores concluem que, apesar da água ser realmente o ligante da AVF, a argila é o agente responsável por viabilizar essa ação ligante na atividade de fundição.

2.3.4 – Pó de carvão

São muito raras as fundições que conseguem trabalhar, sem problemas, com areias de moldagens constituídos unicamente de areia-base, bentonita e água. Em diversos casos, a utilização desses três materiais não satisfaz a todos os requisitos impostos aos moldes pelo processo de fundição, logo se dá a necessidade de utilizar aditivos (MARIOTTO, 1978).

O pó de carvão, também conhecido como elemento carbonáceo, é um material extremamente volátil e expansível ao ser aquecido (MELLO, 2004). Suas características estão apresentadas na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Características física e química do pó de carvão

Características	
Voláteis (%)	20 - 34
Carbono vítreo (%)	4 - 10
Cinzas (%)	8 - 30
Enxofre (%)	1,5 - 3,0
Umidade (%)	0,0 - 1,5
Densidade Aparente (kg/l)	0,5 - 0,7

Fonte: Mello (2004, p. 26)

De acordo com Bradaschia *et al.* (1971), Mariotto (1978) e Siegel *et al.* (1981), o pó de carvão é extensivamente usado como aditivo na areia de moldagem, pois ele fornece:

- Redução da aderência à peça fundida, facilitando assim a limpeza;
- Evita a penetração do metal líquido no molde;
- Funciona como junta de dilatação, atenuando a expansibilidade da areia, e assim reduzindo a ocorrência de defeitos devido à expansão térmica.

2.3 PROBLEMÁTICA DOS RESÍDUOS DE FUNDIÇÃO

A norma vigente relacionada a classificação dos resíduos sólidos é a ABNT NBR 10.004/2004. De acordo com esse documento, a classificação dos resíduos sólidos é realizada em função dos processos ou atividades que o originou, das características de seus constituintes, e pela quantidade presente de alguns elementos em sua composição, cujo os impactos ambientais e à saúde são conhecidos.

De acordo com a norma supracitada, a classificação dos resíduos é esquematizada conforme mostra a Tabela 2.3:

Tabela 2.2 - Classificação de resíduos conforme a ABNT NBR10.004/2004

CLASSE I	CLASSE II	
Perigosos	Não Perigosos	
	TIPO A	TIPO B
	Não Inerte	Inerte

Fonte: Autor

A NBR10.004/2004 é utilizada como parâmetro único em praticamente todos os órgãos ambientais do Brasil. Apesar de ser uma norma que se refere ao gerenciamento de resíduos, a mesma não cita as possibilidades do reaproveitamento da ADF, conseqüentemente fazendo com que seus produtores as depositem em aterros industriais (CARNIN, 2008).

De acordo com a ABNT NBR15.702/2009 (Areia descartada de fundição – Diretrizes para aplicação em asfalto e em aterro sanitário), para possibilitar o uso da ADF, tanto em aterros sanitários quando em misturas asfálticas, deve-se atender as seguintes condições, como:

- Classe II – Não Perigoso (NBR10.004/2004);
- Ph determinado pelo extrato aquoso entre 5,0 e 10,0;
- Atender às concentrações máximas de elementos estabelecidos na norma NBR15.702/2009, resultado do ensaio de extrato lixiviado (NBR10.005/2004);
- A ADF não deve ter sido misturada ou diluída com qualquer outro tipo de resíduo para se enquadrar nas concentrações máximas estabelecidas pela norma NBR15.702/2009.

Alguns órgãos ambientais estaduais elaboraram documentos específicos para a utilização da ADF em outras atividades, como é o caso dos estados de São Paulo e de Santa Catarina.

No estado de São Paulo, a Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB), a partir da decisão de sua diretoria em agosto de 2007, definiu os procedimentos para gerenciamento da areia de fundição. Nesse documento são apresentados: o modo de extração das amostras em áreas de deposição; ensaios a serem realizados; concentrações máximas permitidas de poluentes específicos detectados no ensaio de lixiviação; e documentações e procedimentos necessários para os processos de reutilização da areia de fundição (CETESB, 2007).

Já no estado de Santa Catarina, a resolução nº26, de 06 de setembro de 2013 do Conselho Estadual do Meio Ambiente (CONSEMA) estabelece as diretrizes para a autorização ambiental da utilização da ADF como insumo ou matéria-prima em outros processos industriais e obras. Diferente da NBR10.004/2004, essa norma apresenta alternativas, e resoluções específicas para utilização de ADF em certas atividades, dentre elas: usinas de produção de concreto asfáltico; e implantação e/ou pavimentação de rodovias (CONSEMA, 2013).

Semelhante ao documento ambiental paulista, a norma detalha os procedimentos dos ensaios ambientais e valores de concentração máxima permitida de poluentes no ensaio de lixiviação. Entretanto, a norma catarinense se difere, por exemplo, no limite mínimo do Ph mínimo da ADF, que nesse documento é de 5,5.

Todos os trabalhos pesquisados neste estudo classificaram a ADF como Resíduo Classe II A – Não inerte, logo, de acordo com esses trabalhos, o material se enquadra na classificação exigida pelas normas nacional e estaduais mencionadas anteriormente. Segundo a NBR10.004/2004, materiais Classe II A podem ter características como biodegradabilidade, combustibilidade e solubilidade em água.

Entretanto, vários trabalhos mostraram que quando a ADF é inserida em mistura asfáltica, o mesmo foi classificado como Resíduo Classe II B – Inerte que, de acordo com a norma, não possuiu seus elementos solubilizados acima do permitido quando em contato estático ou dinâmico com a água destilada a temperatura ambiente.

Caso não houvesse a presença da areia de macharia, a maior parte das ADF poderiam ser classificadas como Resíduo Classe II B – Inerte. Quando as areias descartadas de fundição contem elevadas quantidades de torrões (pedaços de machos que não se desagregaram totalmente), sua classificação pode ser Resíduo Classe I – Perigoso devido as concentrações de fenóis superiores aos limites admissíveis da norma. Apesar das ADF incorporar elementos de ligas fundidas, esses elementos raramente excedem aos limites da NBR10.004/2004, com exceção às areias utilizadas em fundições de bronze e de ferros fundidos brancos de alto cromo (MARIOTTO; BONIN, 1996).

2.4 UTILIZAÇÃO DA ADF EM PAVIMENTOS

O reaproveitamento de resíduos de fundição na Europa está em franco desenvolvimento, apesar de ser algo ainda recente. A expansão dessa prática tem ocorrido devido à conscientização da indústria europeia quanto aos benefícios da preservação ambiental e por práticas políticas, onde nos últimos anos, alguns países europeus aumentaram o valor dos impostos de áreas destinadas a aterros industriais (SILVA, 2007).

Nos Estados Unidos, a *Federal Highway Administration* (FHWA, 1998) publicou um documento intitulado *User Guidelines for Waste and By-Products Materials in Pavement Construction*. Nesse documento apresenta os resultados de pesquisas conduzidas por esse órgão, referentes a diversos tipos de materiais de rejeitos e seu uso, quando apropriado, em algumas aplicações referentes a construções rodoviárias.

De acordo com a FHWA (1998), misturas asfálticas com teores de ADF de até 15% apresentaram um desempenho satisfatório. Entretanto, acima desse teor, as amostras apresentaram uma maior suscetibilidade à umidade, devido à natureza hidrófila da ADF, resultando na deterioração acelerada do pavimento com o desprendimento (*stripping*) dos agregados.

Algumas instituições americanas, como a Universidade de Wisconsin e Universidade de Madison, possuem programas de pesquisas apoiadas por setores industriais envolvidos. Há também o *Foundry Industry Recycling Starts Today* (FIRST), que é um consórcio formado por indústrias de fundições que tem como objetivo o desenvolvimento de opções sustentáveis para o reuso de seus subprodutos (PEREIRA, 2004).

Na prática, alguns estados americanos que possuem políticas ambientais rigorosas, tem autorizado o uso de ADF como substituição parcial do agregado fino em concreto asfáltico e também em aplicações em camada de sub-base (PEREIRA, 2004).

Pesquisas recentes no Brasil mostram que o uso da ADF como agregado miúdo em misturas asfálticas é uma alternativa atraente, devido a sua viabilidade técnica, econômica e ambiental.

No estudo de Coutinho Neto (2004), foi analisado misturas asfálticas incorporadas com ADF, com uma taxa de 5, 10 e 15%, em relação ao peso total da

mistura. Foi analisado a influência da ADF em misturas asfálticas condicionadas em processos de envelhecimento e obteve bons resultados mecânicos. A mistura asfáltica com 15% de ADF foi classificada como Classe II B – Inerte, e não apresentou teores acima dos limites previstos em norma de fenóis e elementos de alta toxicidade, como: mercúrio, cádmio, chumbo e cromo.

Klinsky (2008) estudou a incorporação de ADF em solos argilosos que compõem as camadas de base e sub-base do pavimento flexível. Em seu trabalho, o autor menciona que pesquisas realizadas pela Universidade de Wisconsin avaliou o emprego da areia de fundição em misturas asfálticas a quente. Os resultados obtidos mostraram que alguma das areias utilizadas na pesquisa melhorou a resistência à trilha de roda, enquanto outras não. Contudo, as areias utilizadas nessa pesquisa contribuíram positivamente para a resistência das misturas asfálticas aos danos de fadiga, sob deformações controladas.

Segundo Carnin (2008), misturas asfálticas com teor de 15% de areia descartada de fundição apresentaram propriedades mecânicas satisfatórias. Em relação às análises ambientais, a mistura asfáltica com ADF foi classificada como resíduo Classe II B – Inerte e não apresentou riscos toxicológicos agudos aos organismos testados. Observou-se também um bom recobrimento da ADF com o ligante CAP-20 através de imagens com o MEV.

Pereira (2004) estudou misturas asfálticas formuladas a partir da faixa C do DNIT. De acordo com seu trabalho, a ADF não possui o equivalente de areia exigido pela norma do Departamento Nacional de Estradas de Rodagens (DNER) 313/1997, significando que ele não pode substituir integralmente o agregado miúdo na composição do concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ). Sua pesquisa também apontou que, apesar dos resultados de ensaios mecânicos estarem em conformidade com as normas, a incorporação de ADF na mistura asfáltica apresentou teores de alumínio e fenol acima do permitido, logo o autor sugere a necessidade de uma avaliação mais adequada, através de um rigoroso acompanhamento experimental, construindo-se um pavimento sob condições controladas para avaliação dos impactos ambientais.

Stefenon (2003) utilizou em sua pesquisa areia de fundição e resíduo de fibra de vidro. As misturas asfálticas que continham apenas ADF foi utilizado um teor de 7% de areia e foram formuladas de conforme especificações do Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem do Rio Grande do Sul (DAER/RS) e do DNER.

Foi observado que no ensaio Marshall os resultados de estabilidade foram inferiores, comparados aos das misturas asfálticas sem ADF. Entretanto, nos ensaios de Tração Indireta e Módulo de Resiliência, as misturas asfálticas com ADF resultarem em valores superiores, comparadas as misturas asfálticas convencionais (sem ADF).

Bonet (2002) estudou misturas asfálticas com teor de 8% de ADF no CBUQ. Seu estudo mostrou que a incorporação desse resíduo industrial em misturas asfálticas obteve parâmetros mecânicos satisfatórios e diminuíram sensivelmente a concentração de metais pesados e fenóis, devido ao recobrimento da ADF com o ligante asfáltico.

Costa, Pinto e Ventorini (2007) e Costa (2008) analisou a influência comportamental de ADF de duas empresas de fundição em mistura asfálticas. Foram realizados ensaios de misturas asfálticas com teores de 8% e 10% de ADF produzidas em laboratórios e extraídas em campo, obtendo resultados mecânicos e ambientais satisfatórios.

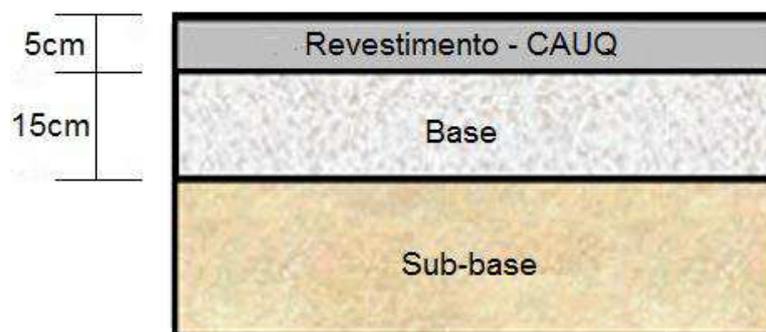
Ainda nos trabalhos de Costa, Pinto e Ventorini (2007), Costa (2008) e Carnin (2008), foi apresentado um trecho experimental contendo ADF, na estrada dos Tenentes, marginal da BR-381 (Rodovia Fernão Dias), no município de Extrema/MG.

O trecho foi viabilizado através de uma parceria do Departamento Nacional de Infraestrutura (DNIT), Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR) e Instituto Militar de Engenharia (IME). A obra consistiu em um revestimento asfáltico CBUQ, empregando um CAP 10/20, agregado basáltico e ADF proveniente das fundições Tupy e Fagor.

O trecho foi executado com 120 metros de comprimento e 6,5m de largura e aberto ao tráfego médio de 44 veículos, correspondendo a um número N de $1,1 \times 10^6$. A espessura da camada de revestimento possui 5cm, a de base 15cm e é composta por bica corrida, repousada sobre um subleito heterogêneo (Figura 2.10).

O trecho foi dividido em 2 grandes seções de 60 metros cada. Um dos trechos foi implantado com um revestimento CBUQ e no outro trecho, pré-misturado a frio (PMF). Em cada trecho citado, foram construídas 3 seções de 20 metros, que apesar do tipo de revestimento ser o mesmo, o tipo de areia utilizada nas misturas asfálticas variava a cada seção, a saber: areia convencional, ADF Tupy e ADF Fagor. Os revestimentos foram formulados através da faixa C do DNIT e foi adotando o método Marshall para a determinação o teor ótimo de ligante.

Figura 2.10 - Seção do trecho implantado com ADF em Extrema/MG



Fonte: Carnin (2008, p. 60)

Foram instalados sistema de drenagem de água sob a camada de rolamento para verificação de uma possível contaminação do solo com ADF.

As análises ambientais de amostras de misturas asfálticas com 8% e 10% de ADF obtidas em laboratório, classificaram esse material como Classe II B – Inerte. Já a análise da água percolada obtida no trecho experimental não foi significativa, devido à interferência de fatores externos, como poeira, arraste de materiais dos veículos, entre outros.

Os resultados dos ensaios laboratoriais e em campo, mostraram que a ADF pode ser incorporada à mistura asfáltica, sem causar prejuízo na qualidade estrutural.

O levantamento deflectométrico *in situ* nas misturas PMF não obtiveram bons resultados. Costa (2008) justifica que a causa desses resultados foi principalmente, devido ao controle tecnológico deficiente, resultando no aparecimento de patologias no pavimento, como exsudação do ligante durante a compactação da mistura.

Apesar da viabilidade técnica e ambiental na utilização da ADF em mistura asfáltica terem sido comprovada em laboratórios, Costa (2008) não recomenda a utilização da ADF em pavimentos, devido as práticas construtivas deficientes adotadas pela prefeitura onde foi implantada a obra, e pela ausência de um controle tecnológico na execução do trecho experimental.

3 MATERIAIS DE MISTURAS ASFÁLTICAS E CURVA GRANULOMÉTRICA

3.1 MATERIAIS UTILIZADOS NA MISTURA ASFÁLTICA

3.1.1 – Agregados pétreos

De acordo com a norma ABNT NBR 9935/2011, o termo agregado se refere a um material granular, geralmente inerte, com dimensões e propriedades adequadas para a preparação de argamassa e concreto.

Em um termo geral, o termo agregado abrange rochas, britas e areias, que podem estar em seu estado natural ou serem produto de um processo de beneficiamento. Os ensaios de laboratório indicam como um material que foi formado a milhões de anos se comportará durante a sua vida útil de projeto. Nesse caso o agregado em um pavimento, terá que suportar as tensões impostas na superfície do pavimento e em seu interior (BERNUCCI *et al.*, 2008).

A brita utilizada para compor as misturas asfálticas desta pesquisa é proveniente de rochas graníticas, oriundas da jazida da empresa Vogelsanger, situada na Estrada Geral do Piraí nº 3300, bairro Vila Nova, zona rural de Joinville/SC.

De acordo com Meurer (2015), a jazida supracitada da empresa Vogelsanger está situada na unidade geológica Complexo Granulítico Santa Catarina.

Esse complexo está situado na região nordeste do Estado de Santa Catarina. Seu limite ao norte se estende além da divisa com o Estado do Paraná, enquanto seu limite mais ao sul compreende ao lineamento do município de Blumenau/SC. A área aflorante desse complexo no Estado é de aproximadamente 8.500m² (SCHEIBE, 1986).

O granito é uma rocha magmática plutônica composto basicamente por feldspatos alcalinos, quartzo e mica. Empregados na pavimentação, ele pode apresentar uma elevada acidez, podendo prejudicar sua adesividade com o betume.

Seus fragmentos são pouco lamelares, podendo apresentar uma boa quantidade de finos após a britagem NOGAMI³ (1977 *apud* BALBO 2007, p. 99).

Figura 3.1 - Localização da Jazida Vogelsanger em relação a Joinville/SC



Fonte: Meurer (2015, p. 14)

Os agregados utilizados para compor as misturas asfálticas são determinados através de alguns parâmetros, como sua graduação, tamanho, forma, rugosidade, afinidade com o ligante asfáltico, absorção, resistência à abrasão (dureza) e aos ataques químicos gerados pelas intempéries do ambiente o qual o pavimento será executado, entre outros. Os ensaios para a determinação dessas características são discorridos no próximo capítulo.

3.1.2 – Ligante Asfáltico

O ligante asfáltico é também conhecido como cimento asfáltico de petróleo (CAP) ou betume, e provém da destilação fracionada do petróleo. Ele é impermeável à água e apesar de possuir uma baixa reatividade química a muitos agentes, ele sofre envelhecimento por oxidação lenta, através do contato com o ar e água (BERNUCCI *et al.*, 2008).

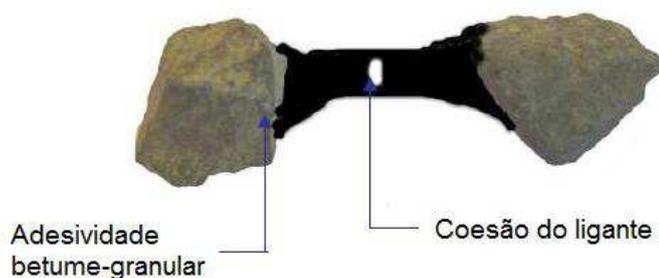
Os petróleos devem possuir frações pesadas o suficiente para possibilitar a extração de betume. Nas refinarias, a destilação do petróleo inicia-se com a destilação atmosférica, que tem como objetivo separar suas frações mais leves,

³ NOGAMI, J. S. **Principais rochas de interesse às obras civis**. 1977, São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Apostila da disciplina PMI-811

como gasolina, querosene e gás, das frações pesadas. Depois dessa etapa ocorre a destilação à vácuo, onde serão produzidos os combustíveis, óleos e o betume. Os resíduos dessa última etapa ainda podem ser levados a outros processos (OLARD, 2003).

As propriedades do betume são muito interessantes na engenharia civil devido a sua elevada capacidade de adesão à materiais como madeiras, pedras e metais. Seu poder aglomerante se dá pelas resinas e elementos polares presentes em sua composição química. Na pavimentação, o ligante asfáltico gera a coesão do esqueleto mineral, através do envolvimento dos granulares graúdos e da aglomeração da parte fina dos agregados, formando o mástique. Além das características citadas, o ligante asfáltico é dúctil e flexível a temperatura ambiente (HECK, 2001; HAMLAT, 2007).

Figura 3.2 - Adesão e coesão do sistema granular-betume



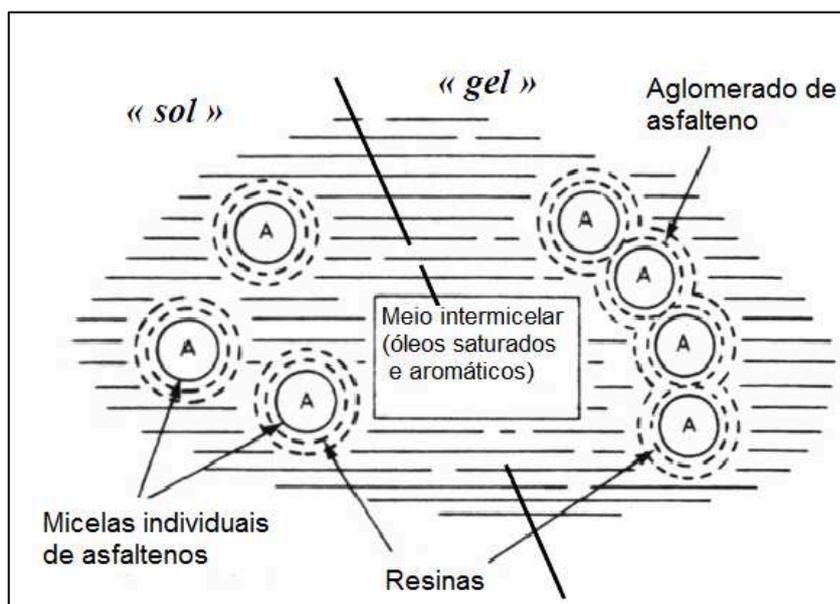
Fonte: Hamlat (2007, p. 44)

Uma vez que o ligante asfáltico é proveniente do petróleo, e este é resultado da degradação lenta do plâncton (sedimentos orgânicos e minerais) que se depositam no fundo dos oceanos sob forma de estratos, as composições desses materiais variam conforme o seu local de ocorrência. O material resultado pode ser fracionado em quatro classes químicas, denominadas frações SARA (saturados, aromáticos, resinas e asfaltenos) (MAILLARD, 2005).

Em relação a sua composição, uma classificação mais abrangente do ligante asfáltico consiste em dois grandes grupos: os asfaltenos e os maltenos. Os asfaltenos se apresentam com uma forma sólida, friável, com uma coloração escura. São compostos geralmente por hidrogênio e carbono, e representam aproximadamente de 10% a 20% do peso do CAP. Já os maltenos consistem basicamente nos óleos saturados, aromáticos e resinas (OLARD, 2003).

A configuração do betume consiste em uma suspensão de micelas de asfaltenos peptizados por uma resina, disperso em um meio oleoso formado pela parte aromática e saturados. Nesse meio coloidal, os aromáticos têm um papel de solvente, enquanto os saturados de floclulantes. A estrutura do CAP depende da capacidade do asfaleno formar, ou não, uma rede floclulada. Essa configuração dos asfaltenos dependem da composição dos elementos dos maltenos. A estrutura “gel” consiste na formação de uma rede floclulada de asfaltenos, enquanto na estrutura “sol”, os asfaltenos se encontram diluídos e bem estabilizadas no meio dispersante. Qualquer classe intermediária é chamada de “sol-gel” (OLARD, 2003).

Figura 3.3 - Esquema da estrutura coloidal do CAP



Fonte: Olard (2003, p. 18)

Os asfaltos tipo “sol” tendem a apresentar uma maior suscetibilidade térmica, possuir uma maior deformação sob um carregamento, porém tendem a ter um retorno satisfatório à posição original após a aplicação da carga. Já o tipo “gel” tende a ser mais resistente à aplicação de cargas, porém menos suscetíveis ao retorno à posição inicial. Entretanto, todas as propriedades mencionadas anteriormente do ligante asfáltico dependem fortemente da temperatura (RAMOS *et al.*⁴ 1995 *apud* BERNUCCI *et al.* 2008, p. 31).

⁴ RAMOS, C. R.; GUARÇONI, D.; GUERREIRO, F. **Curso de ligantes asfálticos**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustível (IBP), 1995.

Os ensaios utilizados para caracterizar os ligantes asfálticos nesse trabalho são: Ensaio de Penetração (DNIT-ME 155/2010), Ponto de Amolecimento Anel e Bola (DNIT-ME 131/2010) e Massa Específica Real (ABNT NBR 6296/2004).

Em misturas asfálticas usinadas a quente, o CAP é aquecido a temperaturas elevadas, com isso reduz sua viscosidade e permite um bom envolvimento dos granulares. Entretanto, essa elevação da temperatura na presença do ar resulta na oxidação (envelhecimento) do ligante asfáltico, resultando geralmente em uma redução da penetração e um aumento da temperatura de amolecimento, devido ao aumento da viscosidade (HAMLAT, 2007).

O ligante asfáltico é um material muito suscetível a temperatura. Ele apresenta características elásticas à baixa temperatura, viscoelástica à temperatura ambiente e fluída à altas temperaturas. As temperaturas incidentes sobre as estruturas rodoviárias flexíveis no Brasil, geralmente propiciam um comportamento viscoelástico ao material betuminoso.

O comportamento mecânico desse material também é fortemente influenciado pela velocidade do carregamento, a saber: carregamentos rápidos tendem a aproximar ao comportamento elástico, enquanto solicitações lentas resultam em um comportamento mais fluido.

3.2 CURVA GRANULOMÉTRICA

Os esqueletos minerais correspondem a aproximadamente 95% do peso de uma mistura asfáltica, portanto suas características influenciam diretamente no comportamento mecânico dos pavimentos rodoviários.

A curva granulométrica representa a distribuição interna dos grãos no esqueleto mineral. A distribuição granulométrica consiste na utilização de frações de tamanhos variados visando produzir uma quantidade suficiente de contatos direto entre os granulares, que se dá pelo entrosamento dos grãos maiores que possuem os vazios entre eles preenchidos por frações de diâmetros menores.

De acordo com o Manual de Pavimentação do DNIT (2006b), agregados de graduação densa são aqueles que possuem a curva granulométrica bem graduada e

contínua, onde a quantidade de finos é o suficiente para preencher os vazios entre as partículas mais graduadas.

Em misturas asfálticas densas o volume de vazios é controlado, visando obter um esqueleto mineral estável e eficaz na transmissão dos esforços. Devido ao seu arranjo interno, há uma elevada quantidade de ponto de contatos entre os granulares, resultando em um aumento no ângulo de atrito interno, resultado em estruturas betuminosas com uma resistência satisfatória à deformação permanente (MOMM, 1998; BARRA, 2005; NGUYEN, 2006).

Há vários métodos que tem como objetivo determinar a composição de um esqueleto mineral para uma mistura asfáltica, como: método gráfico de Rothfuchs, Método por Tentativa e, Método por Equação ou Racional (SENÇO, 2008). Para esse trabalho serão detalhados apenas o Método por Tentativa (largamente utilizado em obras rodoviárias brasileiras) e o Método por Equação (metodologia escolhida para essa pesquisa).

3.1.1 – Método por Tentativa

O critério oficial utilizado no Brasil para a composição de esqueleto mineral de uma mistura asfáltica é o Método por Tentativa. Ele é normatizado pelo documento DNIT-ES 031/2006 e se baseia no enquadramento da curva granulométrica em faixa predefinidas que devem ser selecionadas, em função do diâmetro máximo do agregado utilizado e da região que a estrutura betuminosa será implantada na estrutura rodoviária (camada de ligação ou de rolamento).

Semelhante ao órgão nacional, o Departamento Estadual de Infraestrutura de Santa Catarina (DEINFRA/SC) também preconiza o uso dessa metodologia. Entretanto a faixa granulométrica estipulada na norma DEINFRA/SC/P/05/2016 possui outras subdivisões, além de possuir alguns valores ligeiramente diferentes dos limites de cada faixa, comparado ao documento do DNIT.

Como o próprio nome já diz, essa metodologia é baseada na tentativa e erro. Através da mistura de materiais com tamanhos e distribuições granulométricas diferentes (brita 0, brita 1, pedrisco, pó de pedra, entre outros), o projetista tenta enquadrar a curva granulométrica resultante nos limites normativos. Logo são realizados os ajustes para definir a porcentagem que cada um desses materiais com

tamanhos e distribuições granulométricas diferentes irão compor o esqueleto mineral das misturas asfálticas.

Há uma grande crítica desse método, como a heterogeneidade dos esqueletos minerais que podem ser considerados como aceitáveis, conforme os limites estabelecidos. É possível observar que em algumas frações exigidas pela norma, o intervalo entre os limites máximos e mínimos são enormes, como por exemplo, a porcentagem de material passante a peneira nº4 na Faixa C, largamente empregada em formulações, que varia entre 44% a 72%, conforme mostra a Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Faixas determinadas pelo DNIT

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 Camada de ligação (Binder)	4,5 - 7,5 Camada de ligação e rolamento	4,5 - 9,0 Camada de rolamento	± 0,3%

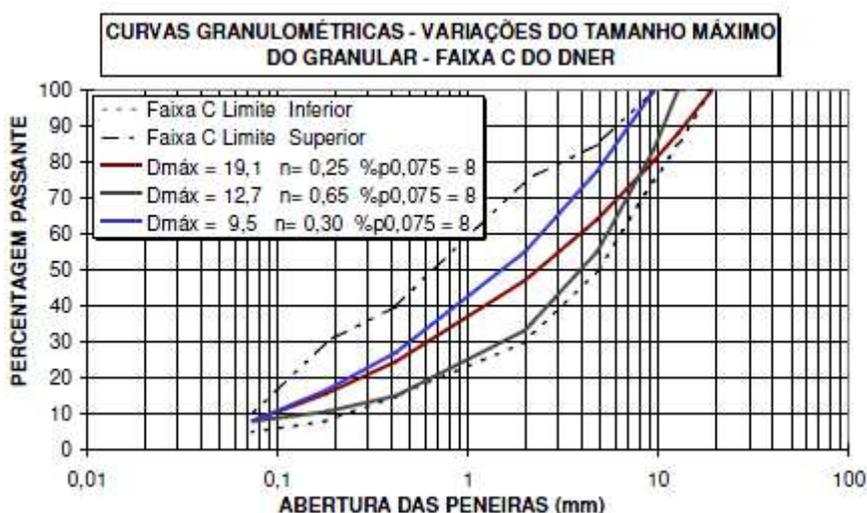
Fonte: DNIT (2006a, p. 5)

Os intervalos amplos entre os limites inferior e superior dessa metodologia implica na possibilidade de haver uma ampla variação de curvas granulométricas, tornando evidente que as propriedades de produto obtido serão muito diferentes (MOMM, 1998).

Apesar dessa metodologia apresentar as problemáticas citadas, sua predominância nacional ainda permanece. Isso se dá mais a questões políticas que técnicas, devido à pouca exigência sobre a qualidade de produção de materiais britados após o processo de beneficiamento, resultando em britas comerciais com uma granulometria fortemente heterogênea.

Apesar dessa metodologia ser largamente utilizado no Brasil, a necessidade de se obter estruturas de pavimento de melhor qualidade tem resultado na criação de “faixas de trabalho” utilizados por algumas empresas, que consiste na redução dos intervalos dos limites fixados pela norma vigente, visando assim obter curvas com menor variações. Observa-se também que na norma catarinense DEINFRA/ES/P/05/2016, diferente da vigente do DNIT, possui uma observação que cita que outras curvas granulométricas podem ser utilizadas, desde que apresente critérios como boa trabalhabilidade, qualidade e atenda as características específicas descritas pela norma.

Figura 3.4 – Várias curvas enquadradas nos limites da Faixa C do DNIT



Autor: Momm (1998, p. 58)

3.1.2 – Método por equação (Método Racional)

O método por equação é baseado na Equação de *Füller* ou *Talbot*, ou seja, a partir de um método racional, e consiste na determinação de uma curva granulométrica bem definida.

Essa metodologia se baseia na fixação dos diâmetros máximo e mínimo dos agregados a serem utilizados para compor o esqueleto mineral. As peneiras intermediárias são definidas, e através da Equação 3.1, são determinados a quantidade de material que irá compor cada fração do esqueleto mineral da mistura asfáltica.

$$\%p = a. \left(\frac{d}{D}\right)^n \quad (3.1)$$

onde:

%p = percentagem em peso que passa na peneira de abertura d;

a = constante, considerado igual a 100;

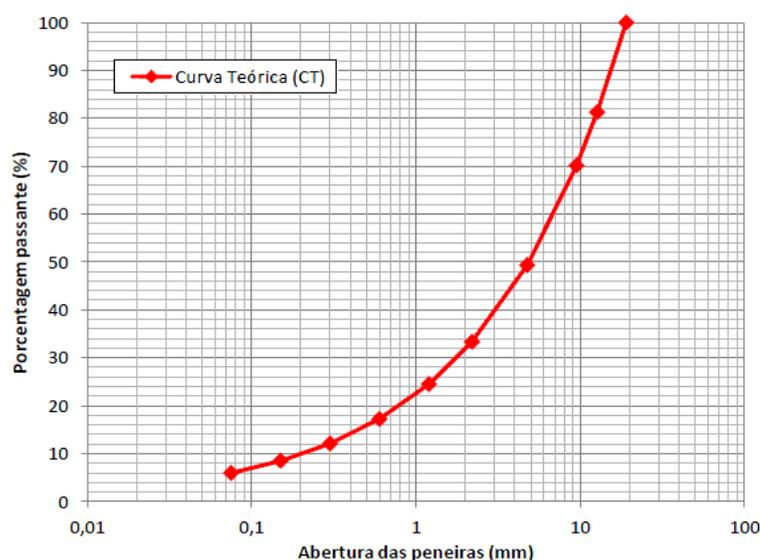
d = abertura de uma dada peneira (mm);

D = diâmetro máximo, abertura da peneira que passa 100% (mm);

n = expoente que define o tipo de curva granulométrica.

Essa foi a metodologia utilizada para compor os esqueletos minerais das misturas asfálticas estudadas nesse trabalho. Diferente do método por tentativa, as curvas granulométricas resultadas nessa metodologia são contínuas, já que essa metodologia considera que os grãos de diâmetros menores preencham gradualmente os vazios formados entre as partículas de diâmetros maiores.

Figura 3.5 - Curva Teórica pelo Método Racional



Fonte: Barra (2009, p. 157)

O coeficiente n da Equação 3.1 indica o tipo de graduação do esqueleto mineral, que podem ser classificados como denso, aberto ou tipo macadame (DNIT, 2006b). Os valores de n para cada tipo de graduação são:

- Agregado de graduação densa: $0,35 < n < 0,55$
- Agregado de graduação aberta: $0,55 < n < 0,75$
- Agregado tipo macadame: $D \cong 2d$; $n \cong 1,0$

Para esse trabalho, foi escolhida a graduação densa, que tem como objetivo um controle maior sobre os teores de vazios obtidos e assim, obter misturas betuminosas com uma maior estabilidade.

A precisão das curvas granulométricas fornecida por esse método, possibilitou uma maior uniformidade das misturas asfálticas estudadas nesse trabalho. A pouca variabilidade das misturas asfálticas viabilizou uma análise mais acurada da influência das ADF sobre o comportamento mecânico das misturas asfálticas.

3.3. MISTURAS ASFÁLTICAS

Misturas asfálticas são compostas geralmente por granulares de frações com diversos tamanhos e formas, na presença de um ligante betuminoso (agente aglutinante). O conjunto granular-betume pode eventualmente possuir aditivos ou adições, em proporções adequadas (OLARD 2003; BARRA, 2009). A Figura 3.6 mostra um esquema das estruturas de pavimento.

A estrutura de um pavimento deve apresentar uma boa estabilidade mecânica sob quaisquer condições climáticas. A camada de rolamento é a parte superior dessa estrutura, onde há o contato direto com os pneumáticos dos veículos, e suas características representam os objetivos principais de toda a estruturas rodoviária. Essa camada deve propiciar: conforto (apresentar pouca irregularidades e limitação sonora); segurança (aderência adequada entre pneu e pavimento); resistência ao desgaste; e boa drenagem sob fortes chuvas (HAMLAT, 2007).

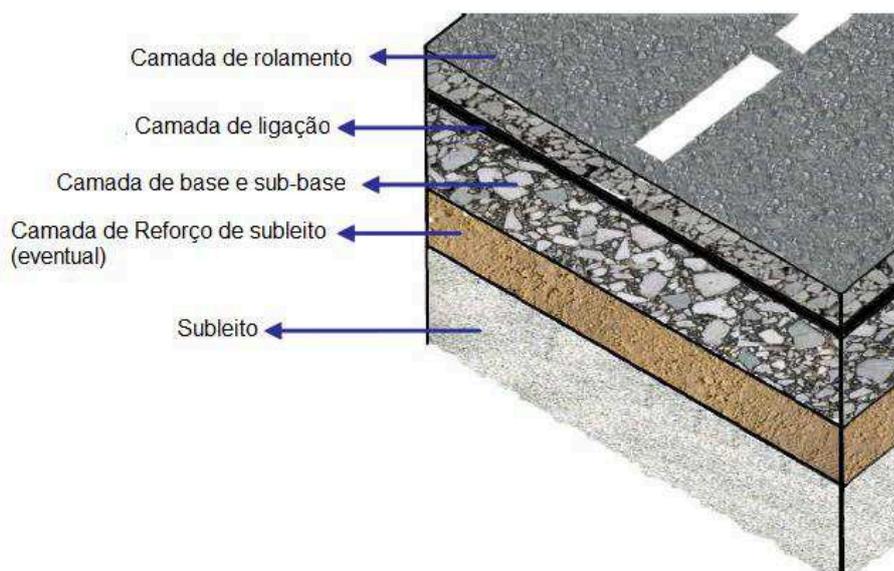
O dimensionamento de uma estrutura de pavimento consiste na utilização de dois dados fundamentais, que são o tráfego e a capacidade de suporte do solo. O

papel da camada de rolamento, além das supracitadas, consiste em distribuir os esforços das cargas provenientes do tráfego para as camadas subjacentes, onde essas têm o objetivo de transmitir esses esforços ao solo de fundação. Logo, a concepção das camadas de rolamento é fortemente relacionada com a intensidade de tráfego, enquanto que suas camadas subjacentes, com a capacidade de suporte do solo de fundação (PERRET, 2003).

As estruturas de um pavimento são formadas por diversas camadas, que possuem diferentes rigidez e espessuras, porém elas atuam como um corpo monolítico. Além de suportar os esforços provenientes do tráfego, deve resistir a outros fatores como gradiente térmico, hidrológicos, incidência de raio UV, entre outros.

A formulação de misturas betuminosas é geralmente muito delicada, pois a melhora de uma propriedade com a mudança em composição pode afetar negativamente outra. O aumento do teor de ligante pode melhorar a resistência à fadiga, porém torna a mistura asfáltica mais vulnerável a deformações permanentes (LCPC, 2007).

Figura 3.6 - Camadas de uma estrutura de pavimento



Fonte: Hamlat (2007, p. 36)

A viscoelasticidade proveniente do betume influencia consideravelmente o comportamento mecânico das misturas asfálticas, conforme a velocidade de aplicação de cargas: se eles estão aplicados muito rapidamente, o comportamento é

praticamente elástico enquanto que em casos de aplicação muito lentas de carga, o comportamento é predominante fluído viscoso (BAAJ, 2002; PERRET, 2003; BARRA, 2009).

As solicitações sofridas pelas estruturas rodoviárias ocorrem durante a passagem dos veículos, na qual são submetidas a carregamentos de curta duração. Esses carregamentos causam microfissuras, que consiste numa perda da rigidez e, devido ao seu efeito acumulativo ao longo do tempo, pode levar a ruptura da estrutura por fadiga (DI BENEDETTO *et al.*, 2003).

A velocidade da carga desempenha um papel importante da análise de resistência do material betuminoso, referente a fadiga e trilha de roda. Por unanimidade, é reconhecido que quanto menor a velocidade sobre o pavimento, maior será a possibilidade de se gerar trilha de roda (PERRET, 2003).

Para uma avaliação mais precisa das propriedades das misturas asfálticas, é imprescindível que os ensaios laboratoriais utilizados sejam capazes de simular, com maior precisão possível, os possíveis esforços de solicitações aplicados nas estruturas rodoviárias em campo (PERRET, 2003; BARRA 2005; BARRA, 2009).

4 MATERIAIS UTILIZADOS NAS MISTURAS ASFÁLTICAS

Neste capítulo serão abordadas algumas características dos materiais que compõem as misturas asfálticas formuladas. No que tange aos materiais granulares pétreos, serão apresentados os resultados dos ensaios de caracterização física, assim como as análises semi-quantitativas por Fluorescência de Raio X, análise da morfologia com a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e visualização de frações fina em microscopia de elevada resolução. Os dados referentes ao ligante betuminoso foram extraídos do trabalho de Búrigo (2015), pelo fato do ligante asfáltico utilizado nesse trabalho ser da mesma amostra utilizada na pesquisa citada.

Tendo como objetivo realizar um estudo da influência das ADF sobre as características mecânicas originais das misturas asfálticas, foram realizados ensaios de caracterização física como: massa específica da parte miúda do esqueleto mineral (composta parcialmente por ADF); adesividade do sistema granular-mástique; e ensaio ID_M. Visando uma análise mais aprofundada das areias descartada de fundição (ADF), foram realizados aqui também o ensaio semi-quantitativo de Fluorescência de Raio X, Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e microscopia de elevada resolução e o ensaio quantitativo de Difração de Raio X.

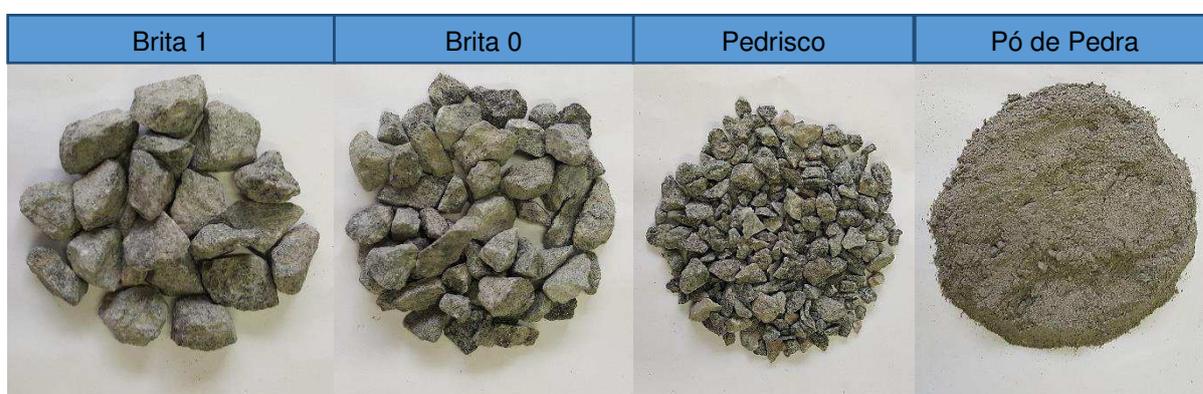
4.1 AGREGADO PÉTREO

Como foi citado anteriormente, para esse trabalho será utilizado o Método Racional para a obtenção da composição do esqueleto mineral. Inicialmente, o material britado foi fornecido para este estudo em frações comercializadas pela empresa Vogelsanger (brita 1, brita 0, pedrisco e pó de pedra), logo, foi necessário realizar o ajuste do fracionamento das britas utilizado as peneiras com as seguintes

aberturas: 19,10mm; 12,70mm; 9,50mm; 4,80mm; 2,20mm; 1,20mm, 0,60mm; 0,30mm; 0,15mm; e 0,075mm.

Para o agregado pétreo, o peneiramento não foi utilizado para analisar a granulometria, e sim para separar as britas em frações de tamanhos diferentes, referentes as aberturas das peneiras escolhidas neste estudo. O procedimento descrito anteriormente teve como objetivo: possuir as frações de brita necessárias para compor as amostras dos ensaios de caracterização do material; e montar os esqueletos minerais, através do Método Racional, a serem utilizados as misturas asfálticas estudadas nesse trabalho.

Figura 4.1 - Frações comercializada da brita fornecida para o estudo



Fonte: Autor

Figura 4.2 – Materiais retidos nas peneiras utilizadas para esta pesquisa



Fonte: Autor

A Tabela 4.1 apresenta um resumo dos resultados dos principais ensaios de caracterização do agregado pétreo utilizado, suas respectivas normas e limites comparativos, quando estabelecido pela norma em vigor.

Tabela 4.1 - Resultados dos ensaios de caracterização do agregado pétreo

Ensaio	Métodos de Ensaio	Resultados	Limites normativos
Abrasão Los Angeles (%)	DNER-ME 035/1998	12,54%	Menor que 50%
Massa Específica Real – gráudo (g/cm³)	DNER-ME 081/1998	2,792	-
Massa Específica Real – miúdo (g/cm³)	DNER-ME 084/1995	2,82	-
Massa Específica Chapman – miúdo (g/cm³)	DNER-ME 194/1998	2,793	-
Densidade Real – material finamente pulverizado (g/cm³)	DNER-ME 085/1994	2,844	-
Adesividade ao ligante betuminoso	DNER-ME 078/1994	Má	-
Durabilidade (%)	DNER-ME 089/1994	1,95	Menor que 12%
Índice de Forma	ABNT NBR 7809/2008	0,68	Maior que 0,5
Absorção (%)	DNER-ME 081/1998	0,36	-

Fonte: Autor

O ensaio de abrasão Los Angeles (DNER-ME 035/1998) mede a resistência de um agregado ao receber choques de cargas abrasivas aplicadas por esferas metálicas (Figura 4.3). O ensaio foi realizado de acordo com a classificação B da norma e apresentou um resultado satisfatório, com 12,54% de perda, muito aquém do limite máximo de 50% de perda estabelecida pela norma.

Para definir a massa real do agregado gráudos (retidos na peneira 12,7mm a 4,8mm), foram realizados dois ensaios: densidade aparente do agregado gráudo (DNER-ME 081/1998); e densidade real a vácuo (foi utilizado os mesmos procedimentos utilizados para a determinação desse parâmetro dos agregados miúdos, descrito na norma DNER-ME 084/1995). Esse último ensaio foi realizado com o objetivo de conferir se havia a repetição do resultado, assim conferindo uma

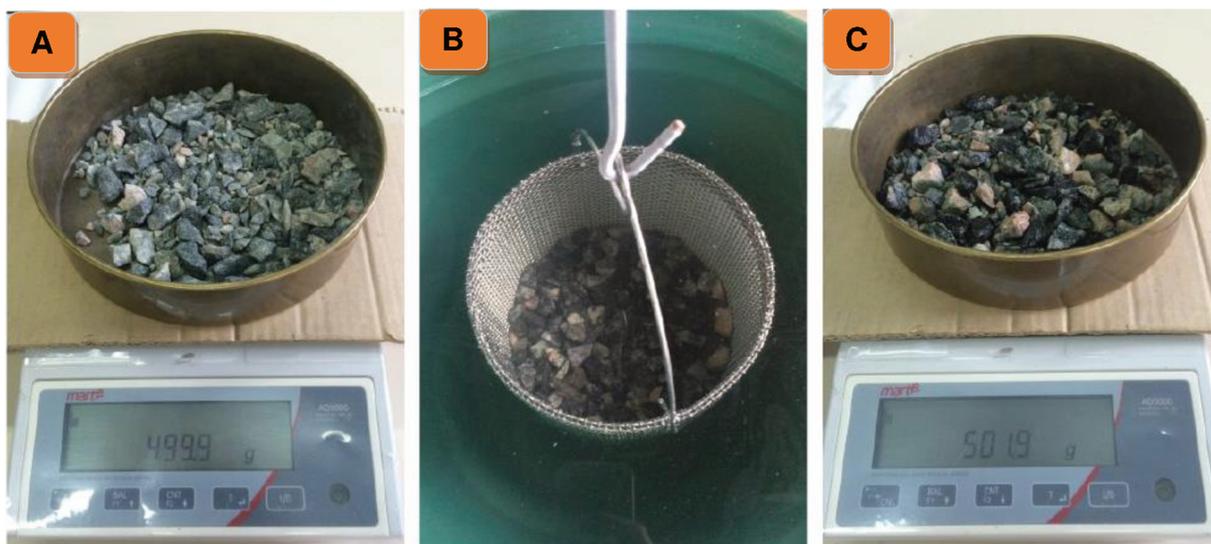
maior credibilidade ao valor encontrado da massa específica real do agregado graúdo. O resultado do primeiro ensaio foi $2,792\text{g/cm}^3$, enquanto do segundo, $2,804\text{g/cm}^3$. Devido a diferença entre os valores ser pequena, observou-se a presença de uma repetitividade dos valores, logo confirmando o valor encontrado da massa específica do agregado graúdo.

Figura 4.3 - Ensaio de abrasão Los Angeles



Fonte: Autor

Figura 4.4 - Ensaio de Densidade Aparente do agregado graúdo



Fonte: Meurer (2015, p. 62)

A massa específica real do agregado miúdo a vácuo (DNER-ME 084/1995) é de $2,820\text{g/cm}^3$ e seu procedimento é semelhante ao apresentado na Figura 4.5, já

que como foi mencionado anteriormente, esse ensaio foi utilizado para validar o valor da massa específica do agregado graúdo.

Figura 4.5 - Ensaio de Densidade Real a Vácuo



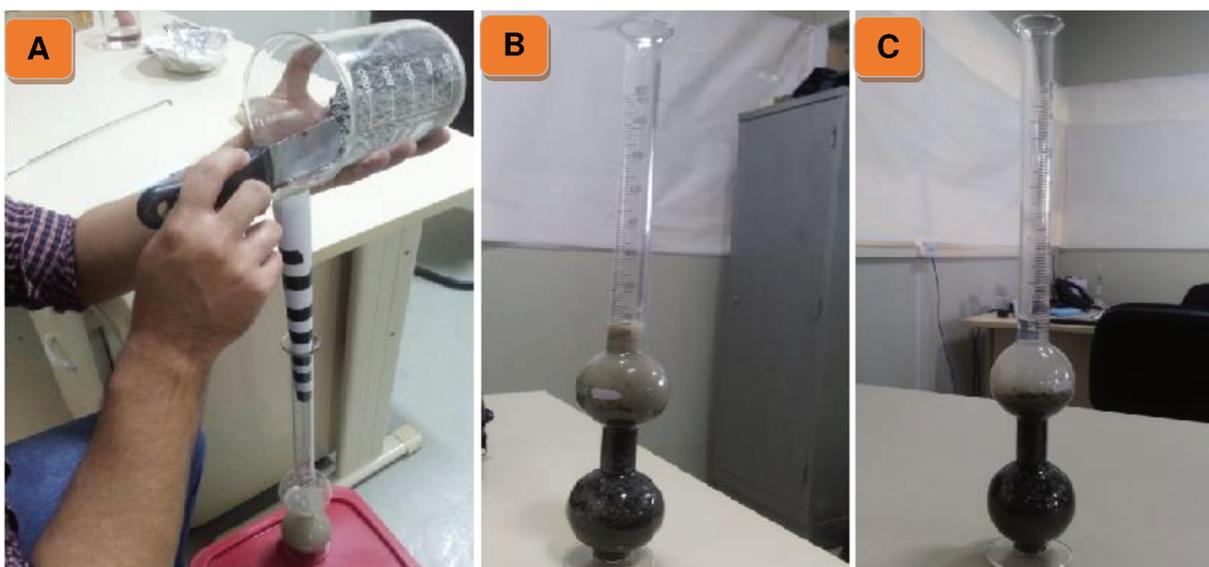
Fonte: Autor

Além do ensaio citado anteriormente, foram realizados mais dois ensaios visando determinar a massa específica da fração miúda. Esses ensaios se diferem pelo tipo de frasco utilizado e pela composição de suas amostras, que são: Massa específica de agregado miúdo por meio do frasco Chapman (DNER-ME 194/1998) (Figura 4.6); e Densidade real de material finamente pulverulento por meio do frasco Le Chatelier (DNER-ME 085/1994) (Figura 4.7).

A massa específica pelo frasco Chapman deu $2,793\text{g/cm}^3$. A diferença entre os resultados do ensaio de massa específica do ensaio Chapman com a massa específica a vácuo se dá devido a composição da amostra (já que o ensaio no frasco Chapman não possui frações passante na peneira de abertura $0,075\text{mm}$, diferente do ensaio realizado a vácuo).

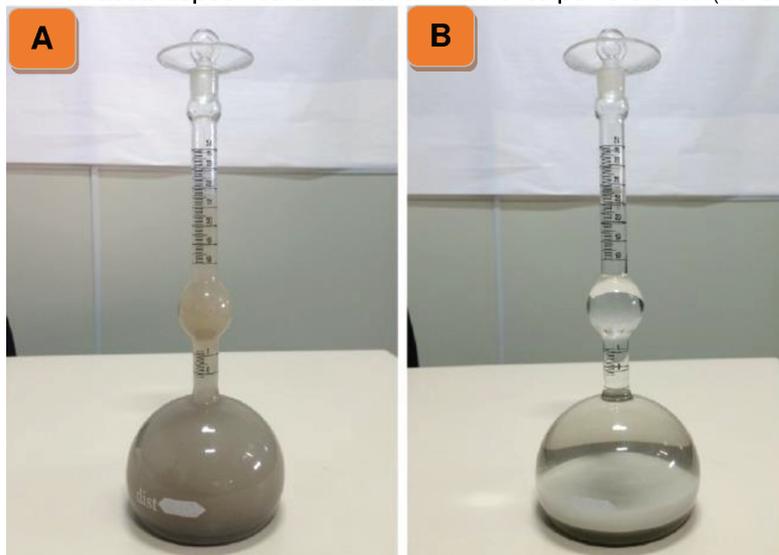
Assim como foi observado nos ensaios executados para a massa específica do agregado graúdo, o ensaio realizado a vácuo apresentou um resultado superior. Isso se dá devido ao vácuo induzir o a retirada do ar aprisionado no interior da amostra e então, possibilitar o preenchimento dessas regiões pela água.

Figura 4.6 - Massa Específica pelo frasco Chapman



Fonte: Autor

Figura 4.7 – Massa Específica de material finamente pulverulento (Le Chatelier)



Fonte: Meurer (2015, p. 66)

A massa específica resultada do material finamente pulverulento é de $2,844\text{g/cm}^3$. O resultado da massa específica pelo frasco Le Chatelier determina a

massa específica do material passante na peneira nº200 (abertura 0,075mm). Observou que seu resultado foi superior, quando comparado as massas específicas de frações de diâmetros maiores. É lógico pensar que quanto mais fino o material, maior será a sua densidade.

O Ensaio de Durabilidade (DNER-ME 089/1994), também conhecido como sanidade, analisa a resistência do agregado quando expostos as intempéries do ambiente no qual o pavimento será implantado. A norma prevê o ataque químico tanto soluções de Sulfato de Sódio Anidro, quanto de Magnésio. Para esse trabalho foi escolhido a primeira solução e o agregado pétreo obteve uma perda de 1,95%, logo de acordo com o limite normativo. Não apresentou granulares friáveis a ponto de se quebrarem com a pressão dos dedos.

Figura 4.8 - Ensaio de Durabilidade



Fonte: Autor

O ensaio de Índice de Forma (ABNT NBR 7809/2008) fornece um parâmetro fundamental relacionado a estabilidade das misturas asfálticas, devido a influência direta que a forma dos granulares tem sobre a trabalhabilidade, resistência ao cisalhamento e a energia de compactação necessária para se alcançar uma determinada massa específica. Partículas cúbicas de arestas afiladas possuem um melhor intertravamento entre elas, resultando em uma melhora na estabilidade da mistura asfáltica (BERNUCCI *et al.*, 2008).

O índice de forma obtido para o agregado foi de 0,68, logo estando acima do limite mínimo de 0,5 determinado pela norma. Isso indica que os agregados utilizados estão mais perto de possuírem uma boa cubicidade, ao invés de muita lamelaridade.

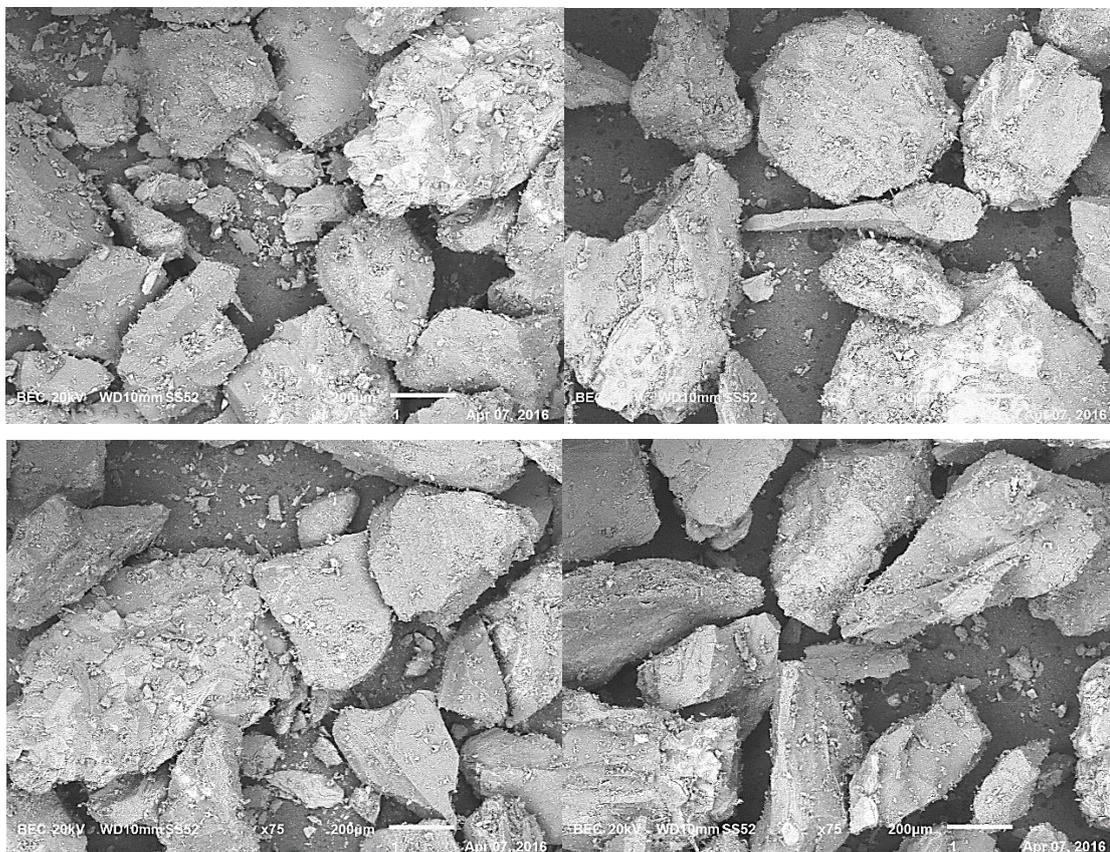
O ensaio do Índice de Forma não é realizado nas frações miúdas. Entretanto, como o objetivo desse trabalho é a análise da influência da substituição da parte miúda da brita por ADF nas misturas asfálticas, foi realizado uma análise no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) no LAMIR-UFPR (Figura 4.9).

Figura 4.9 - MEV utilizado no LAMIR-UFPR



Fonte: Autor

Figura 4.10 - Imagens com MEV do pó de brita



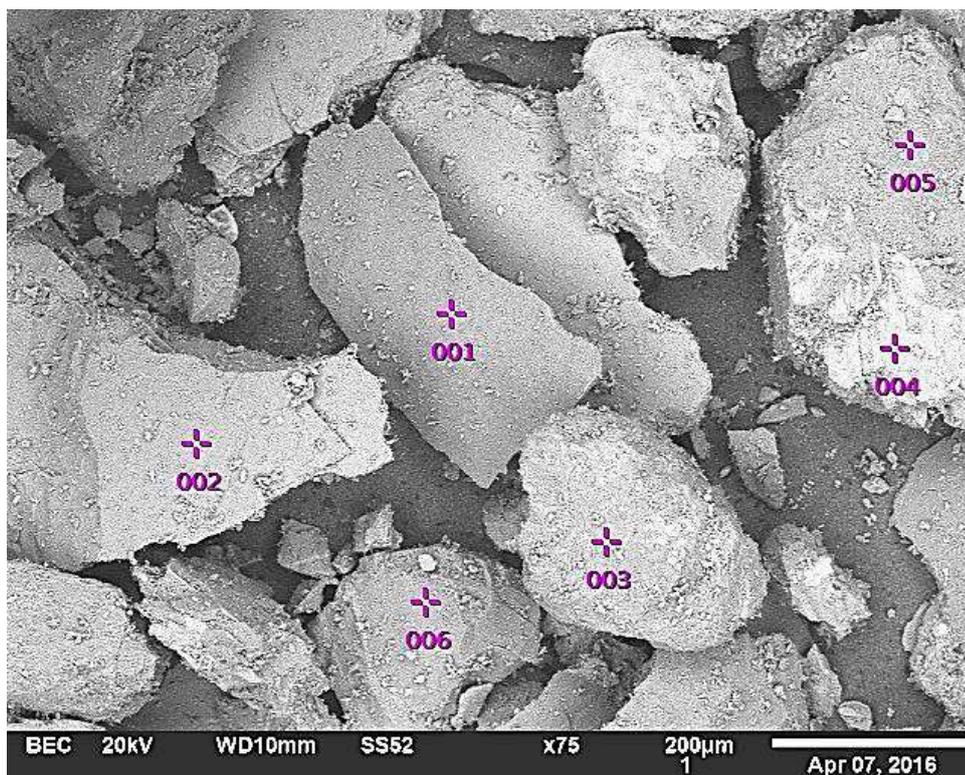
Fonte: Autor

Pelas imagens do MEV (Figura 4.10) é possível observar que as partículas do pó de brita possuem um índice de forma condizente ao obtido em medições de britas graúdas do mesmo material. É possível constatar uma boa quantidade de partículas com formato cúbico e pouca partícula lamelar. Podemos observar a microtextura rugosa do agregado, fator esse que favorece no intertravamento do esqueleto mineral.

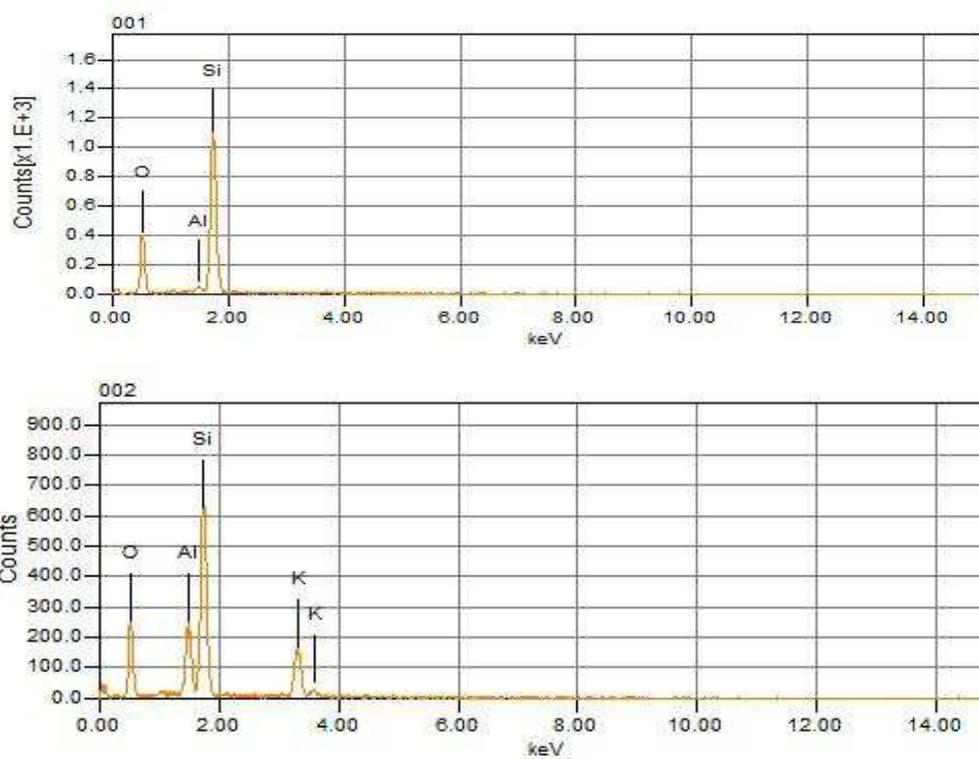
Além da obtenção de imagens, foi possível também analisar a amostra com o sistema *Energy Dispersive Spectroscopy* (EDS) acoplado ao MEV e possibilita a estimar uma composição quantitativa e semi-quantitativa de amostras, a partir da emissão de raios X em pontos escolhidos pelo usuário. A Figura 4.11 mostra os pontos selecionados na imagem obtida pelo MEV e o conjunto de espectros gerados a partir dessa análise.

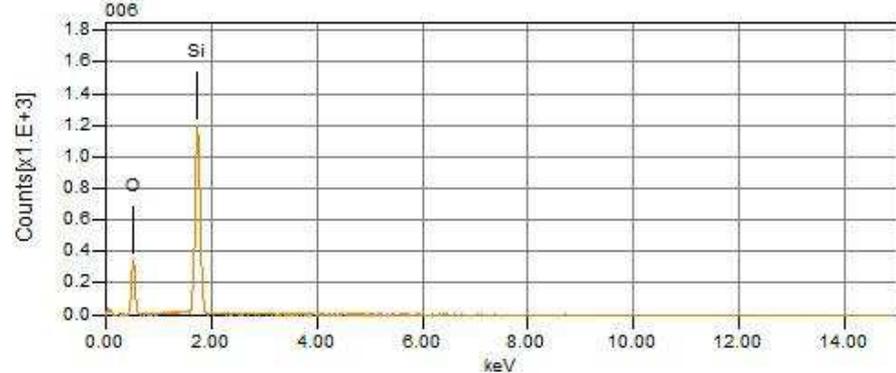
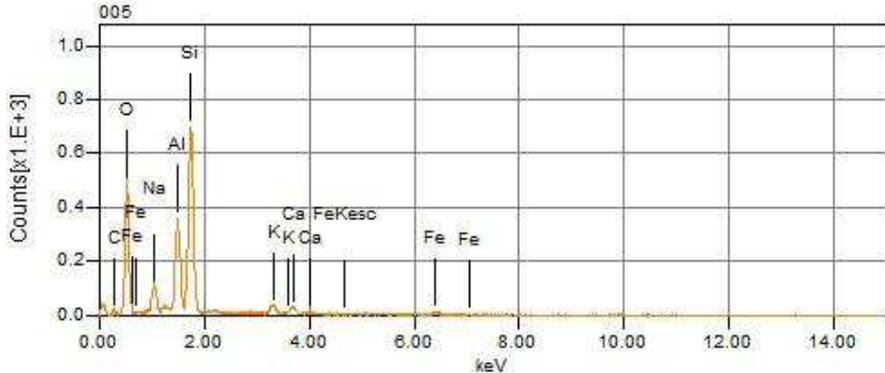
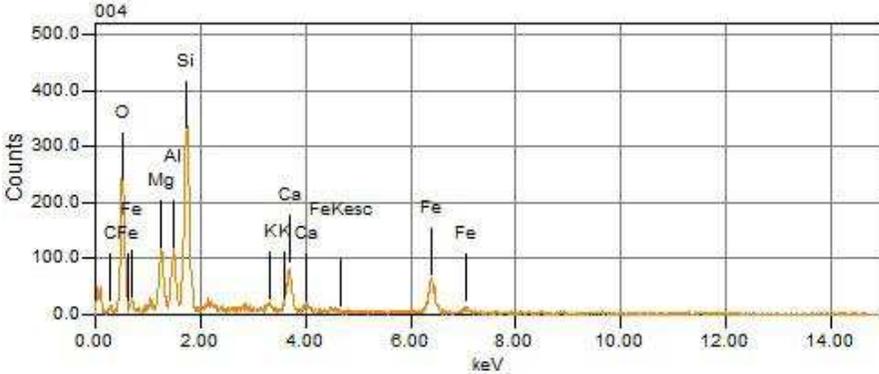
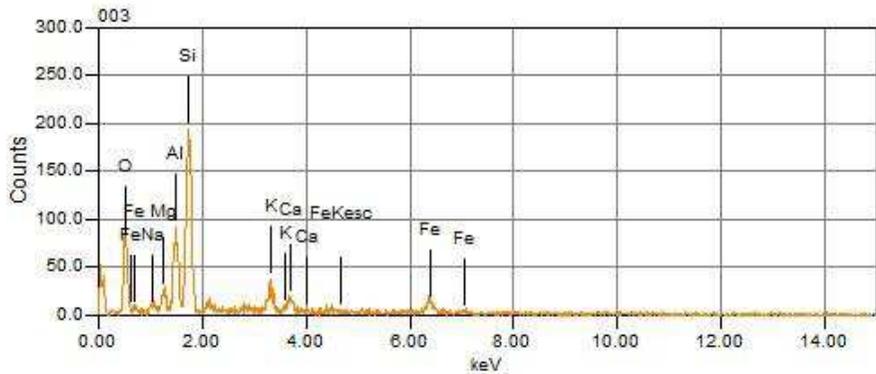
É possível observar que em todos os pontos selecionados da amostra de brita, há picos de silício em sua superfície. Entretanto é importante ressaltar que não é possível determina a composição desse material apenas pela análise do EDS, já que os espectros representam apenas alguns dos elementos detectados em análises pontuais da superfície do material.

Figura 4.11 – Sistema EDS acoplado no MEV



Fonte: Autor

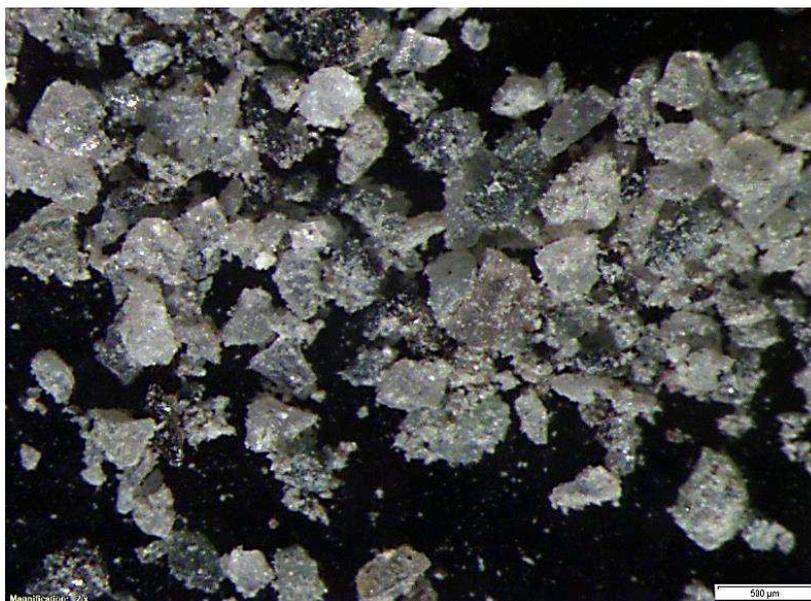




Fonte: Autor

Além da obtenção das imagens do MEV, também foram realizadas análises da forma da parte miúda dos agregados, através de imagens microscópicas de elevada resolução, obtidas no Laboratório de Microfluídica (UFSC – Centro de Joinville), mostradas na Figura 4.12 e Figura 4.13.

Figura 4.12 - Imagens microscópicas de elevada resolução. Brita retida na 0,15mm



Fonte: Autor

Figura 4.13 - Imagens microscópicas de elevada resolução. Brita retida na 0,6mm



Fonte: Autor

O ensaio de Fluorescência de Raio X foi realizado no LAMIR-UFPR e consiste em um método não destrutivo, quali-quantitativo e é utilizado para determinar os elementos e as suas respectivas quantidades em uma amostra. Não é o objetivo desse trabalho aprofundar a teoria relacionada ao MEV, ao ensaio de Fluorescência de Raio X e Difração de Raio X. Para essa pesquisa, o interesse se deu apenas em seus resultados, visando uma análise mais aprofundada dos materiais utilizados para compor as misturas asfálticas.

Como foi constatado na literatura técnica e nos espectros obtidos pela análise com o EDS no MEV, o resultado do ensaio de Fluorescência de Raio X apontou que 58,1% da brita analisada é composta por SiO_2 , como mostra a Tabela 4.2.

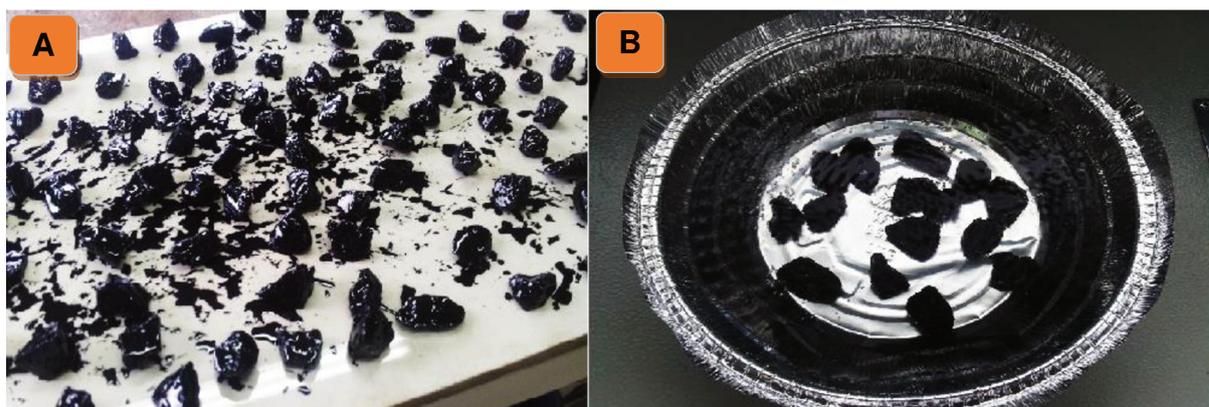
Tabela 4.2 - Resultado do ensaio de Fluorescência de Raio X

	Brita
SiO₂ (%)	58,1
Al₂O₃ (%)	13,4
Fe₂O₃ (%)	9,2
Cr₂O₃ (%)	< 0,1
MgO (%)	4,2
K₂O (%)	1,8
Na₂O (%)	3,3
SO₃ (%)	0,1
TiO₂ (%)	0,8
CaO (%)	6,3
Cl (%)	0,1
MnO (%)	0,2
SrO (%)	0,1
P₂O₅ (%)	0,2
ZrO₂ (%)	< 0,1
Perda ao Fogo (%)	2,29

Fonte: Autor

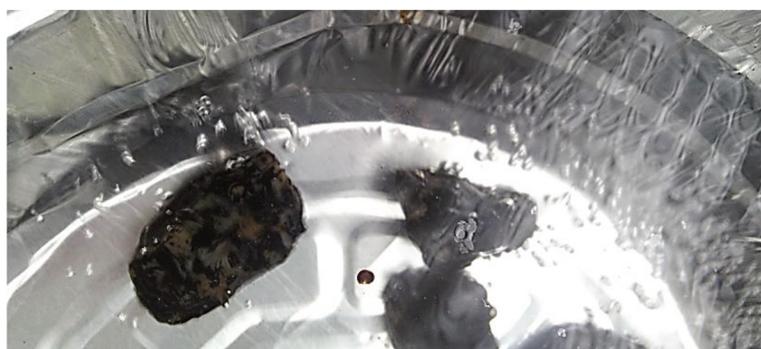
O ensaio de adesividade (DNER-ME 078/1994) determina a capacidade de adesão do agregado ao betume. A adesividade foi insatisfatória, devido ao descolamento da película betuminosa envolta no granular. Esse resultado pode ser explicado pela elevada presença de SiO_2 na composição da brita, como mostra a Tabela 4.2. A eletronegatividade do dióxido de silício resulta em uma má adesividade com o ligante asfáltico, já que este também é eletronegativo.

Figura 4.14 - Ensaio de Adesividade



Fonte: Autor

Figura 4.15 – Descolamento da película de ligante asfáltico



Fonte: Autor

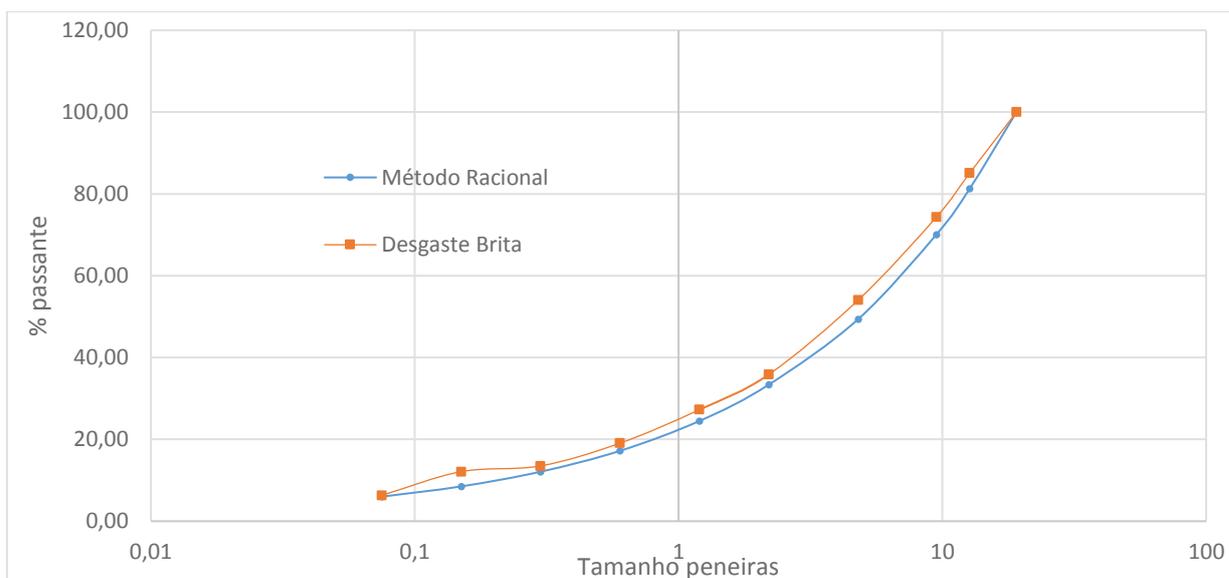
O ensaio de Índice de desgaste após a compactação Marshall sem ligante (ID_M) é padronizado pela norma DNER-ME 401/1999. Apesar da norma determinar as peneiras e as quantidades de matérias retido em cada peneira a serem utilizadas, o ensaio ID_M nesse trabalho foi executado com o esqueleto mineral a ser utilizado nas misturas asfálticas, composto pelo Método Racional, visando obter uma análise mais próxima dos efeitos da compactação por impacto nas misturas asfálticas formuladas nesse estudo.

Devido a divergência com os procedimentos normativos, não foi realizado o cálculo do valor do ID_M nesse trabalho. O principal objetivo em realizar esse ensaio foi para analisar como a curva granulométrica do esqueleto mineral a ser utilizado nas misturas asfálticas se desgasta, após 50 golpes em cada face com o soquete Marshall.

Figura 4.16 - Amostra do ensaio IDm



Fonte: Autor

Figura 4.17 - Curva granulométrica do ensaio ID_M

Fonte: Autor

A Figura 4.17 representa a curva granulométrica antes da compactação e após a compactação por impacto com o soquete Marshall. É possível observar que houve uma redução das partículas em todas as frações e o acúmulo de finos passante na peneira de abertura 0,15mm, representado pela leve saliência na base da curva granulométrica.

Através dos dados desse ensaio, é possível estimar a granulometria do esqueleto mineral após a compactação por impacto. A quebra dos granulares e,

conseqüentemente, o aumento de finos no esqueleto mineral resulta em um aumento da sua superfície de contato, logo necessitando de um teor de ligante superior para esse esqueleto mineral mais fino, comparado com o que seria necessário para o esqueleto mineral original, antes da compactação.

4.2 – AREIA DESCARTADA DE FUNDIÇÃO (ADF)

As areias utilizadas para essa pesquisa são provenientes de duas linhas de produção da sede da empresa Tupy S.A., situada em Joinville/SC. Antes de iniciar qualquer ensaio de caracterização foi realizado o peneiramento da ADF. Entretanto, diferente da brita, no qual o único objetivo desse procedimento foi apenas a separação do material em frações específicas para montar as amostras dos ensaios de caracterização e esqueletos minerais, na ADF o peneiramento também foi utilizado para se conhecer sua distribuição granulométrica.

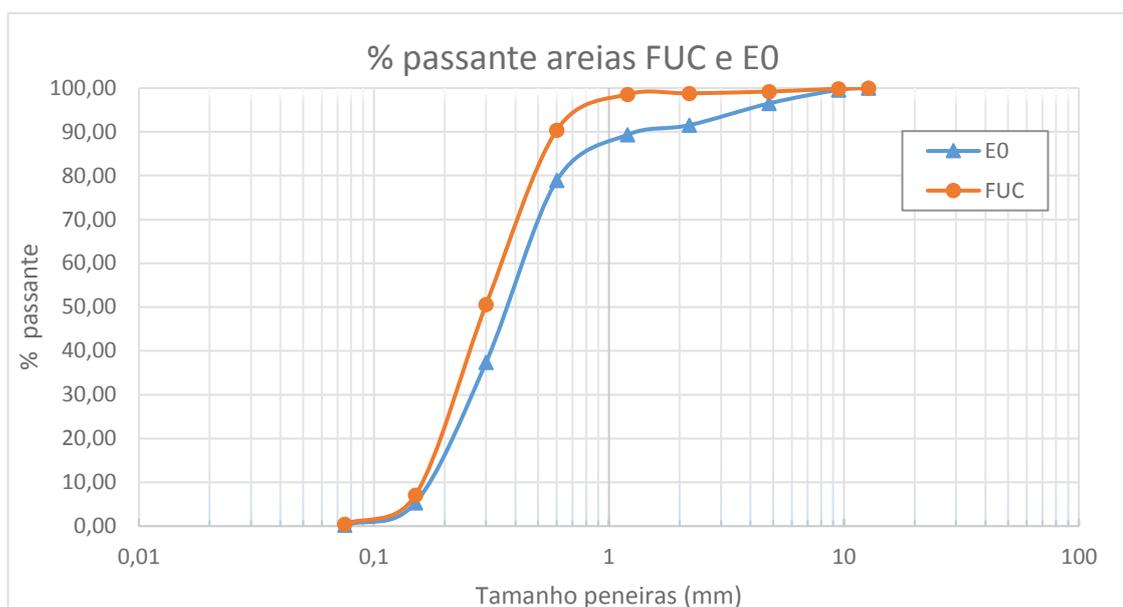
A descoberta da curva granulométrica foi importante para verificar em quais frações se concentram a maior parte desse rejeito industrial, visando o tamanho representativo desse material. A Figura 4.18 apresenta a curva granulométrica obtida de cada ADF analisada.

Para realizar esse gráfico, foi peneirado todas as ADF fornecidas pela empresa para esta pesquisa, composta por aproximadamente 32,5kg da ADF E0 e 18,5kg da ADF FUC, visando obter uma máxima representatividade em laboratório desse material.

Em ambas as ADF haviam grumos (Figura 4.19) de areias que eram facilmente desfeitos com a pressão dos dedos, porém considerando uma situação de utilização desse material em misturas asfálticas em que não teria um processo mecânico prévio para desfazer cada grumo, foi realizado o peneiramento sem modificar excessivamente a característica vinda de campo.

Os grumos são formados devido a ação da chuva ou umidade, que age sobre o local de deposição, criando na superfície uma crosta coesa, devido as partículas finas de bentonita e pó de carvão presente na ADF (CARNIN, 2008).

Figura 4.18 - Curva Granulométrica da ADF E0 e ADF FUC



Fonte: Autor

Através da curva granulométrica, foi possível constatar que as frações representativas das areias se encontrava retidas nas peneiras de abertura 0,3mm e 0,15mm. A porcentagem desses materiais que ficaram retidos nas duas peneiras foram de 73,61% para ADF E0 e 83,31% para ADF FUC.

Caso os grumos representados na Figura 4.9 fossem desfeitos, haveria uma maior quantidade de ADF desagregada, resultando em um crescimento da elevada quantidade de material retido nas peneiras supracitadas.

Figura 4.19 - Grumos encontrados na ADF



Fonte: Autor

Nota-se uma grande predominância desses dois materiais nessas duas peneiras. Visando obter um reaproveitamento mais eficiente em larga escala, foi decidido que as frações dos esqueletos minerais que serão compostas por ADF serão as retidas nas peneiras 0,3mm e 0,15mm (Figura 4.20).

A Tabela 4.3 apresenta, de forma resumida, os resultados obtidos em ensaios de massa específica, semelhantes ao realizados em agregados pétreos, porém nesse caso há a participação de ADF nas frações 0,3mm e 0,15mm em amostras que antes eram compostos integralmente por brita. É possível observar uma leve redução dos valores das massas específicas de amostras com ADF, quando comparados com as obtidas a partir dos mesmos ensaios realizados com amostras compostas integralmente por brita.

Tabela 4.3 - Resultados de ensaios de caracterização de agregados pétreo e ADF

Ensaio	Métodos de Ensaio	Resultados E0	Resultado FUC	Resultado Brita
Massa Específica Real – miúdo (g/cm ³)	DNER-ME 084/1995	2,804	2,792	2,82
Massa Específica Chapman – miúdo (g/cm ³)	DNER-ME 194/1998	2,759	2,776	2,793
Adesividade ao ligante betuminoso	DNER-ME 078/1994	Má	Má	Má

Fonte: Autor

Figura 4.20 – Esqueleto mineral das misturas asfálticas ADF E0



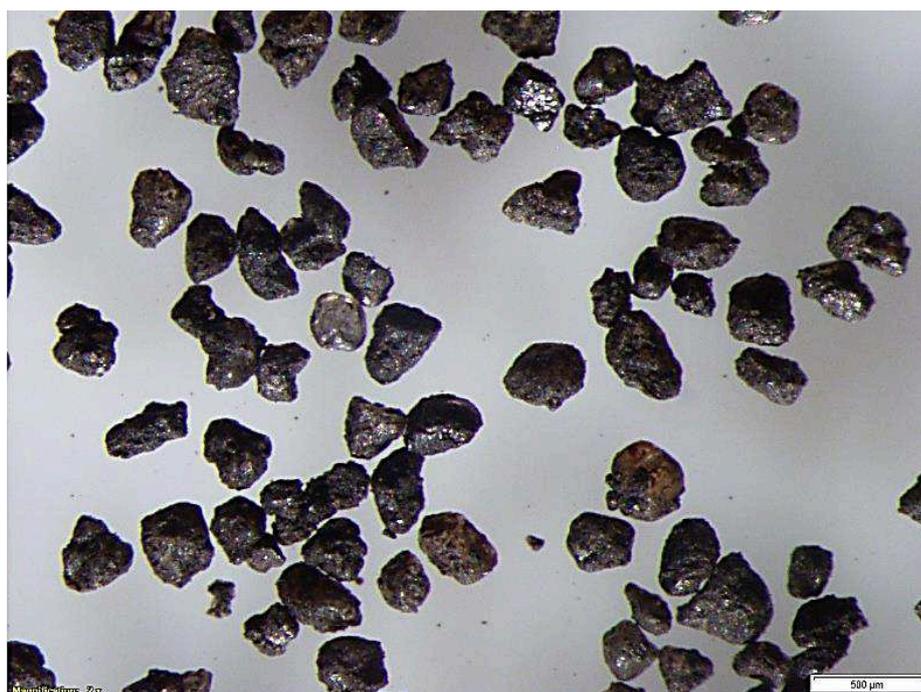
Fonte: Autor

As imagens microscópicas de elevada resolução foram obtidas no Laboratório de Microfluídica da UFSC-Joinville, representados nas Figura 4.21 à Figura 4.24. Nessas imagens foi possível realizar uma análise da microtextura e das formas encontradas nesse material.

É possível observar nas imagens da ADF E0 (Figuras 4.21 e Figura 4.22) que as partículas de areia adquiriram uma microtextura rugosa, comparada a microtextura lisa natural da areia-base. Observa-se também que há uma heterogeneidade na forma dos granulares, onde algumas se apresentam arredondadas, enquanto outras subangulares. Esses dois fatos podem ser explicados devido a presença de restos de elementos utilizados na atividade de fundição nas superfícies dos grãos.

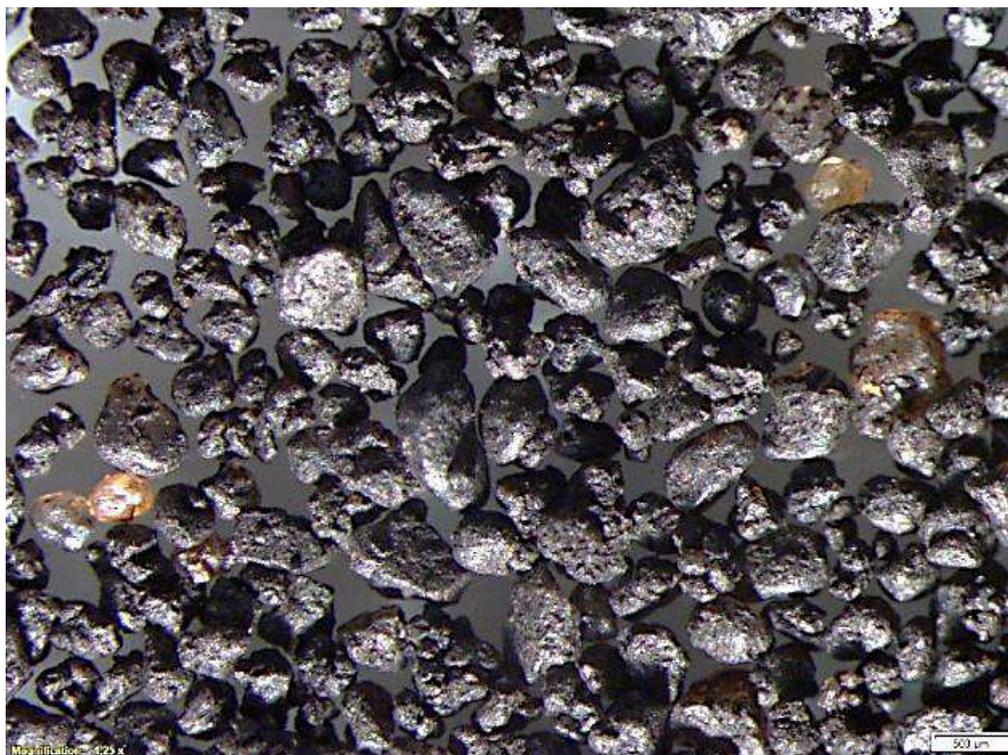
Já nas imagens da ADF FUC (Figura 4.23 e Figura 4.24), é possível observar que a quantidade de granulares que não tiveram sua superfície revestida por resto de fundição é aparentemente superior, comparada a ADF E0. Portanto, assim como a ADF E0, a ADF FUC também apresenta uma heterogeneidade em sua forma (variando entre arredondada e subangular) e, nas partículas que foram envoltas com os materiais provenientes da fundição, houve um ganho de textura em suas superfícies, tornando-as mais rugosas.

Figura 4.21 - Microscopia de elevada resolução da ADF E0 (retido 0,15mm)



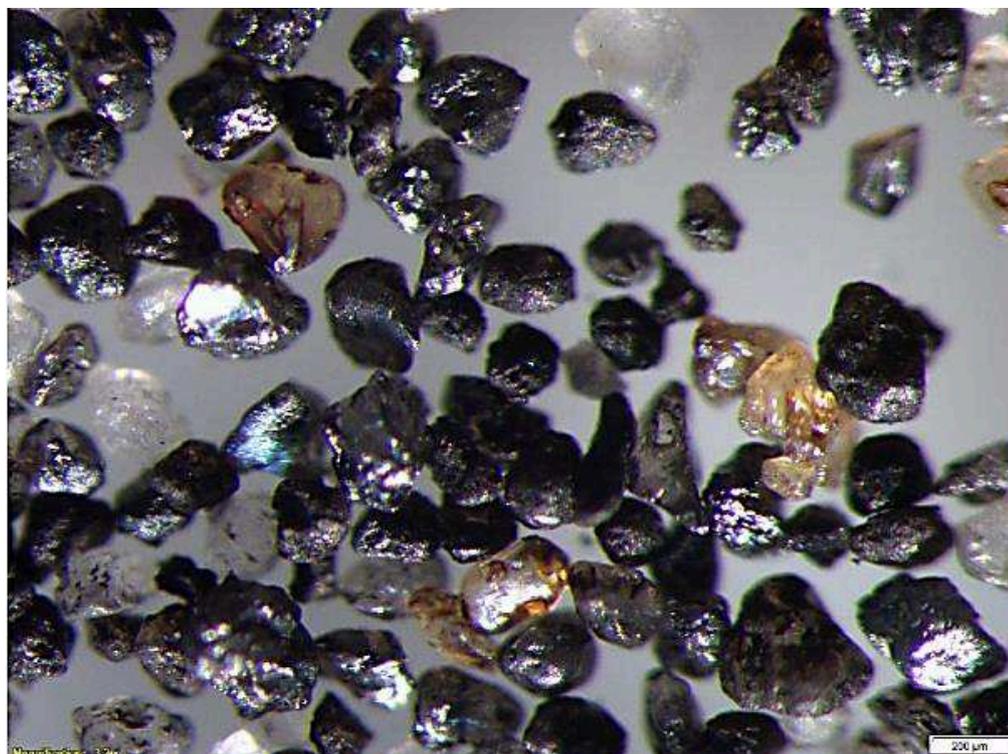
Fonte: Autor

Figura 4.22 - Microscopia de elevada resolução da ADF E0 (retido 0,30mm)



Fonte: Autor

Figura 4.23 - Microscopia de elevada resolução da ADF FUC (retido 0,15mm)



Fonte: Autor

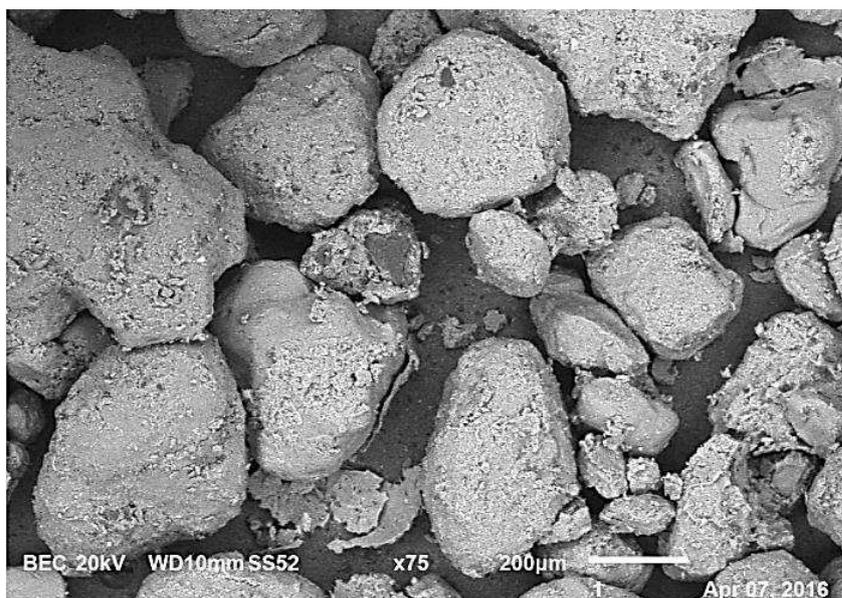
Figura 4.24 - Microscopia de elevada resolução da ADF FUC (retido 0,30mm)



Fonte: Autor

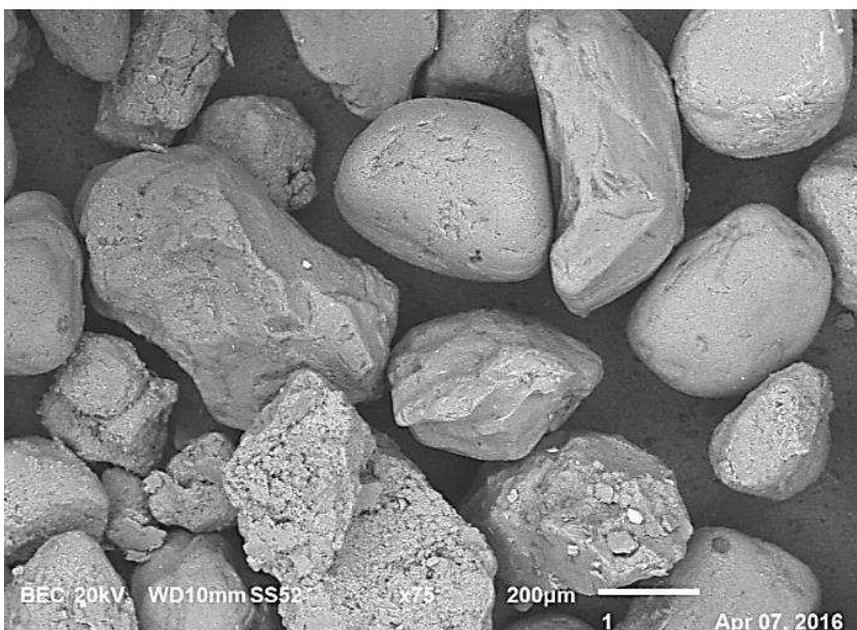
No LAMIR-UFPR foram realizadas análises com microscopia eletrônica de varredura (MEV) das areias descartadas de fundição. Através das imagens é possível comprovar a presença dos elementos da fundição na superfície das areias, gerando uma microtextura rugosa e, conseqüentemente, podendo resultar em uma melhora na aderência entre os granulares, comparada a areia pura. As imagens estão representadas nas Figura 4.25 e Figura 4.26.

Figura 4.25 - MEV da ADF E0



Fonte: Autor

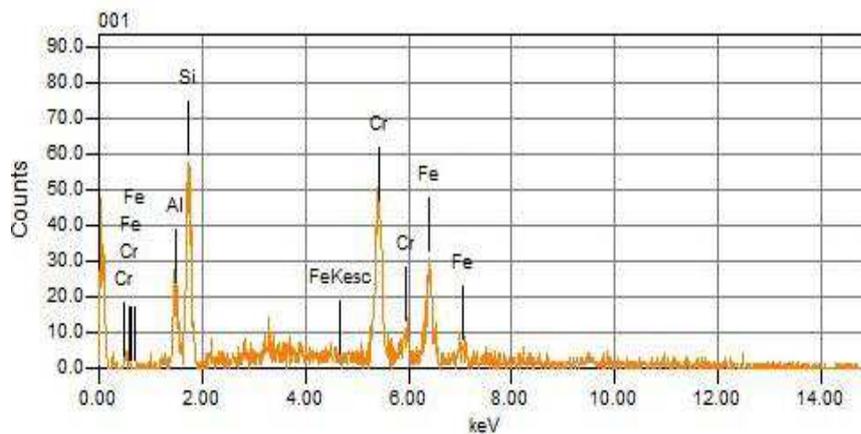
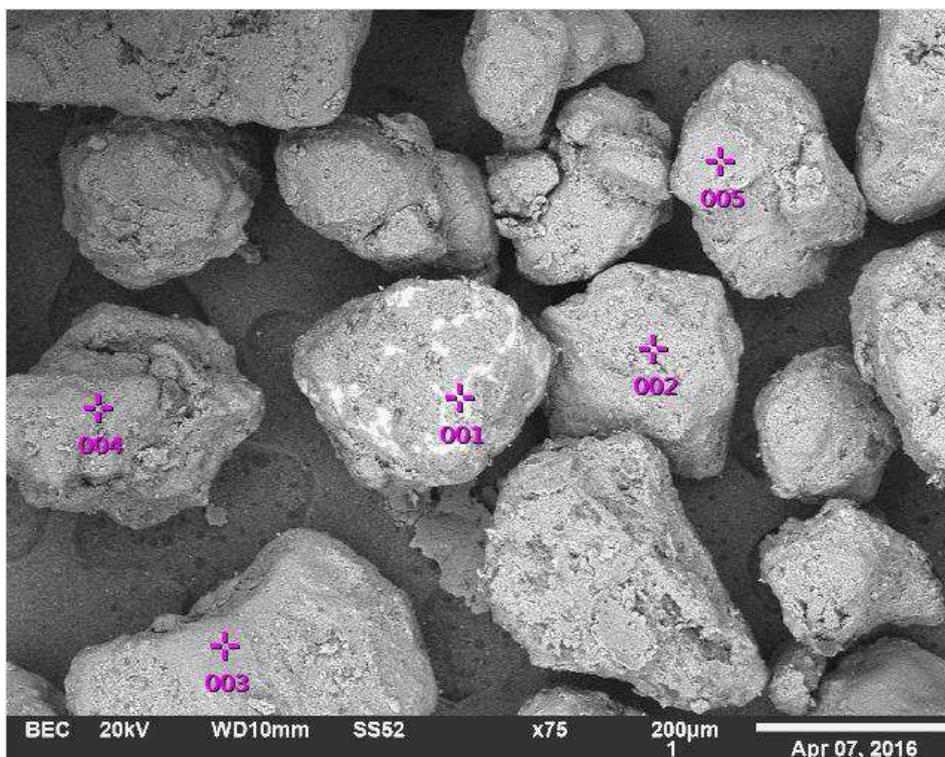
Figura 4.26 - MEV da ADF FUC

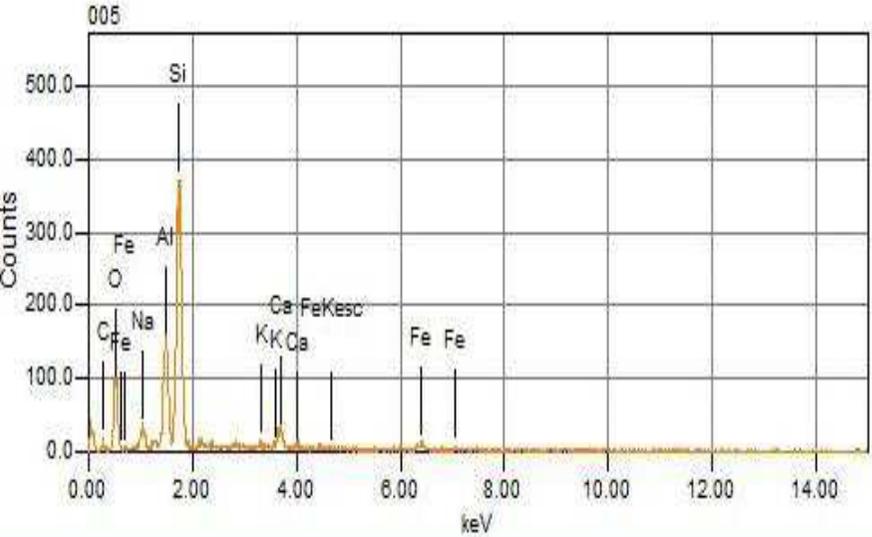
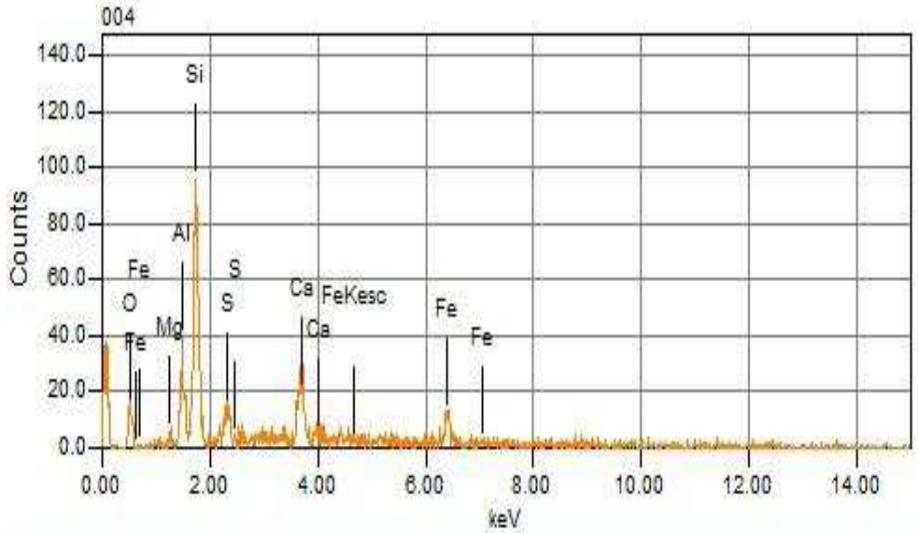
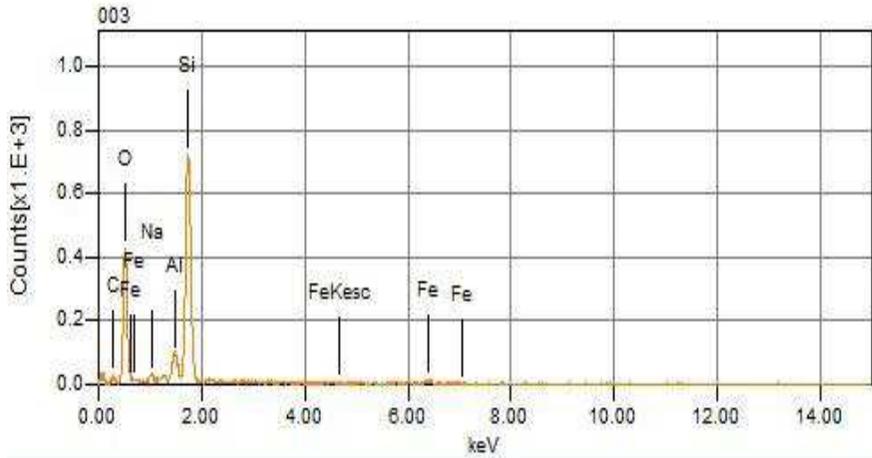
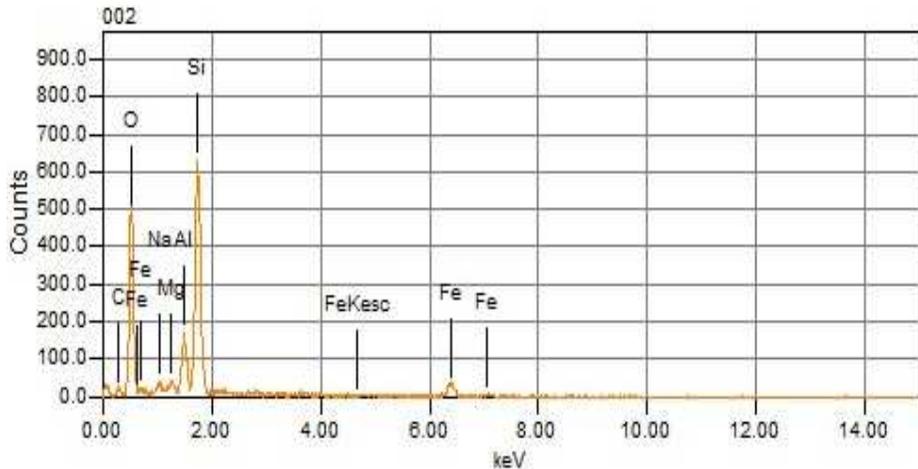


Fonte: Autor

Da Figura 4.27 à Figura 4.30 apresentam as informações obtidas pelo sistema EDS acoplado no MEV das ADF. Através dessas análises pontuais realizadas sobre a superfície do granular, podemos comprovar que, de fato, as superfícies rugosas formadas sobre os grãos de areia são compostas pela bentonita, pó de carvão e até de metais provenientes da fundição nas superfícies da areia.

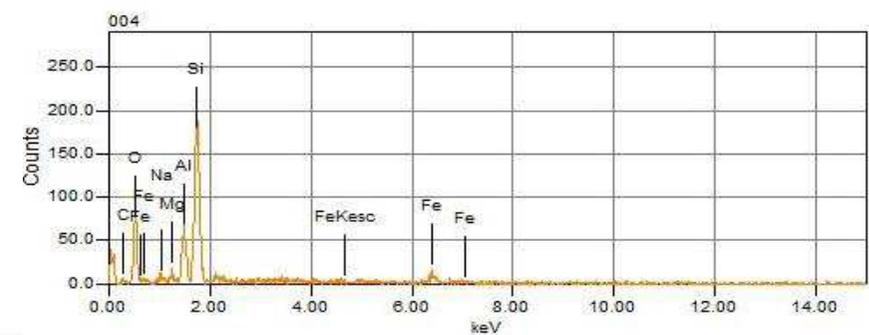
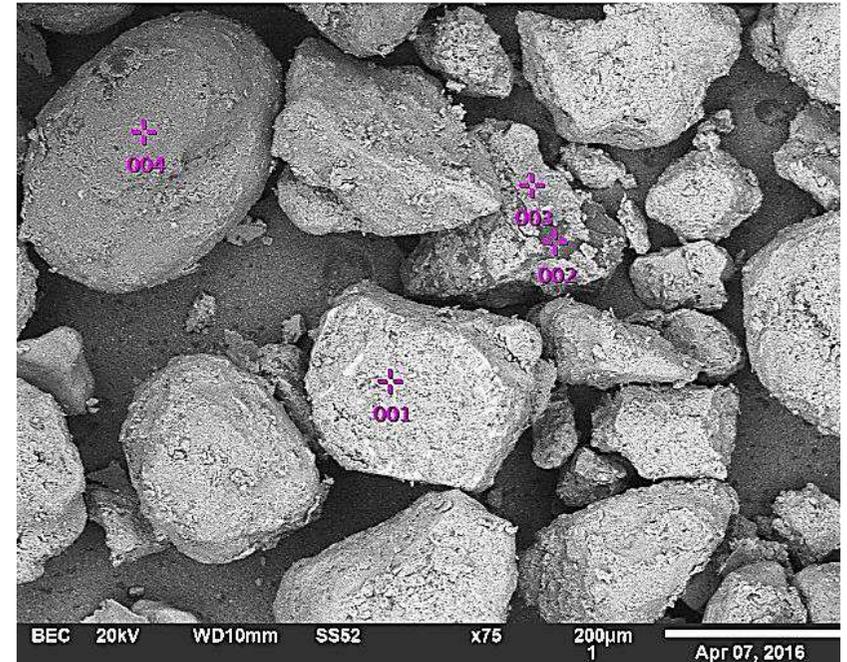
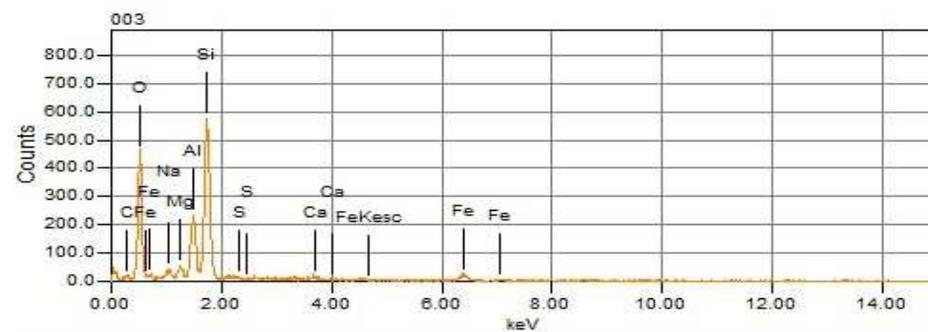
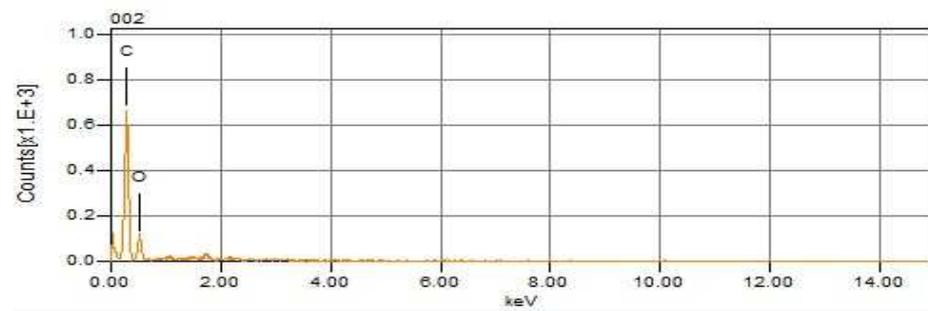
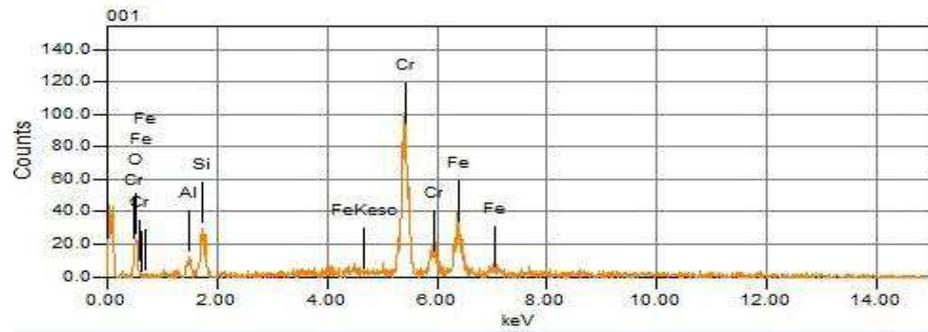
Figura 4.27 - Resultado 1 do sistema EDS para ADF E0 e conjunto de espectros





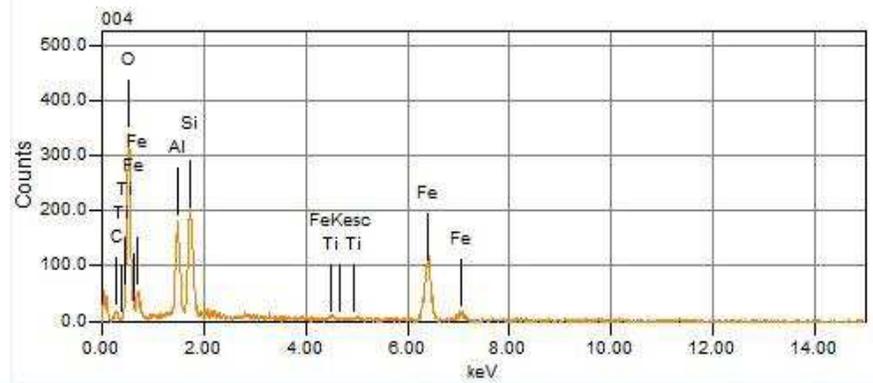
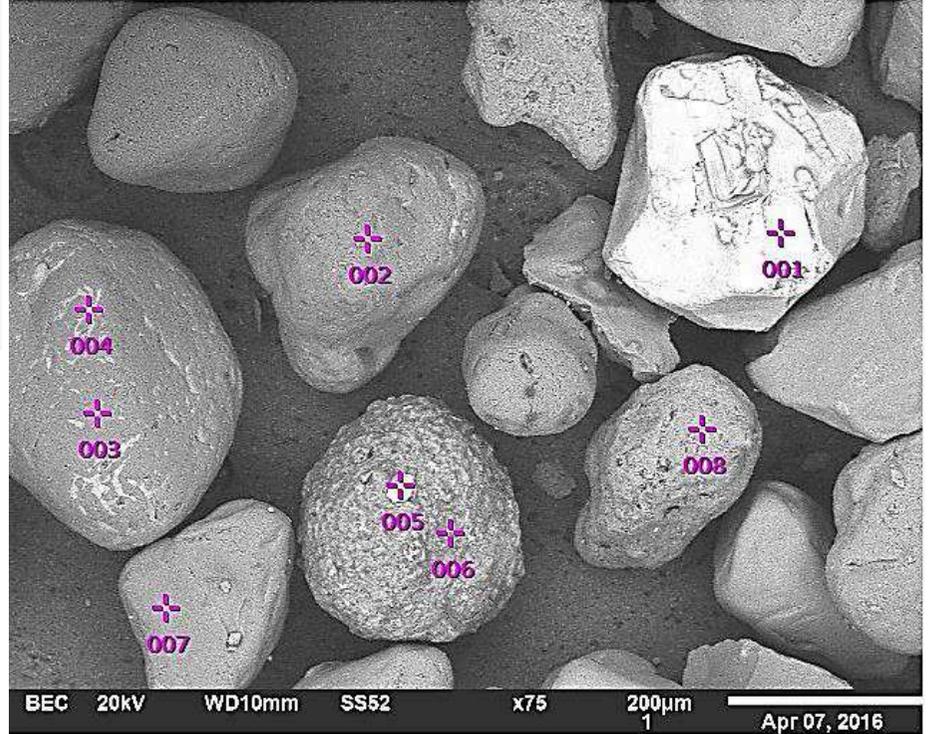
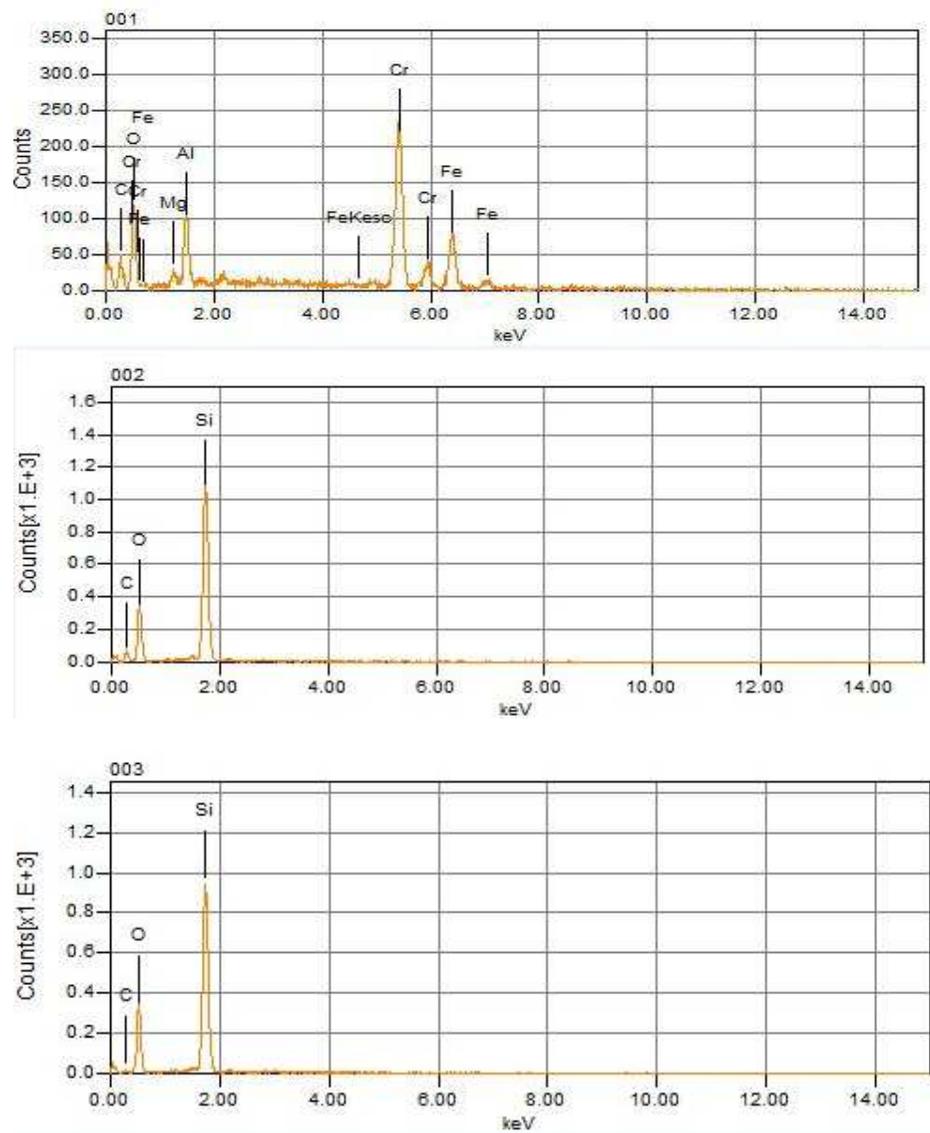
Fonte: Autor

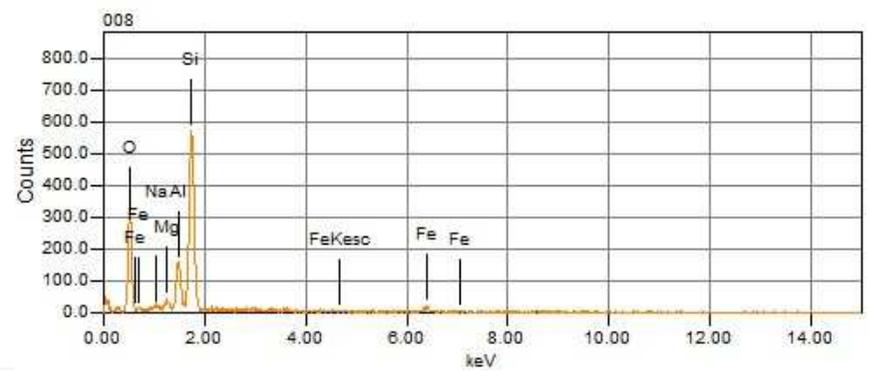
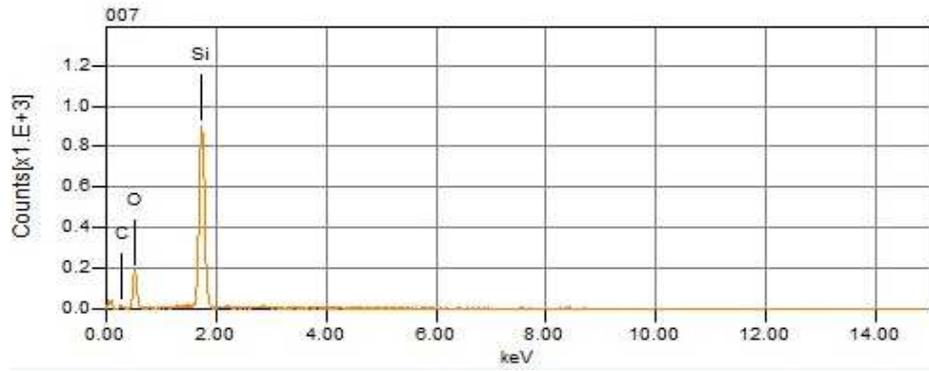
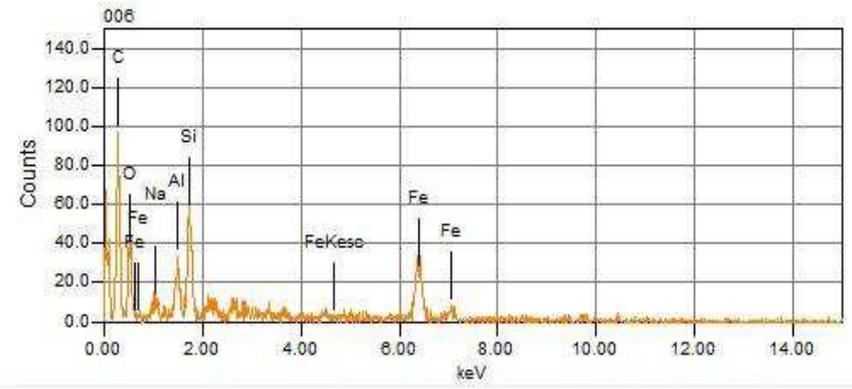
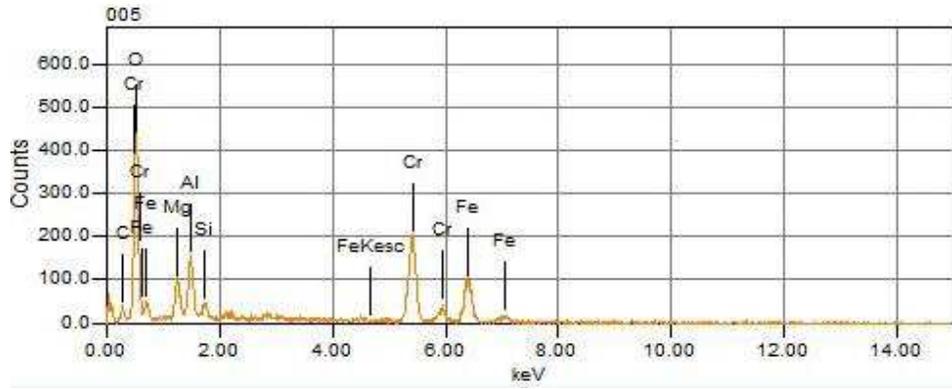
Figura 4.28 - Resultado 2 do sistema EDS para ADF E0 e conjunto de espectros



Fonte: Autor

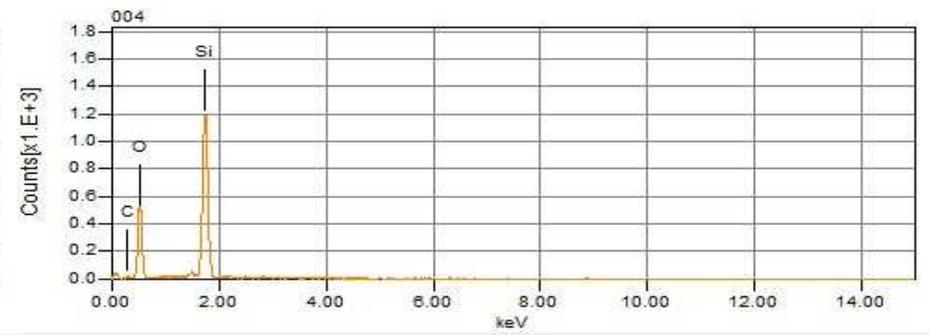
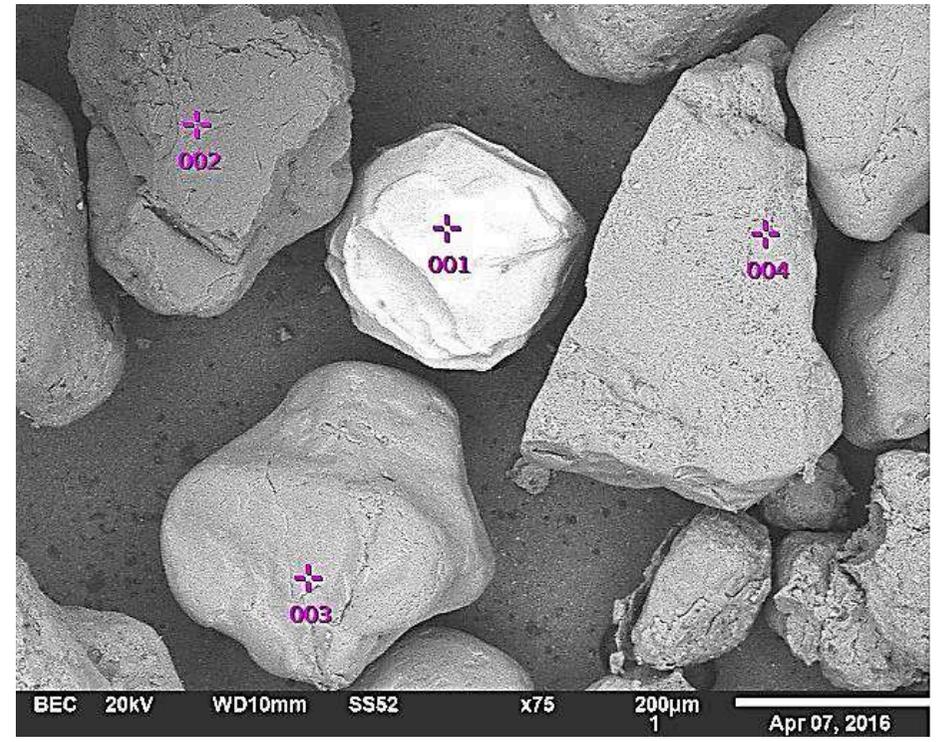
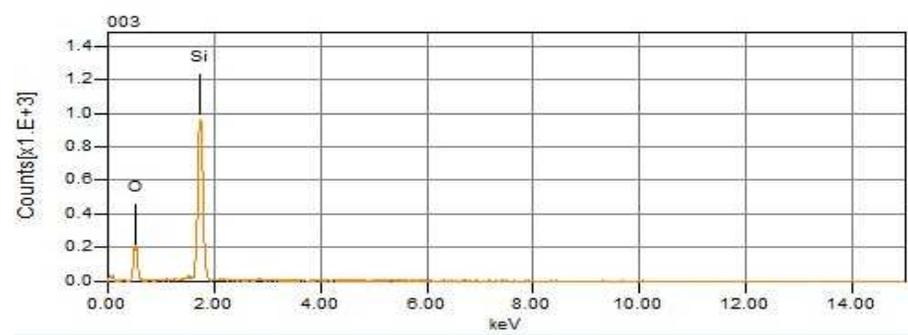
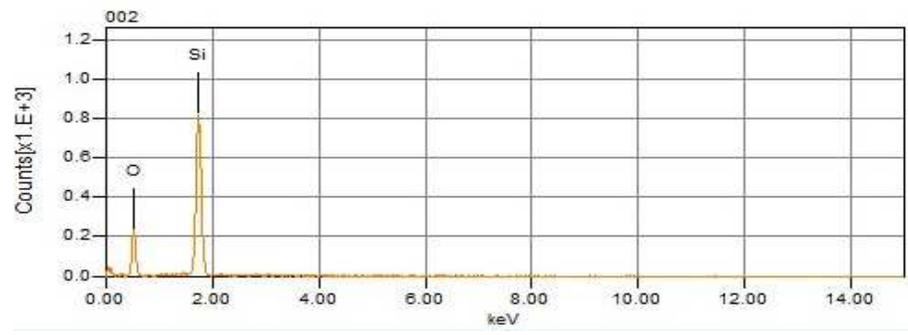
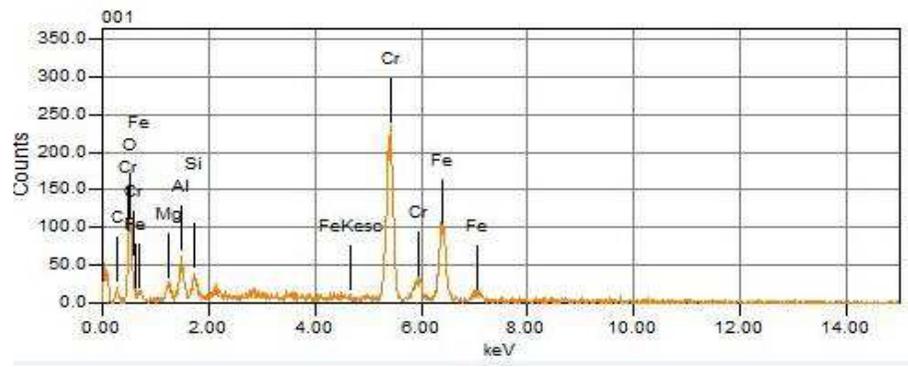
Figura 4.29 - Resultado 1 do sistema EDS para ADF FUC e conjunto de espectros





Fonte: Autor

Figura 4.30 - Resultado 2 do sistema EDS para ADF FUC e conjunto de espectros



Fonte: Autor

Também no LAMIR-UFPR foram realizadas Análise de Difração Raio X e Análise por Fluorescência de Raio X. Os aparelhos utilizados estão apresentados nas Figura 4.31.

Figura 4.31 – Aparelhos de Difração de Raio X (esquerda) e Fluorescência de Raio X (direita)

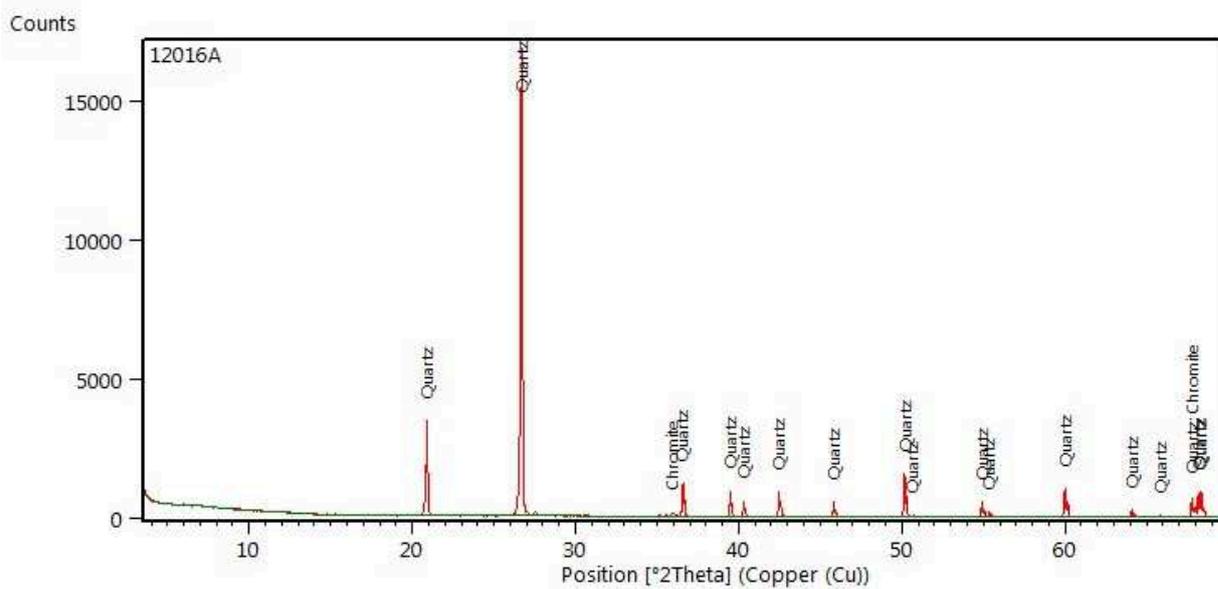


Fonte: Autor

A análise mineralógica por Difração de Raio X tem como objetivo identificar as fases dos minerais da amostra estudada. Nesse caso constatou-se através dos difratogramas de ambos os materiais a presença de quartzo e cromita, como mostram as Figuras 4.32 e 4.33.

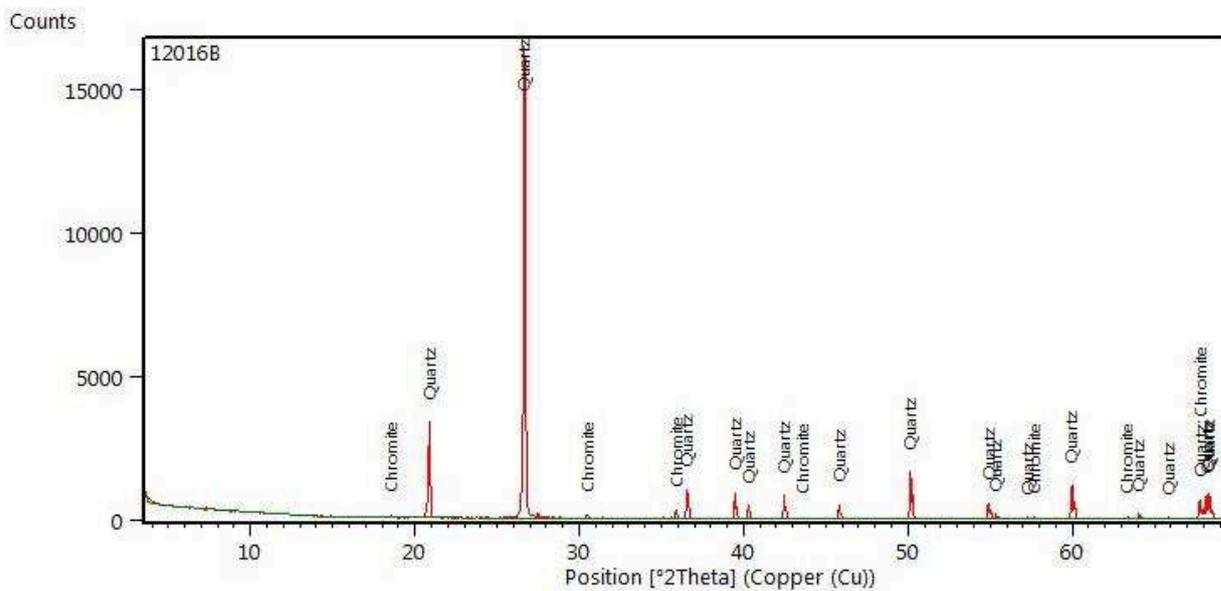
Nos resultados do ensaio de Fluorescência de Raio X (Tabela 4.4), foi constatado um elevado teor de SiO_2 na composição das ADF, devido ao material ser formulado basicamente por areia, como mostrou a Tabela 2.1. Também foi observado que a perda ao fogo se apresentou relativamente superior na ADF E0, comparada a ADF FUC.

Figura 4.32 - Análise mineralógica DRX da ADF E0



Fonte: Autor

Figura 4.33 - Análise mineralógica DRX da ADF FUC



Fonte: Autor

Tabela 4.4 – Análise elementar por Fluorescência de Raio X

	ADF E0	ADF FUC
SiO₂ (%)	88,2	91,5
Al₂O₃ (%)	3,8	2,4
Fe₂O₃ (%)	1,6	1,8
Cr₂O₃ (%)	0,9	2,1
MgO (%)	0,5	0,3
K₂O (%)	0,5	0,4
Na₂O (%)	0,5	0,2
SO₃ (%)	0,3	0,1
TiO₂ (%)	0,3	0,2
CaO (%)	0,2	0,1
Cl (%)	0,1	-
MnO (%)	-	-
SrO (%)	-	-
P₂O₅ (%)	< 0,1	< 0,1
ZrO₂ (%)	< 0,1	< 0,1
Perda ao Fogo (%)	3,09	0,93

Fonte: Autor

Para realizar o ensaio de adesividade, foi misturado aproximadamente 1,45g de ADF em 17,5g de ligante asfáltico. Essa quantidade é proporcional a quantidade de ADF a ser substituída nas misturas asfálticas, que corresponde a aproximadamente 8,3% do peso total. O objetivo desse ensaio é analisar se a ADF contribui, ou não, na melhora da adesividade do betume com a brita.

Os resultados dos ensaios de adesividade com as ADF se mostraram ruins, já que houve o desprendimento das películas de ligante asfáltico, como mostra a Figura 4.34. Esse resultado já era esperado após a análise dos resultados obtidos pelo EDS do MEV, e os resultados de Fluorescência e Difração de Raio X, onde se constatou uma predominância de SiO₂ em sua composição, resultando em um problema de adesividade semelhante ao encontrado no agregado granítico.

Um ponto importante a ser ressaltado é que nessa pesquisa não foi utilizado aditivos ou adições para corrigir esses problemas referentes à adesividade. A utilização desses tipos de materiais poderia levar a resultados que não condizentes com a real influência que a ADF exerce sobre o comportamento mecânico de misturas asfálticas convencionais.

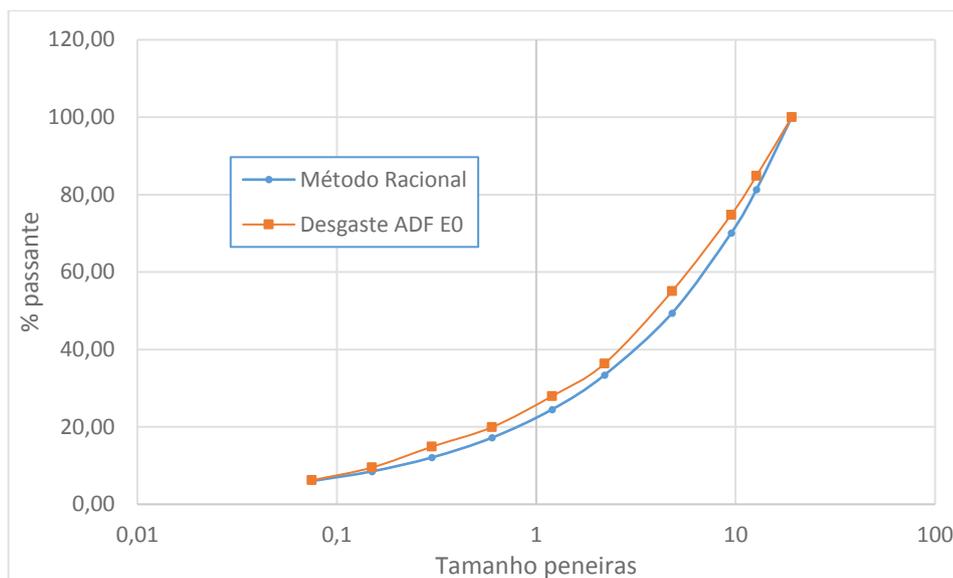
Figura 4.34 - Resultado da adesividade com ADF FUC e ADF E0



Fonte: Autor

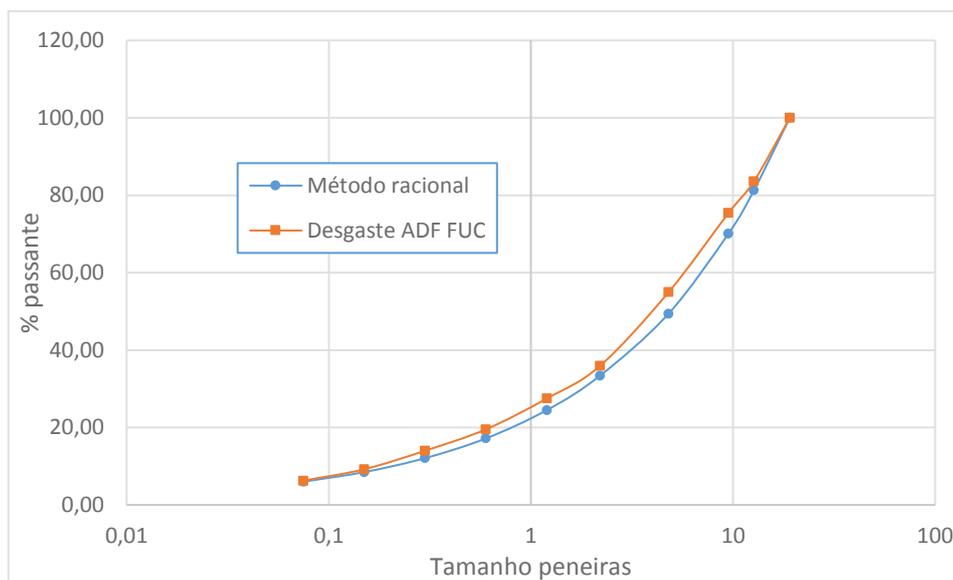
Também foram realizados o ensaio ID_M com os mesmos procedimentos realizados para esqueletos minerais compostos exclusivamente por britas. Após os 50 golpes em cada face, observou que as novas curvas granulométricas dos esqueletos minerais compostos também resultaram em uma redução no tamanho das partículas, assim como foi observada para o agregado pétreo. Entretanto, não houve o acúmulo de finos, como foi constatado na brita, podendo ser um indício de pouca friabilidade dos minerais que compõem as areias.

Figura 4.35 - Ensaio IDm da ADF E0



Fonte: Autor

Figura 4.36 - Ensaio IDm da ADF FUC



Fonte: Autor

4.3 LIGANTE ASFÁLTICO

O ligante asfáltico utilizado nesse trabalho é o CAP 50/70 proveniente da Refinaria Presidente Getúlio Vargas (REPAR) da empresa Petrobrás, localizada na cidade de Araucária/PR. Búrigo (2015) realizou alguns ensaios de caracterização da

mesma amostra de betume que foi utilizado para esta pesquisa, portanto todos os resultados referentes a caracterização do ligante betuminoso foi extraído de seu trabalho.

A Tabela 4.5 apresenta, de forma resumida, os resultados dos principais ensaios de caracterização do CAP 50/70 utilizado, suas respectivas normas e limites comparativos, quando estabelecido pela norma em vigor.

Tabela 4.5 - Resultados dos ensaios de caracterização do ligante asfáltico

Ensaio	Métodos de Ensaio	Resultados	Limites normativos
Penetração (0,1 mm)	DNIT-ME 155/2010	67,0	50 a 70
Ponto de Amolecimento Anel e Bola (°C)	DNIT-ME 131/2010	50°C	Maior que 46°C
Massa Específica Real (g^o/cm³)	ABNT NBR 6296/2004	1,003g/cm ³	-

Fonte: Búrigo (2015, p. 25)

A partir dos resultados do Ensaio de Penetração e do Ponto de Amolecimento Anel e Bola, é possível determinar o Índice de Suscetibilidade Térmica, também conhecido como Índice de Pfeiffer e Van Doormaal (IP) e está representado pela Equação 4.1 a seguir:

$$IP = \frac{500.\log(P)+20.PA-1951}{120-50.\log(P)+PA} \quad (4.1)$$

onde:

IP : Índice de Pfeiffer e Van Doormaal;

PA: Ponto de amolecimento do CAP (°C), obtido pelo ensaio do anel e bola;

P: Penetração do cimento asfáltico de petróleo (CAP) a 25°C (escala 0,1mm).

O ligante asfáltico utilizado nessa pesquisa possui um Índice de Suscetibilidade Térmica de -0,6. Esse índice varia entre -1,5 a +0,7, onde quanto mais próximo do limite máximo, mais oxidado está o ligante, logo pouco sensíveis a elevadas temperaturas e quebradiços em baixas temperaturas. Quando esse índice

se encontra próximo ao limite mínimo, indica que o ligante é muito suscetível a variação térmica, o que também não é desejável (BERNUCCI *et al.*, 2008).

De acordo com Búrigo (2015), o CAP 50/70 utilizado em seu trabalho apresentou uma baixa consistência e uma alta suscetibilidade térmica, já que no Ensaio de Penetração seu resultado chegou próximo ao limite máximo e no Ponto de Amolecimento Anel e Bola o escoamento do ligante se deu próximo a temperatura mínima estabelecida pela norma. Portanto, esses fatores combinados podem resultar em um comportamento mecânico precário em campo, podendo acarretar em grandes fluências do pavimento ao receber o carregamento do tráfego, podendo resultar em trilhas de rodas.

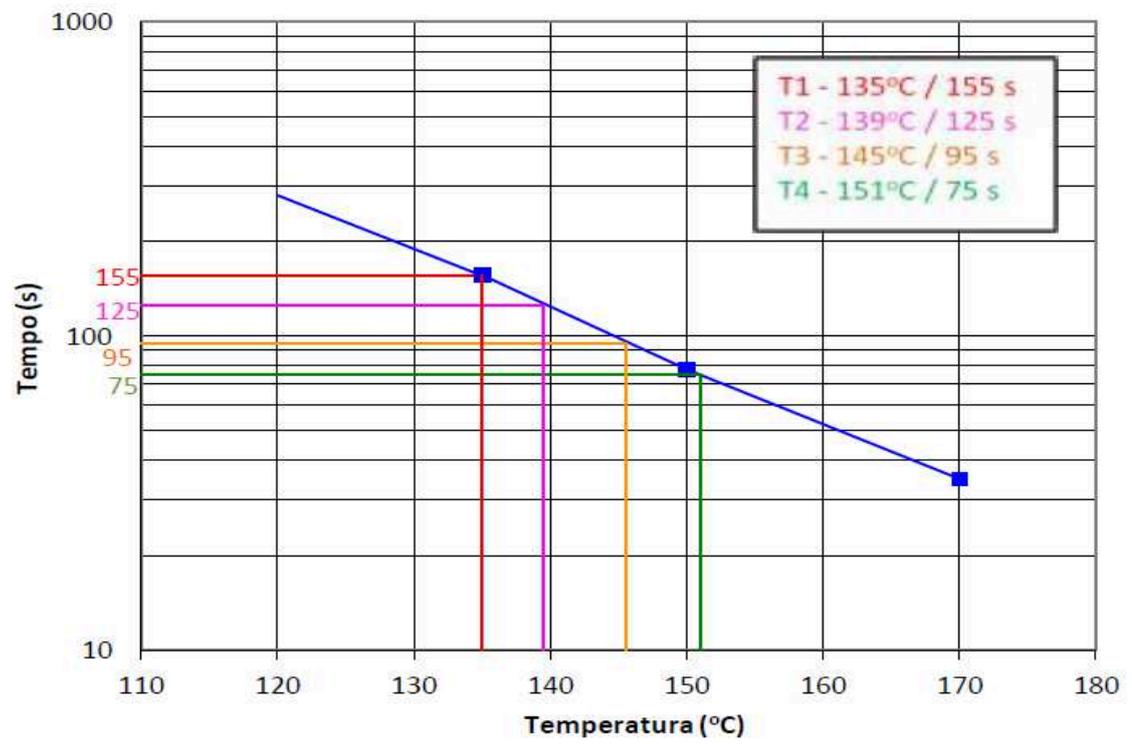
O Ensaio de Viscosidade é realizado através do viscosímetro Saybolt-Furol, e é regido pela norma (DNER-ME 004/1994) e possui como objetivo determinar uma curva de viscosidade, de onde é possível extrair informações, referentes à temperatura de usinagem e de compactação dos ligantes asfálticos. A curva de viscosidade está representada na Figura 4.37.

Logo a temperatura de usinagem do CAP 50/70 utilizado neste trabalho se encontra entre 145°C à 151°C, e a temperatura de compactação está no intervalo entre 135°C à 139°C.

De acordo com Bernucci *et al.* (2008), a importância de se realizar a curva de viscosidade é definir a temperatura na qual o ligante asfáltico possuirá a consistência adequada para cobrir suficientemente os agregados durante a mistura e também durante a aplicação em campo.

Antes de realizar a mistura asfáltica, é necessário que a temperatura do agregado pétreo esteja em torno de 10°C a 15°C acima da temperatura de usinagem do ligante asfáltico.

Figura 4.37 - Curva de Viscosidade



Fonte: Búrigo (2015, p.28)

5 ENSAIOS LABORATORIAIS

Este capítulo aborda os ensaios laboratoriais realizados para avaliar o comportamento mecânico das misturas asfálticas produzidas nesse estudo. Foram realizados três ensaios: Marshall, Resistência à Tração Indireta e Lottman Modificado.

5.1 ENSAIO MARSHALL

O ensaio Marshall (ABNT NBR 15785/2010) é o método adotado oficialmente no Brasil para estabelecer o teor ótimo do cimento asfáltico de petróleo (CAP) a ser empregado em misturas asfálticas.

Os corpos de provas utilizados nesse ensaio são cilíndricos e são moldados através da compactação por impacto de um soquete Marshall, que possui seu peso e altura de queda definidos pela norma.

Para esse estudo, foram fixados previamente cinco teores de ligante asfáltico, que são: 4,22%, 4,54%, 4,86%, 5,18% e 5,5%. Esses valores foram definidos baseado no trabalho de Barra (2009). Para a realização das misturas asfálticas, os esqueletos minerais formulados para compor cada corpo de prova foram separados em 2 recipientes diferentes: parte mais graúda (passante na peneira de abertura 19,10mm e retida na peneira 2,2mm) e parte mais miúda (passante na peneira 2,2mm até o recipiente de fundo), como mostra a Figura 5.1.

Figura 5.1 - Fração graúda (esquerda) e miúda (direita) do esqueleto mineral da ADF E0



Fonte: Autor

Antes de iniciar a mistura, o ligante asfáltico é aquecido até a sua temperatura de usinagem (150°C), definido na seção 4.3, e o agregado à 163°C (13°C acima da temperatura de usinagem do CAP). É importante ressaltar que deve ser feito também o aquecimento dos materiais que serão utilizados para executar a mistura, como as espátulas e recipiente metálico.

Inicialmente é misturado a parte graúda do esqueleto mineral com a quantidade total de CAP previsto para aquela mistura. Após todos os agregados graúdos se apresentarem bem envolvidos, é misturado a parte miúda, como mostra a Figura 5.2.

A divisão do esqueleto mineral durante a mistura é realizada visando um melhor envolvimento da película de CAP em todos os agregados. Devido à alta superfície de contato dos granulares finos, essas frações tendem a absorver mais os ligantes asfálticos, podendo gerar películas envoltórias precárias de betume sobre os agregados graúdos, caso fossem misturados juntos.

Em seguida, a mistura e os moldes metálicos utilizados na compactação são condicionados a temperatura de compactação (138°C) na estufa.

Figura 5.2 - Realização das misturas asfálticas



Fonte: Autor

Após a mistura alcançar a temperatura de compactação, o molde aquecido é encaixado na base do aparelho Marshall e é inserido um papel-filme para evitar a perda de parte da mistura devido a agregação do material betuminoso à base do aparelho. A mistura asfáltica é então inserida no molde e são realizados 25 espatuladas (10 nas bordas e 15 no centro), conforme estabelece a norma, visando uma pré-compactação e nivelando o máximo possível a mistura. Após o nivelamento é inserido um papel-filtro no topo da mistura, afim de não haver perdas do material devido ao contato com o soquete.

Figura 5.3 - Soquete automático Marshall



Fonte: Autor

A compactação dos corpos de prova se dá através do impacto do soquete, onde são realizados 75 golpes em cada face, resultando em 150 golpes no total por corpo de prova. Para a execução da compactação, foi utilizado um soquete automático (Figura 5.3), fornecendo uma variação mínima na velocidade e energia de compactação, visando assim, compactar todos os corpos de prova de maneira mais uniforme possível.

A desmoldagem dos corpos de prova nesse trabalho se deu com o auxílio de um suporte, onde em sua superfície há um orifício de diâmetro semelhante ao do interno do molde cilíndrico, onde é encaixado o molde com o corpo de prova a ser extraído. A retirada do corpo de prova moldado se dá através de golpes manuais com o mesmo soquete Marshall utilizado na compactação (Figura 5.4), até a extração total do corpo de prova do molde cilíndrico metálico. Nessa etapa é importante providenciar uma superfície fofa para amortecer a queda do corpo de prova após o mesmo ser extraído, evitando assim um possível dano devido ao impacto da queda do corpo de prova na base rígida do suporte.

Figura 5.4 - Extração do corpo de prova



Fonte: Autor

Para cada tipo de mistura asfáltica estudada, foram elaborados cinco corpos de prova para cada um dos cinco teores de betume mencionados no início dessa seção, visando obter dados mais representativos, totalizando 25 corpos de prova por

mistura asfáltica. Nesse trabalho foram comparados três tipos de misturas asfálticas, resultando em um total de 75 corpos de prova, como mostra a Figura 5.5.

Figura 5.5 - Corpos de prova Marshall



Fonte: Autor

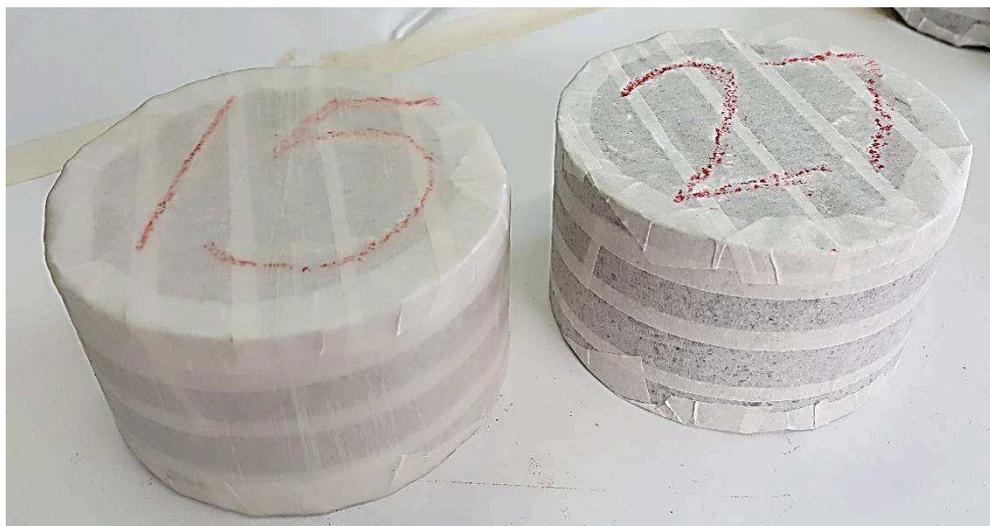
Com os corpos de prova moldados, foram realizadas as pesagens e a medição, com paquímetro, das alturas em 3 pontos diferentes de cada corpo de prova (Figura 5.6). Em seguida, todos os corpos de prova foram envolvidos completamente por fita-crepe e pesados, para então receberem uma camada de parafina (Figura 5.7), objetivando a impermeabilização dos corpos de provas e, com isso, manterem seus vazios internos protegidos da água, durante a pesagem hidrostática (Figura 5.8).

Figura 5.6 - Medição das alturas com paquímetro



Fonte: Autor

Figura 5.7 - Corpo de prova parafinado (esquerda) e antes de receber a parafina (direita)



Fonte: Autor

Figura 5.8 – Pesagem a seco (esquerda) e pesagem hidrostática (direita)



Fonte: Autor

Com os valores obtidos através das medições e pesagens, São obtidos parâmetros para auxiliar na determinação o teor ótimo de ligante, a saber: densidade aparente, teor de vazios (%V), vazios do agregado mineral (VAM), vazio cheio de betume (VCB), relação betume/vazio (RBV).

O cálculo da massa específica real é obtida pela Equação 5.1.

$$D_{real} = \frac{100}{\frac{\%P_1}{d_{graúdo}} + \frac{\%P_2}{d_{miúdo}} + \frac{\%L}{d_{ligante}}} \quad (5.1)$$

onde:

D_{real} = massa específico real da mistura;

$\%P_1$ = porcentagem retido na peneira de abertura 12,7mm e retido na 4,8mm;

$\%P_1$ = porcentagem retido na peneira de abertura 2,2mm até o recipiente de fundo;

$\%L$ = Teor de ligante asfáltico utilizado;

$d_{graúdo}$ = massa específica real do agregado graúdo;

$d_{miúdo}$ = massa específica real do agregado miúdo;

$d_{ligante}$ = massa específica real do ligante asfáltico.

O cálculo da densidade aparente adotado nesse trabalho consiste na pesagem hidrostática, normatizado pelo documento (DNER-ME 117/1994). Os corpos de prova foram revestidos com fita crepe e posteriormente envoltos em parafina (Figura 5.7), objetivando a impermeabilização dos corpos de prova e evitando assim, o preenchimento dos vazios internos dos corpos de provas com água durante a pesagem hidrostática.

A densidade aparente é dada pela Equação 5.2.

$$D_{aparente} = \frac{m_a}{(m_p - m_i) - \left(\frac{m_p - m_a}{d_p}\right)} \quad (5.2)$$

onde:

$D_{aparente}$ = densidade aparente;

m_a = massa da amostra no ar;

m_p = massa da amostra parafinada no ar;

m_i = massa da amostra parafinada imersa;

d_p = densidade da parafina

O teor de vazio consiste na relação entre o volume de vazios e o volume total da mistura asfáltica, em função das densidades real e aparente. É definida pela Equação 5.3.

$$V(\%) = \frac{D_{real} - D_{aparente}}{D_{real}} * 100 \quad (5.3)$$

onde:

$V(\%)$ = teor de vazios;

D_{real} = massa específica real do corpo de prova;

$D_{aparente}$ = massa específica aparente do corpo de prova;

O vazio cheio de betume (VCB) é expresso pela Equação 5.4.

$$VCB(\%) = \frac{D_{aparente} * \%L}{d_{ligante}} \quad (5.4)$$

onde:

$VCB(\%)$ = vazio cheio de betume;

$D_{aparente}$ = densidade aparente;

$\%L$ = teor de ligante;

$d_{ligante}$ = densidade do ligante.

O vazio do agregado mineral (VAM) indica o que não é agregado na mistura, representando assim, os vazios preenchidos com ar e com betume. É determinado pela Equação 5.5.

$$VAM(\%) = V + VCB \quad (5.5)$$

onde:

$VAM(\%)$ = vazio do agregado mineral;

V = porcentagem de vazios;

VCB = vazios cheio de betume.

A relação betume/vazio (RBV) é a relação entre vazios cheio de betume e o vazio do agregado mineral, como mostra a Equação 5.6.

$$RBV(\%) = \frac{VCB}{VAM} * 100 \quad (5.6)$$

onde:

RBV(%)= relação betume/vazios;

VCB = vazios cheio de betume;

VAM = vazios do agregado mineral.

Após obtenção de todos esses dados são retirados a parafina e a fita-crepe dos corpos de prova. É iniciado o condicionamento dos corpos de provas para o rompimento do ensaio Marshall. De acordo com a NBR 15785/2010, os corpos de prova são submetidos a um banho-maria a 60°C por 30 minutos e em seguida o corpo de prova é levado à prensa Marshall.

A prensa Marshall utilizada nesse ensaio consiste em um pistão hidráulico que avança a uma velocidade constante. As leituras da carga e do deslocamento durante o ensaio são realizadas através de uma célula de carga com capacidade de 10.000kN e um extensômetro, respectivamente. Um aquisitor de dados recebe os sinais que os instrumentos de medição enviam e transformam esses pulsos em dados que são apresentados no computador, onde através de um software é possível registrar os dados de estabilidade e fluência da mistura asfáltica.

Na prensa Marshall, previamente calibrada, o corpo de prova é posicionado no molde de compressão (placa de ruptura) e ele sofre uma única e gradual compressão diametral até sua ruptura. A tensão máxima resistida e o deslocamento sofrido pelo corpo de prova até sua ruptura é a sua estabilidade e fluência, respectivamente. Os resultados desse ensaio estão representados em gráficos na seção 6.1.

Figura 5.9 - Prensa Marshall



Fonte: Autor

Figura 5.10 - Corpo de prova antes (esquerda) e depois (direita) da ruptura



Fonte: Autor

Apesar desse ensaio ser altamente difundido no país, devido ao fato dele ser preconizado pelo DNIT e órgãos estaduais, há uma certa crítica em relação a esse ensaio. A primeira condiz a compactação dos corpos de prova por impacto, e não por esmagamento, como ocorre em campo. A compactação rigorosa e agressiva que é utilizada nessa metodologia resulta na quebra de granulares, e conseqüentemente na alteração da curva granulometria das misturas asfálticas, como foram mostradas nos ensaios IDM nas Figura 4.17, Figura 4.35 e Figura 4.36.

Essa alteração da distribuição granulométrica pode influenciar no comportamento mecânico das misturas asfálticas, como será discutida no final da seção 6.3.

Uma outra crítica desse, e também dos outros ensaios executados nesse trabalho, se dá pelo método de ruptura, que não condiz com as solicitações observadas em campo. Os ensaios Marshall, Resistência à Tração Indireta (RTI) e Lottman Modificado levam as misturas asfálticas à ruptura através de um único carregamento gradual. Enquanto em estruturas reais as cargas solicitantes são dinâmicas, tem seus tempos de carregamentos geralmente curtos e sua ruptura frequentemente se dá pela fadiga.

5.2 ENSAIO DE TRAÇÃO INDIRETA

O Ensaio de Tração Indireta possui suas especificações descritas na ABNT NBR 15087/2012. Os corpos de prova utilizados nesse ensaio são semelhantes ao do ensaio Marshall.

Entretanto, o que diferencia esse ensaio do anterior é a ausência do condicionamento prévio dos corpos de prova na água a 60°C antes da ruptura, e o molde utilizado na ruptura contem frisos, diferente do utilizado no Ensaio Marshall (molde para tração indireta ou pórtico de Lottman).

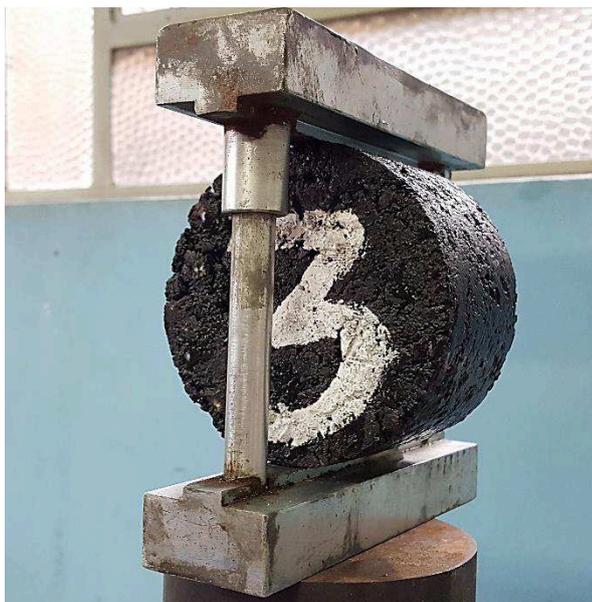
A resistência à tração indireta é calculada pela Equação 5.8.

$$\sigma_R = \frac{2F}{100\pi DH} \quad (5.8)$$

onde:

- σ_R = resistência à tração, em MPa;
- F = carga de ruptura, em N;
- D = diâmetro do corpo de prova, em cm;
- H = altura do corpo de prova, em cm.

Figura 5.11 - Molde para tração indireta



Fonte: Autor

Figura 5.12 – Corpo de prova rompido pelo Ensaio de Tração Indireta



Fonte: Autor

5.3 ENSAIO LOTTMAN MODIFICADO

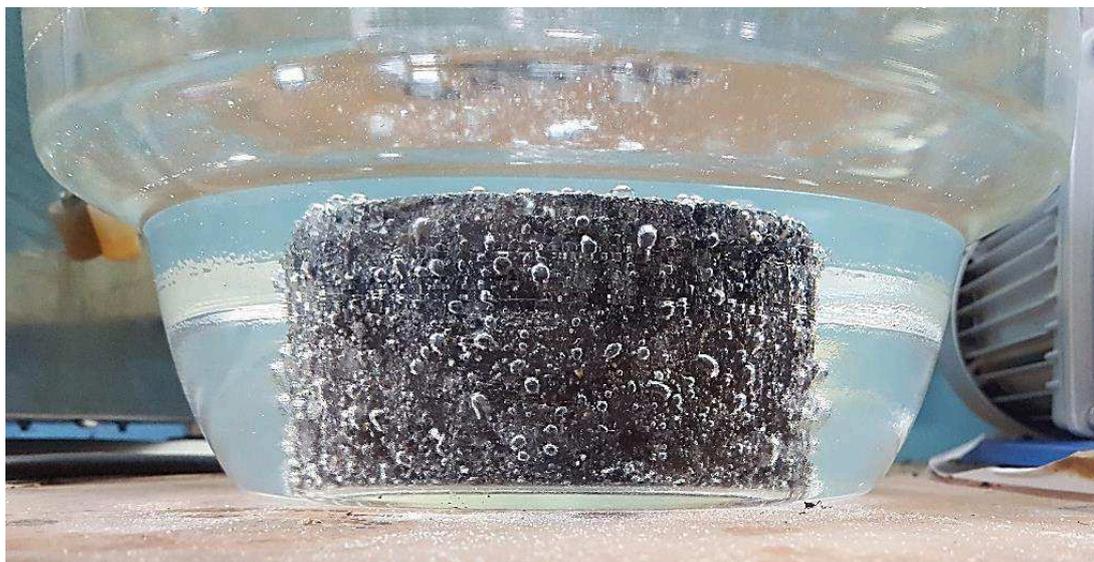
O ensaio Lottman Modificado verifica a perda da resistência à tração indireta após um processo de umidade induzida sofrido pelos corpos de provas, e seus procedimentos são descritos na norma AASHTO T-283/1989. Os corpos de prova

utilizados para este ensaio são moldados de modo semelhante aos dos ensaios anteriores, porém com número de golpes reduzido, visando atingir $7,0 \pm 1\%$ de volumes de vazios.

Nesse ensaio os corpos de prova são separados em dois grupos. O primeiro grupo passa por um rigoroso processo de condicionamento, enquanto o segundo grupo não são condicionados, ou seja, são mantidos a temperatura de 25°C até o momento de sua ruptura.

O condicionamento inicia-se com a saturação dos corpos de prova, através de sua imersão em um dessecador com água e, em seguida, é aplicada uma pressão de vácuo para a indução da saturação dos corpos de prova. Após um determinado período sob o vácuo (nesse estudo foram aproximadamente 30 segundos) é conferido através da pesagem, se 55% a 80% do volume dos vazios interno do corpo de prova foram saturados (Figura 5.13).

Figura 5.13 - Saturação do corpo de prova no dessecador



Fonte: Autor

Em seguida os corpos de prova saturados são alocados e vedados em um saco plástico, com o objetivo de manter a umidade estabelecida durante o condicionamento. A primeira etapa do condicionamento ocorre a uma temperatura aproximada de -18°C durante 16 horas. Em seguida, os corpos de prova ainda dentro dos sacos, são submetidos a um banho-maria a 60°C , por 24 horas.

No primeiro momento do condicionamento à temperatura negativa, a água aprisionada nos vazios dos corpos de prova congela, gerando tensões internas devido à expansão anômala da água, favorecendo a aparições de trincas internas.

Em seguida, no condicionamento dos corpos de prova a 60°C, ocorre o degelo, fazendo com que a água, agora líquida, preencha as novas trincas internas geradas.

Figura 5.14 - Vedação dos corpos de prova



Fonte: Autor

Figura 5.15- Condicionamento no freezer dos corpos de prova



Fonte: Autor

Figura 5.16 - Condicionamento na estufa dos corpos de prova



Fonte: Autor

Após o condicionamento rigoroso, os corpos de provas são novamente submetidos a outro banho-maria, porém dessa vez, a 25°C e sua duração é de 1 hora. Em seguida, ocorre a ruptura por tração indireta (compressão diametral), semelhante ao realizado no ensaio descrito da seção 5.2. Os resultados obtidos desses corpos de prova são calculados pela Equação 5.8 e são comparados com os corpos de provas não condicionados.

É realizada uma comparação dos resultados obtidos para os corpos de prova condicionado e não condicionado, visando observar a perda de resistência à tração indireta devido a umidade induzida. De acordo com Hicks (1991), são consideradas satisfatórias as misturas asfálticas que obtiveram a relação entre a resistência a tração indireta dos corpos de prova condicionados com os não condicionados, superiores a 70%. Ou seja, misturas asfálticas que a perda da resistência ocorrida pelo dano induzido pela umidade seja de, no máximo, 30%.

$$R = \frac{\sigma_C}{\sigma_{NC}} \quad (5.9)$$

onde:

R = relação entre σ_C e σ_{NC} . Expresso em valores entre 0 e 1.

σ_C = Resistência à tração indireta dos corpos de prova condicionados

σ_{NC} = Resistência à tração indireta dos corpos de prova não condicionados

6 RESULTADOS DOS ENSAIOS LABORATÓRIAS

6.1 ENSAIO MARSHALL

Os parâmetros das misturas asfálticas do ensaio Marshall, como densidade aparente, teor de vazios (V%), vazios cheios de betume (VCB), vazio do agregado mineral (VAM) e relação betume/vazio (RBV) são obtidos através de medições das dimensões e pesagens a seco e hidrostático dos corpos de provas cilíndricos.

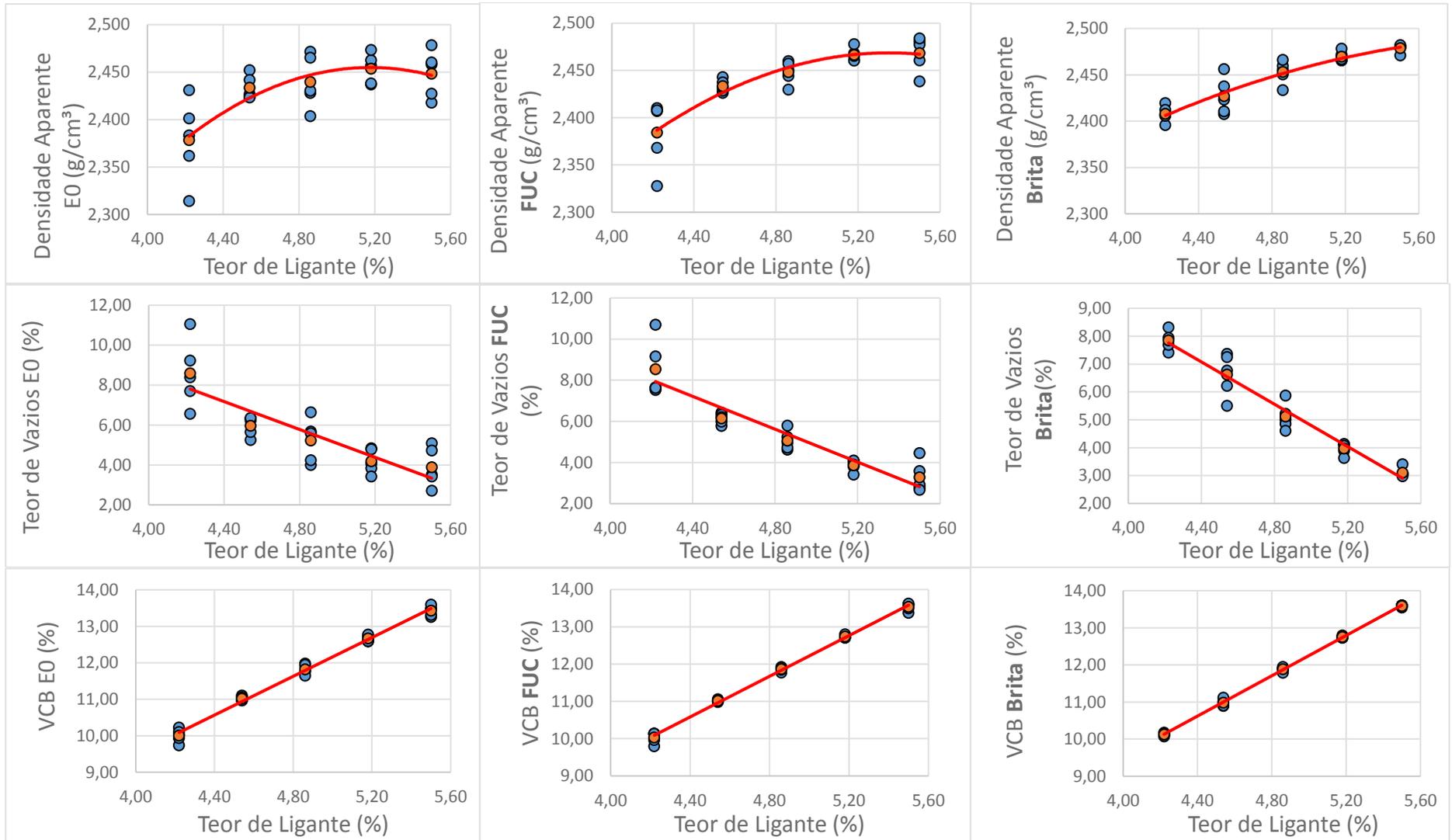
Através da ruptura dos corpos de prova por compressão diametral, obtêm-se os parâmetros de estabilidade e fluência. Os resultados dos 3 tipos de misturas asfálticas produzidas nesta pesquisa (convencional, com ADF E0 e ADF FUC) estão apresentados nas Figuras 6.1 à Figura 6.3, e os resultados médios na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 - Resumo dos valores médios obtidos pelo Ensaio Marshall

Misturas asfálticas	Parâmetros							
	Teor de Betume (%)	Estabilidade (kgf)	Fluência (mm)	Dap (g/cm ³)	Volume de Vazios (%)	VCB (%)	VAM (%)	RBV
E0	4,22	1295	2,18	2,378	8,58	10,01	18,59	54,17
	4,54	1424	2,18	2,434	5,96	11,02	16,97	64,94
	4,86	1651	2,58	2,440	5,22	11,82	17,04	69,58
	5,18	1483	2,23	2,454	4,18	12,67	16,85	75,26
	5,5	1411	2,62	2,448	3,89	13,43	17,31	77,73
FUC	4,22	1613	2,75	2,384	8,54	10,03	18,57	54,25
	4,54	1580	2,8	2,433	6,15	11,01	17,16	64,19
	4,86	2144	2,17	2,448	5,07	11,86	16,94	70,09
	5,18	2056	2,85	2,466	3,86	12,74	16,60	76,75
	5,5	1605	3,14	2,468	3,29	13,53	16,82	80,56
Brita	4,22	2076	2,4	2,408	7,85	10,13	17,98	56,36
	4,54	2004	2,72	2,427	6,62	10,99	17,60	62,49
	4,86	2261	2,82	2,453	5,11	11,89	17,00	69,96
	5,18	2114	3,02	2,470	3,97	12,75	16,72	76,28
	5,5	2001	2,74	2,479	3,10	13,59	16,70	81,41
DNIT-ES 031/2006		min. 500	-	-	3,0 a 5,0	-	min. 16	75 a 82

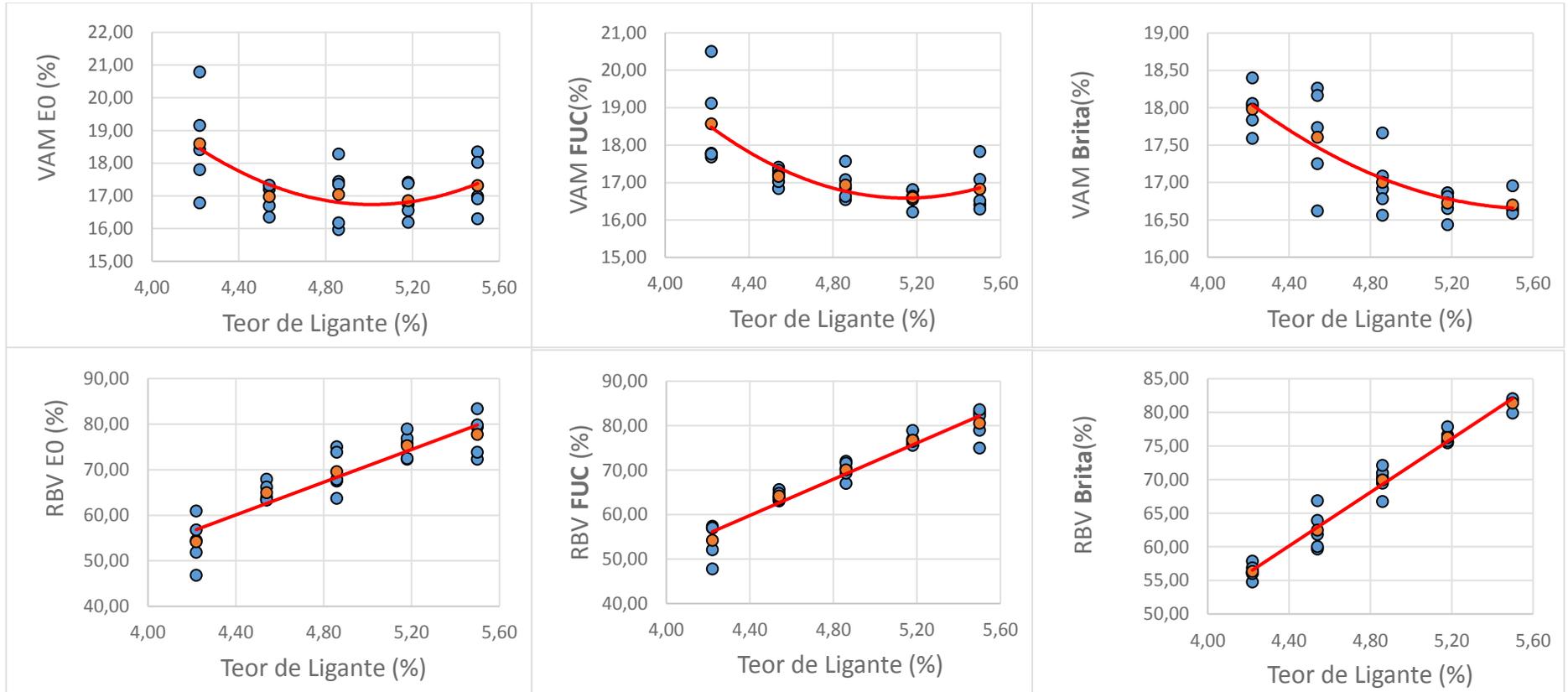
Fonte: Autor

Figura 6.1- Densidade Aparente, Teor de Vazios e VCB



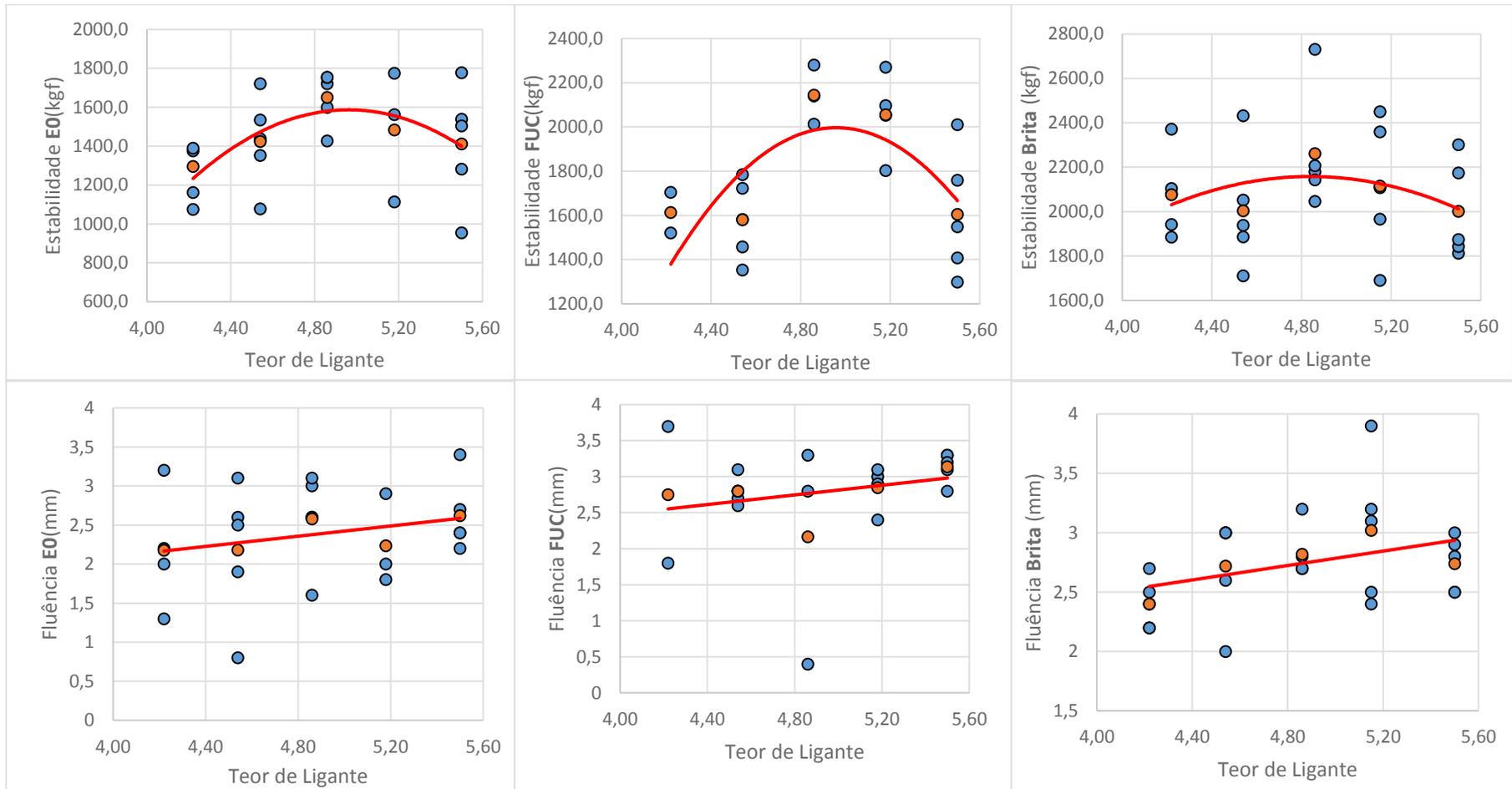
Fonte: Autor

Figura 6.2 – VAM e RBV



Fonte: Autor

Figura 6.3 – Estabilidade e Fluência



Fonte: Autor

Os valores normativos apresentados pelo documento DNIT-ES 031/2006 estabelecem os valores limites de cada parâmetro. Observa-se que o valor de vazio de agregados minerais (VAM) depende do tamanho nominal máximo utilizado, que para este trabalho foi de 12,7mm, logo o valor mínimo do VAM é 16. Todas as misturas asfálticas produzidas nesta pesquisa obtiveram seus valores superiores ao valor mínimo normativo do VAM.

Foi verificado que a estabilidade foi superior na mistura convencional (sem adição de ADF) para todos os teores de ligante utilizados. Esse fenômeno pode ser explicado devido ao formato das partículas finas provenientes de rochas britadas, que são subangulares e os granulares possuem uma microtextura mais rugosa, comparada ao das areias, resultando em um melhor intertravamento e fornecendo uma maior estabilidade. Já em misturas com ADF, observou-se que a estabilidade das misturas com ADF FUC foi superior aos das misturas com ADF E0 para todos os teores de betume.

Esse fato pode ser explicado no trabalho de Brosseaud, Delorme e Hiernaux (1993), onde é citado que pode haver uma redução da deformação permanente com a substituição da areia por material britado. Esse fenômeno pode ser explicado devido a angularidade dos materiais britados aumentar o atrito interno, resultando em misturas asfálticas mais estável.

A mistura asfáltica com ADF E0 apresentou o menor valor de fluência, comparada as misturas asfálticas com ADF FUC e convencionais, onde ambas obtiveram valores semelhantes. Uma possível explicação para esse poderia estar associada a microtextura rugosa e formato subangular de algumas partículas da ADF E0 (Figura 4.25), obtida após o processo de fundição.

Pode-se notar também que, devido aos menores resultados de estabilidade obtidos para misturas asfálticas com ADF E0, a mesma não chegou a deformar como as outras misturas asfálticas, resultando assim em valores inferiores de fluência.

As densidades aparentes das misturas asfálticas convencionais foram superiores, comparadas as misturas compostas por ADF. Esses valores obtidos são reflexos dos resultados obtidos pelos ensaios de massa específica obtidos na caracterização dos agregados. Nesse caso, para amostras compostas integralmente por brita, as massas específicas se apresentaram superiores, quando comparadas aos valores obtidos pelas amostras parcialmente compostas por ADF.

O teor de vazios é um dos parâmetros mais influentes sobre a deformação permanente das misturas asfálticas. Os menores teores de vazios foram obtidos pela mistura asfáltica convencional. Esse resultado pode ser explicado pelo acúmulo de finos dos esqueletos minerais integralmente pétreos durante a compactação por impacto, como foi apresentada pelo ensaio ID_M (Seção 4.1).

A mistura asfáltica ADF FUC apresentou o segundo menor teor de vazios. Observando a Figura 4.26, podemos observar que essa areia possui vários grãos de formatos arredondados e uma microtextura menos rugosa, quando comparada a ADF E0, logo há um atrito menor entre as partículas, favorecendo assim uma melhor acomodação dos granulares, resultando em um maior preenchimento dos vazios.

Pelos limites normativos brasileiros, o teor de ligante a ser escolhido deve estar entre 3% a 5%, nesse caso poderíamos optar apenas entre os teores 5,18% e 5,5% de betume. Entretanto há vários estudos na área, como o de Brosseaud, Delorme e Hiernaux (1993) onde é mencionado que misturas asfálticas densas com um teor de vazios entre 3% a 7% são mais estáveis.

Geralmente, concretos asfálticos devem possuir um teor de vazios superior a 4%, devido à redução que este parâmetro sofre com a pós-compactação, quando inserida em campo, podendo gerar uma perda da estabilidade da mistura betuminosa. Por outro lado, teores de vazios superiores a 8% podem prejudicar a durabilidade do pavimento, referente a redução de resistência à fadiga e também ao envelhecimento (MOMM, 1998).

O parâmetro de volume cheio de vazio (VCB) apresentou valores bem próximos para todas as misturas asfálticas. O parâmetro relação betume/vazio (RBV) apresentou valores superiores para misturas asfálticas convencionais, comparadas as misturas asfálticas com ADF. Nota-se que, assim como o teor de vazios, de acordo com os limites normativos poderíamos escolher apenas os dois teores mais elevados de CAP (5,18% e 5,5%).

Entretanto, pela Equação 5.6 observa-se que o parâmetro RBV é fortemente ligado ao valor do teor de vazios. Quando maior o valor de %V, menor será do RBV. Conforme o estudo de Brosseaud, Delorme e Hiernaux (1993) mencionado anteriormente, a utilização de %V levemente maiores que os estipulados pelo limite normativo brasileiro resultam em misturas asfálticas com boa estabilidade.

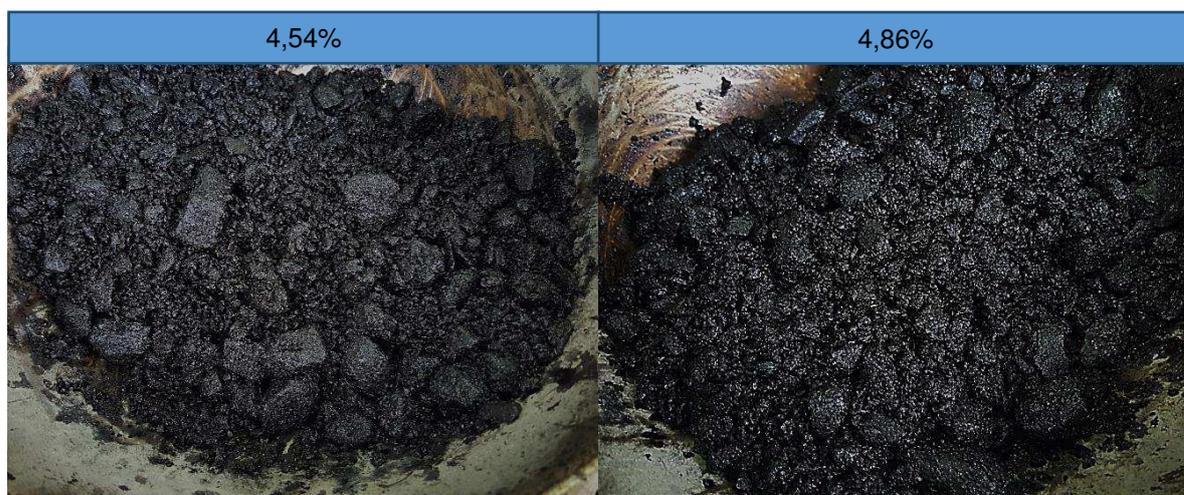
Apesar do objetivo desse ensaio ser determinar o teor ótimo das misturas asfálticas, esse não é um parâmetro tão fácil de se determinar. Há vários critérios

utilizados em trabalhos anteriores para se determinar esse teor, como: a utilização do teor de betume se baseando apenas no volume de vazios correspondente a 4%; ou um conjunto dos resultados da estabilidade, densidade aparente e volume de vazios.

Nessa pesquisa, além de analisar as tendências das curvas obtidas dos diversos parâmetros desse ensaio, foram realizadas observações sobre os aspectos visuais durante a mistura, nos procedimentos de compactação e nos corpos de provas moldados, para uma decisão mais assertiva acerca do teor de ligante.

Durante a mistura dos agregados com o betume, foi possível constatar que teores menores de CAP resultam em uma mistura mais “opaca”, enquanto teores maiores resultam um “brilho” excessivo. Durante a realização das misturas, notou-se que a partir do teor de 4,86% de CAP houve a incidência do “brilho” excessivo, como mostra a Figura 6.4, podendo ser um indício de excesso de ligante asfáltico.

Figura 6.4 - Diferença de "brilho" de misturas asfáltica de teores de ligante 4,54% e 4,86%



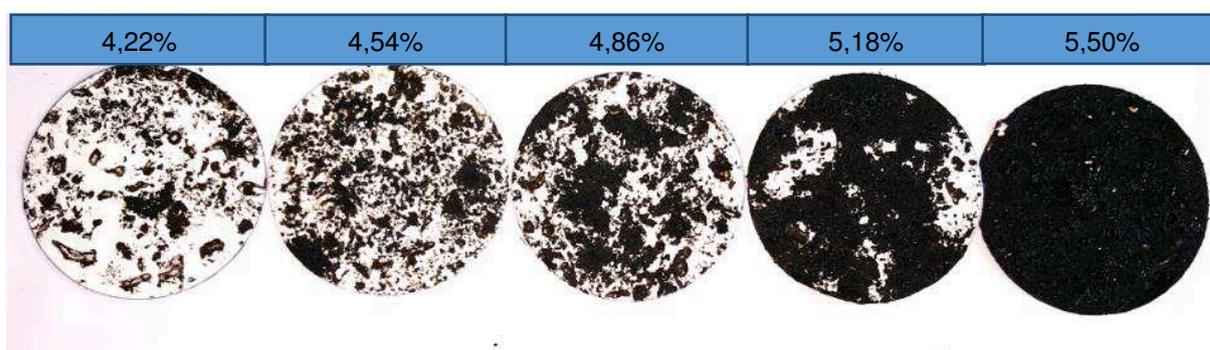
Fonte: Autor

Apesar da análise dos papéis-filtro não ser preconizado por nenhuma norma, é interessante observar que, conforme ocorre o aumento do teor de ligante há um maior “preenchimento” do papel-filtro com o mástique, como é apresentado na Figura 6.5. Foi notado que nos papéis-filtro utilizado na compactação de misturas com teor de CAP de 4,22%, a maioria apresentou furos, provavelmente causados pelas pontas dos agregados superficiais dos corpos de prova, e retendo pouca quantidade de mástique impressa. Todavia, observou-se que com o aumento do teor

de CAP, houve uma redução dos rasgos gerados durante a compactação e um aumento da quantidade de mástique aderido aos papéis-filtros.

Esse fenômeno pode ser explicado pelo trabalho de Momm (1998), onde é mencionado que a quantidade excessiva de ligante asfáltico na mistura pode ocasionar na exsudação de finos e do cimento asfáltico na superfície durante a densificação do pavimento. Conseqüentemente ocorre uma redução na microtextura e da macrotextura no topo da camada de rolamento, resultando em uma redução da aderência pneu-pavimento.

Figura 6.5 - Papel de filtro utilizados em diferentes teores



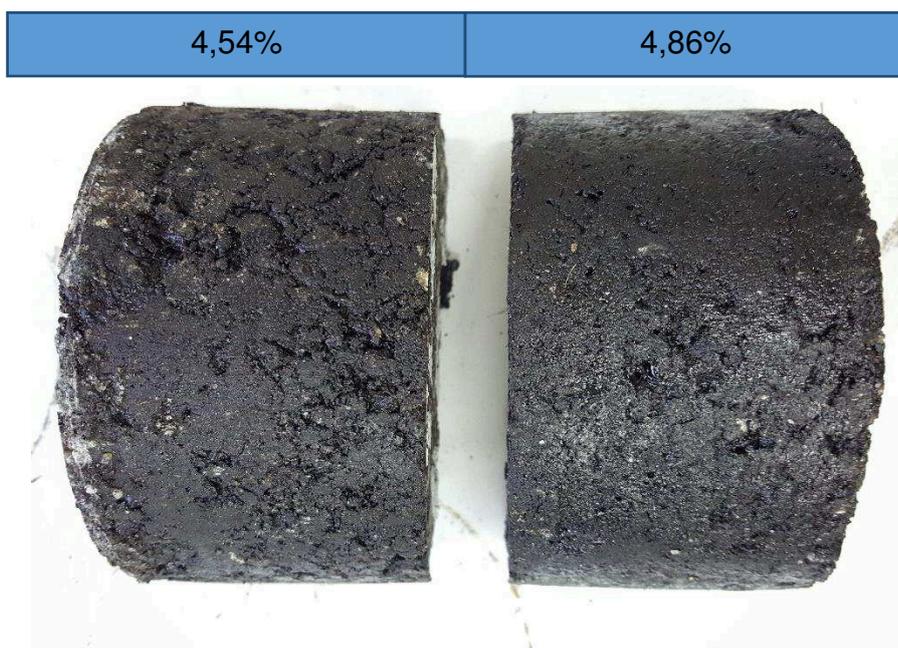
Fonte: Autor

Pode ser constatado através dos gráficos que com o aumento do teor de ligante na mistura, há uma redução no teor de vazios. O preenchimento excessivo do teor de vazios com ligante asfáltico com menor valor de penetração (CAP mais duros), tendem a tornar os pavimentos flexíveis mais rígidos, podendo ocasionar a ruptura precoce por fadiga. O excesso de ligante também pode levar o aparecimento de trilhas de rodas.

Concluindo as observações referentes ao “brilho” excessivo, o mesmo foi constatado na superfície lateral dos corpos de provas com teores 4,86%, enquanto os corpos de provas com teor de 4,54% ainda apresentavam uma certa opacidade, como pode ser observado na Figura 6.6.

Observou-se que as tendências para os três tipos de misturas asfálticas foram semelhantes, logo podemos definir um mesmo teor de ligante para todas as misturas exploradas nesse trabalho. Analisando as tendências dos gráficos, o aspecto visual e a trabalhabilidade das misturas, chegou-se a dois prováveis teores de ligante a ser utilizado em misturas asfálticas, que são 4,54% e 4,86%.

Figura 6.6 - Diferença de opacidades dos corpos de provas 4,54% e 4,86%



Fonte: Autor

6.2 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO INDIRETA (RTI)

Os corpos de prova desse ensaio foram formulados com dois teores de betumes citados anteriormente, onde para cada teor foram compostos três corpos de provas de cada tipo de mistura asfáltica (convencional, ADF E0 e ADF FUC), resultando em um total de 18 corpos de prova para esse ensaio. O ensaio de resistência à tração indireta teve como objetivo a obtenção de mais parâmetros do comportamento mecânico, sob normativas brasileiras, visando uma escolha do teor de ligante com maior assertividade.

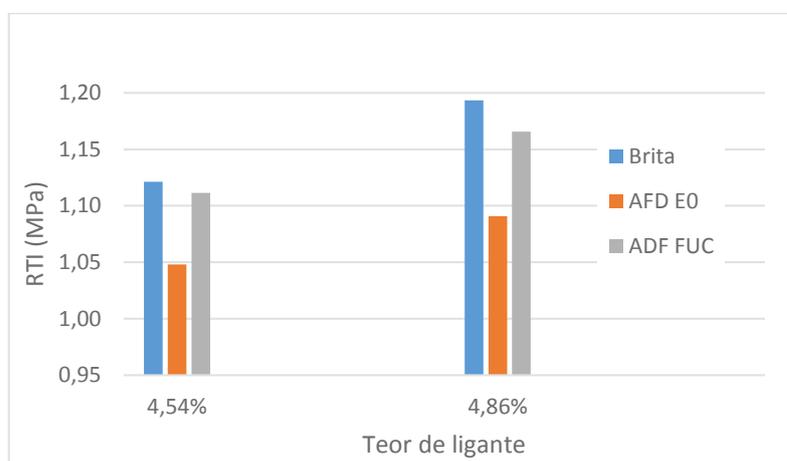
Conforme foi visto na seção 6.1, a dúvida remanesceu sobre os teores de ligante 4,54% e 4,86%. Os resultados do ensaio de Resistência à Tração Indireta estão representados na Tabela 6.2 e a representação gráfica na Figura 6.7.

Tabela 6.2 - Resultados do ensaio de Resistência à Tração Indireta

Teor de ligante (%)	Brita		E0		FUC	
	RT (Mpa)	RT Médio (Mpa)	RT (Mpa)	RT Médio (Mpa)	RT (Mpa)	RT Médio (Mpa)
4,54%	1,39	1,12	0,80	1,05	1,00	1,11
	0,89		1,28		1,19	
	1,08		1,07		1,15	
4,86%	1,15	1,19	1,04	1,09	1,17	1,17
	1,16		1,17		1,30	
	1,28		1,07		1,03	

Fonte: Autor

Figura 6.7 - Gráfico dos resultados do ensaio de RTI



Fonte: Autor

Observou-se que em todas as misturas estudadas neste trabalho, os valores de resistência à tração indireta das misturas asfálticas com teor de 4,86% foram superiores aos do 4,54%. Apesar desses valores apontarem logicamente para a escolha do teor 4,86%, foi realizado uma análise além dos resultados, referentes ao método de concepção das misturas asfálticas, da moldagem dos corpos de prova e do mecanismo de ruptura, como:

- Conforme a discussão na seção 6.1, todas as misturas asfálticas produzidas com um teor de ligante de 4,86% apresentaram o “brilho” excessivo. Esse fator pode ser um indicativo de excesso de ligante, que pode influenciar negativamente o comportamento mecânico dos pavimentos rodoviários;
- As diferenças entre os resultados do ensaio RTI não foram elevadas, dada a ordem de grandeza de seus valores absolutos;

- A compactação agressiva e rigorosa da metodologia utilizada, que se dá através do impacto, resulta na quebra dos granulares internos. Isso resulta na modificando do comportamento mecânico, comparado a mesma mistura asfálticas compactada por amassamento (ocorrida em campo), que possui seu esqueleto mineral mais preservado;
- A quebra dos grãos na mistura asfáltica, como foi mostrado nos resultados do ID_M, resulta a geração de materiais mais finos. Materiais com diâmetros menores tendem a absorver mais betume, devido a sua maior área específica, logo, pode-se dizer que, a compactação por impacto pode induzir a valores dos teores de ligante superiores, comparada a outro método de compactação;
- O próprio mecanismo de ruptura utilizado nesses ensaios, que é por compressão diametral sob um único carregamento gradual, o distanciam de uma avaliação acurada do comportamento mecânico de um material que será implantado e solicitado em campo de forma diferente, comparado aos procedimentos laboratoriais de compactação e ruptura.

Devido aos argumentos citados acima, foi determinado que para todas as misturas asfálticas formuladas nessa pesquisa, o teor de betume a ser utilizado é de 4,54%.

6.3 ENSAIO LOTTMAN MODIFICADO

Para adequar a quantidade de vazios estabelecido pela norma AASHTO T283/89, foram necessários aproximadamente 37 golpes em cada superfície, totalizando 74 golpes. Foram executados golpes dos dois lados do corpo de prova, visando uma compactação mais homogênea, e também para manter o padrão de compactação que já havia sido executado nos ensaios anteriores.

Visando manter um padrão na porcentagem saturada, tentou-se manter o teor de umidade dos corpos de prova o mais próximo de 55% (limite inferior normativo).

Os resultados do ensaio estão apresentados na Tabela 6.3 e a relação entre as resistências à tração indireta dos corpos de prova condicionado e não condicionado na Tabela 6.4.

Tabela 6.3 - Resultado do ensaio Lottman Modificado

Tipo de amostra	Teor de ligante (%)	Brita		E0		FUC	
		RT (Mpa)	RT Médio (Mpa)	RT (Mpa)	RT Médio (Mpa)	RT (Mpa)	RT Médio (Mpa)
Condicionada	4,54%	1,76	1,75	1,38	1,44	1,61	1,51
		1,72		1,48		1,48	
		1,76		1,47		1,46	
Não Condicionada	4,54%	1,95	1,82	1,65	1,68	1,80	1,90
		1,77		1,67		1,94	
		1,74		1,71		1,96	

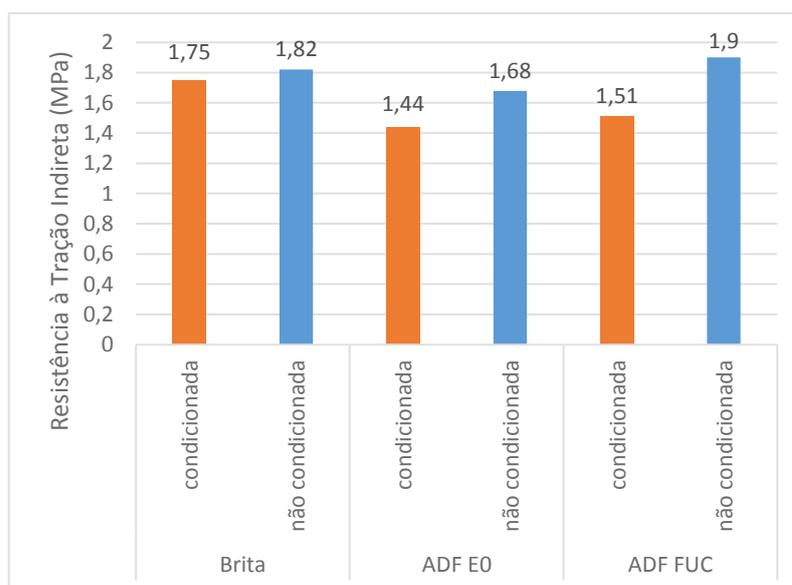
Fonte: Autor

Tabela 6.4 -Relação entre as resistências condicionadas e não condicionadas

Material	COND./NÃO COND	Média
E0	0,83	0,86
	0,89	
	0,86	
FUC	0,90	0,80
	0,76	
	0,74	
Brita	0,91	0,96
	0,97	
	1,01	

Fonte: Autor

Figura 6.8 - Gráfico das resistências condicionadas e não condicionadas dos materiais



Fonte: Autor

As relações entre os corpos de prova condicionados com os não condicionados das misturas asfálticas estudadas resultaram em valores superiores a 0,7. Logo, pelo ensaio Lottman Modificado é possível comprovar que, apesar dos resultados do ensaio de adesividade de todos os agregados utilizados nessa pesquisa (brita e ADF) serem insatisfatórios, as misturas asfálticas apresentaram uma boa resistência à tração indireta sob a ação da umidade, em situações de condicionamento rigoroso.

Observou-se que a redução da resistência à tração indireta da brita não foi muito afetada com o condicionamento. Já no caso das areias, houve uma redução de 14% para misturas asfálticas com ADF E0 e 21% para misturas com ADF FUC. Essa diferença maior nas misturas asfálticas compostas parcialmente por areia pode indicar a influência hidrófila da ADF sobre o comportamento mecânico das misturas asfálticas.

Isso também pode ser explicado com os ensaios de FRX realizados, que comprovaram o elevadíssimo teor de SiO_2 na composição de ambas as areias, resultando em uma carga eletronegativa, repelindo assim o ligante asfáltico.

Houve um corpo de prova da mistura asfáltica convencional que, embora tenha sofrido o condicionamento rigoroso, apresentou uma resistência à tração indireta ligeiramente maior que o corpo de prova não condicionado. Isso pode ser explicado devido a possível ausência, ou pouca incidência, de vazios comunicantes

na parte interna do corpo de prova. Caso não haja vazios comunicantes, a água ficara aprisionada apenas em vazios isolados, podendo não resultar uma interferência significativa na mistura asfáltica como um todo.

A incerteza das configurações dos vazios na parte interna dos corpos de prova pode conduzir a resultados inesperados, como o descrito no parágrafo anterior. A análise das disposições dos vazios pode ser analisada através de técnicas não destrutivas, como a tomografia computadorizada por raio X ou ressonância magnética.

Constatou-se que a resistência à tração indireta das misturas asfálticas não condicionada de ADF FUC foi levemente superior à das misturas asfálticas convencionais. Este resultado se diferem, portanto, das tendências observadas até então, onde as misturas asfálticas convencionais apresentaram valores superiores as misturas asfálticas com ADF em outros ensaios laboratoriais.

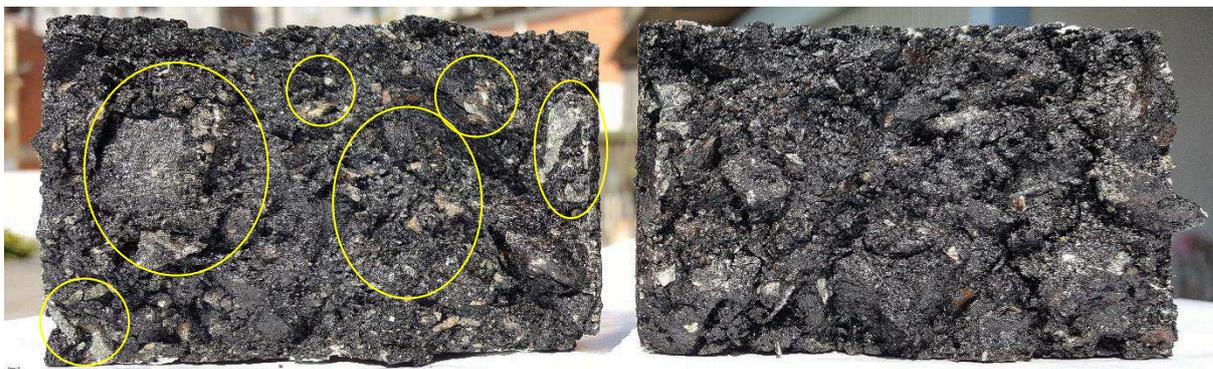
Através da análise visual das amostras rompidas, é possível analisar a influência da água na parte interna dos corpos de prova. As imagens estão representadas nas Figuras 6.9 a 6.11 e, os indícios de descolamentos e películas muito finas de ligante asfáltico sobre o agregado estão circulados em amarelo.

Figura 6.9 - Corpo de prova condicionado (esquerda) e não condicionado (direita) ADF E0



Fonte: Autor

Figura 6.10 - Corpo de prova condicionado (esquerda) e não condicionado (direita) ADF FUC



Fonte: Autor

Figura 6.11 - Corpo de prova condicionado (esquerda) e não condicionado (direita) Brita



Fonte: Autor

Apesar da quantidade pequena de corpos de provas realizados para esse ensaio (três para cada tipo de mistura asfáltica) e no ensaio de Resistência à Tração Indireta (seção 6.2), foi possível notar um aumento na resistência à tração indireta nos corpos de prova não condicionados do ensaio Lottman Modificado, comparados aos moldados no ensaio de Resistência à Tração Indireta (RTI), como mostra a Tabela 6.5 e o gráfico representado na Figura 6.12.

Considerando que o único parâmetro que difere os ensaios de RTI e Lottman Modificado (amostra não condicionada) é o número de golpes, onde para o primeiro ensaio foram 75 golpes/face e para o segundo, 37 golpes/face. Logo pode-se associar a redução da resistência à tração indireta devido a execução de um maior número de golpes durante a moldagem.

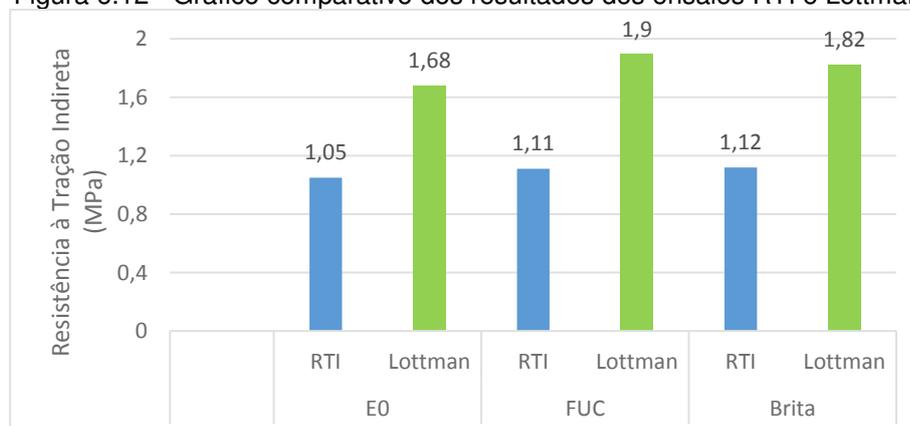
Como foi discutido anteriormente, a compactação por impacto resulta em uma modificação do esqueleto mineral, acarretando também em uma modificação do comportamento mecânico, podendo esse fenômeno ser demonstrado através dos resultados representados na Tabela 6.5 e Figura 6.12.

Tabela 6.5 - Relação dos resultados dos ensaios RTI e Lottman

Material	Ensaio	Resistência à tração indireta (MPa)
E0	RTI	1,05
	Lottman	1,68
FUC	RTI	1,11
	Lottman	1,9
Brita	RTI	1,12
	Lottman	1,82

Fonte: Autor

Figura 6.12 - Gráfico comparativo dos resultados dos ensaios RTI e Lottman



Fonte: Autor

7 CONCLUSÕES

Através dos resultados obtidos nesse trabalho, pode-se concluir que, do ponto de vista mecânico, o reaproveitamento da areia descartada de fundição (ADF) como agregado fino em misturas asfálticas densas é viável. Logo o objetivo geral deste trabalho foi alcançado.

Diferente do Método por tentativa, preconizado pelo DNIT, para a formulação dos esqueletos minerais desse trabalho foi utilizado o Método Racional proposto por Füller ou Talbot. Essa metodologia possibilitou a execução de uma distribuição granulométrica densa bem distribuída, assegurando assim um esqueleto mineral mais estável. A escolha dessa metodologia também favoreceu uma análise mais acurada do comportamento mecânico da mistura asfáltica, devido a precisão da montagem dos esqueletos minerais, fornecendo uma maior homogeneidade nos corpos de prova fabricados em laboratório e evitando variações comportamentais devido às diferenças de composições granulométricas.

Para possibilitar a utilização do método de formulação mencionado acima, deu-se a necessidade do peneiramento das frações comerciais dos agregados pétreos e das 2 ADF utilizadas nesse trabalho. Embora não fosse o foco de se conhecer a distribuição granulométrica da brita, no caso das ADF tornou-se um ponto primordial, já que era necessário conhecer as frações representativas desse rejeito industrial para um reaproveitamento mais eficiente em larga escala. Optando nesse caso em substituir as frações 0,3mm e 0,15mm do esqueleto mineral pétreo por ADF, já elas representam 73,61% e 83,31% do total de peso da ADF E0 e ADF FUC, respectivamente.

Durante os ensaios de caracterização dos agregados pétreos e das ADF, foram identificados um problema relacionado à adesividade desses com o ligante asfáltico. Esse problema se deu devido à alta presença de SiO₂, tanto na brita (granito) quanto para as ADF, detectadas pelo ensaio de Fluorescência de Raio X.

Um ponto importante a ser ressaltado, é que nessa pesquisa não foi utilizado aditivos ou adições para corrigir esses resultados negativos, referentes à adesividade. Priorizou-se analisar apenas a influência da ADF sobre o comportamento das misturas asfálticas, evitando a obtenção de resultados que poderiam não condizer com a real influência que a ADF exerce sobre o comportamento mecânico de misturas asfálticas convencionais.

Apesar do DNIT preconizar o Método Marshall para se determinar o teor ótimo de ligante, esse ensaio não foi o suficiente para alcançar o seu objetivo na presente pesquisa. Apesar de haver várias convenções para a definição do teor ótimo, nesse trabalho foram analisadas as tendências das curvas geradas pelo ensaio e foi constatado que, apesar do teor 4,86% apresentar melhores resultados de estabilidade e valores bons em outros parâmetros, através da análise visual realizada durante a execução da mistura, compactação e da aparência do corpo de prova moldado, observou que as misturas asfálticas nesse teor apresentava um “brilho” excessivo, considerando um forte indício de excesso de betume. Logo a análise prosseguiu para o ensaio de Resistência à Tração Indireta (RTI), com misturas asfálticas compostas por 4,54% e 4,86%.

Os valores obtidos no ensaio de RTI também foram um pouco superiores para o teor 4,86%, o que induziria logicamente a escolha desse teor. Entretanto foi realizada uma análise além dos resultados obtidos nos ensaios até aqui realizados e observou-se que apesar de ser determinado pelo DNIT, os ensaios realizados no Brasil, pouco condizem com os fenômenos observados em campo.

A compactação severa por impacto que o corpo de prova é submetido resulta na quebra dos granulares, modificando assim a curva granulométrica. Além da solicitação que leva o corpo de prova à ruptura serem caracterizados por um esforço único e gradual, refletindo em nada os esforços sofridos em campo pelas estruturas rodoviárias.

Aliadas as constatações realizada através de ensaios laboratoriais, mostram que, geralmente o teor ótimo determinado por essa metodologia é superior ao de um mesmo esqueleto mineral, quando este é compactado por amassamento. Isso se dá devido ao aumento de finos que ocorre durante a compactação por impacto, resultando em um aumento da área superficial do agregado, logo necessitando de um teor maior de betume para um melhor envolvimento.

Devido a essa discussão e também pelos diversos problemas conhecidos, relacionados pelo excesso de betume na mistura, foi escolhido o teor de 4,54% como teor ótimo para compor as misturas asfálticas.

Em seguida, foi realizado o ensaio de Lottman Modificado, onde foi observado a influência deletéria da água sobre a mistura asfáltica. Constatou-se que todas a relação de resistência à tração indireta entre as misturas condicionadas imersas em água com as que não foram condicionadas foram superiores à 70%, logo considera-se que as apesar dos granulares terem obtidos resultados ruins no ensaio de adesividade, as misturas asfálticas formadas por esses mesmos materiais apresentaram uma boa resistência à ação deletéria da água.

Devido ao procedimento de compactação e de ruptura ser os mesmos, diferenciando apenas nos números de golpes durante a compactação, foi realizado nesse trabalho uma comparação entre os resultados obtidos do ensaio de RTI e os obtidos em corpos de provas não condicionados do ensaio de Lottman Modificado. Observou-se que a resistência à tração indireta apresentada nos corpos de prova moldados com 37 golpes em cada face (Lottman Modificado) foi superior a resistência dos moldados com 75 golpes em cada face (Resistência à Tração Indireta), podendo ser um indício que a compactação por impacto realmente influencia o comportamento mecânico das misturas asfálticas.

Em todos os ensaios laboratoriais mencionados até aqui, as misturas asfálticas com ADF apresentaram resultados de parâmetros mecânicos levemente inferiores, comparadas as misturas convencionais. Houve uma exceção no ensaio Lottman Modificado, onde os corpos de prova não condicionado de ADF FUC apresentou um valor de resistência à tração levemente superior, comparado às misturas asfálticas convencional. Todas as misturas asfálticas produzidas nesta pesquisa apresentaram resultados referentes aos parâmetros mecânicos acima dos limites normativos. Logo, do ponto de vista mecânico e de acordo com os dados obtidos desta pesquisa, as areias descartadas de fundição (ADF) estudadas nesse trabalho podem ser reutilizadas como agregado fino em misturas asfálticas para obras de pavimentação.

Durante o desenvolvimento dessa pesquisa foram levantados alguns tópicos que podem ser explorados, com o intuito de validar o emprego da ADF como agregado fino na construção rodoviária. Logo, o autor sugere as seguintes propostas para trabalhos futuros:

- Realizar uma análise comparativa do comportamento mecânico das misturas asfálticas através de metodologias que possuem uma estreita relação campo/laboratório, como é o caso da metodologia francesa, por exemplo;
- Utilizar análise de fractal, tomografias computadorizadas e ressonâncias magnéticas para verificar a forma geral das formas que realmente são representativas em amostra de ADF.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS **AASHTO T283/1989**. Resistance of Compacted Bituminous Mixture to Moisture Induced Damage.

ALVEZ, B. S. Q. **Estudo da viabilidade ambiental das areias descartadas de fundição**. 2012. 183 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FUNDIÇÃO (ABIFA). **Anuário ABIFA 2015**: Guia ABIFA de fundição. Disponível em: <<http://abifa.org.br/wp-content/uploads/2015/08/Anu%C3%A1rio-ABIFA-Junho-2015.pdf>>. Acesso em: 16 nov.2015.

_____. **Fundição & Matérias-primas** São Paulo, v. 186, fev. 2016. Disponível em: <<http://abifa.org.br/wp-content/uploads/2016/04/abifa-189-fevereiro.pdf>>. Acesso em: 13 maio 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) **NBR6296/2004**. Produtos betuminosos semissólidos – Determinação da massa específica e densidade relativa. Rio de Janeiro, 2004, 5 p. Disponível em: <<http://www.abntcolecao.com.br/java/viewnormajava.aspx?Q=7940616E4929F5588D4406D0EF29159DA89626156AECA0BE&Req=>>>. Acesso em 13 maio2016.

_____. **NBR 7809/2008**. Agregados graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2008, 3 p. Disponível em: <<http://www.abntcolecao.com.br/java/viewnormajava.aspx?Q=75F9E3C9C0ACBA782D4CCB7D9A9579F25BA892896089FDFB&Req=>>>. Acesso em 13 maio2016.

_____. **NBR 6296/2012**. Determinação da massa específica real de ligantes betuminosos. Rio de Janeiro, 2012, 6 p. Disponível em: <<http://www.abntcolecao.com.br/java/viewnormajava.aspx?Q=7940616E4929F5588D4406D0EF29159DA89626156AECA0BE&Req=>>>. Acesso em: 17 nov.2015.

_____. **NBR 9935/2011**. Agregados – Terminologia. Rio de Janeiro, 2011, 12 p. Disponível em: <<http://www.abntcolecao.com.br/java/viewnormajava.aspx?Q=CC818AAD0EC94FD3FCB0A1A01F11B9B004AC35E1A0DA3B5A&Req=>>>. Acesso em: 17 nov.2015.

_____. **NBR 10004/2004**. Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004, 71 p. Disponível em: <http://www.ccs.ufrj.br/images/biosseguranca/CLASSIFICACAO_DE_RESIDUOS_SOLIDOS_NBR_10004_ABNT.pdf>. Acesso em: 19 nov.2015.

_____. **NBR 10005/2004**. Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólido. Rio de Janeiro, 2004, 16 p. Disponível em: <

<http://www.ecosystem.com.br/wp-content/uploads/2014/03/NBR-10005.pdf>>. Acesso em: 19 nov.2015.

_____. **NBR 15087/2012**. Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral. Rio de Janeiro, 2012, 5 p. Disponível em: <<http://www.abntcolegao.com.br/java/viewnormajava.aspx?Q=4AF30F2800833EB79B6A83CCDC80F28E1321BEF9BDBED8D5&Req=>>>. Acesso em: 13 maio2016.

_____. **NBR 15702/2009**. Areia descartada de fundição – Diretrizes para aplicação em asfalto e em aterro sanitário. Rio de Janeiro, 2009, 8 p. Disponível em: <<http://www.abntcolegao.com.br/java/viewnormajava.aspx?Q=D0C986B5822B1B0C4541D041904C306BB0636012AFF9FFBB&Req=>>>. Acesso em 24 maio2016.

_____. **NBR 15785/2010**. Misturas asfálticas a quente – Utilização da aparelhagem Marshall para preparação dos corpos-de-prova com diferentes dimensões e aplicações. Rio de Janeiro, 2010, 7 p. Disponível em: <<http://www.abntcolegao.com.br/java/viewnormajava.aspx?Q=48BF4C9A7BCC9C65F15EF2E4EC97212A9EFC3ED977242E4E&Req=>>>. Acesso em: 13 maio2016

BAAJ, H. **Comportement a la fatigue des matériaux granulaires traités aux liants hydrocarbonés**. 2002, 235 p. Tese (Doutorado), École Doctorale des Sciences Pour l'Ingenieur de Lyon, L'Institut National des Sciences Appliquees de Lyon. Lyon, 2002.

BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica**: materiais, projetos e restauração. 1. ed. São Paulo: Oficina de textos, 2007.

BARRA, B. S. **Avaliação do desempenho mecânico de misturas asfálticas densas utilizando materiais do Estado do Pará com o emprego de pó de calcário**. 2005, 177 p. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

_____. **Avaliação da Ação da Água no Módulo Complexo e na Fadiga de Misturas Asfálticas Densas**. 2009, 327 p. Tese (Doutorado), Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil (PPGEC), Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2009.

BERNUCCI, L. B., *et al.* **Pavimentação asfáltica**: formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro, p. 504, 2008.

BONET, I.I. **Valorização do resíduo de areia de fundição (RAF). Incorporação nas massas asfálticas do tipo C.B.U.Q.** 2002. 126 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Departamento de Engenharia de Produção e Sistemas, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2002.

BONIN, A. L., ROSSINI, A.J., ZABIM, A. F. P. Reutilização da areia preta de fundição na construção civil. **Anais do Congresso Brasileiro de Fundição – CONAF 95 ABIFA**. Campinas/SP, 1995.

BRADASCHIA, C. *et al.* Fundição de ligas não ferrosas. 3. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metais (ABM), 1971.

BRASIL. Lei nº12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Brasília: Casa Civil: Subchefia para assuntos jurídicos, 2010. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Acesso em: 07 jun.2016

BROSSEAUD, Y.; DELORME, J. L.; HIERNAUX, R.; Study of Permanent Deformations in Asphalt with Help of the LCPC Wheel Tracking Rutting Tester: Evaluation and Future Prospects. **72th Annual Meeting of Transportations Research Board**. USA, 1993.

BÚRIGO, A. S. **Avaliação da composição granulométrica no comportamento mecânica de misturas de concreto asfáltico**. 2015. 60p.. Relatório Final (Programa Institucional de Bolsa de Iniciação Científica Voluntária) – Centro de Engenharias da Mobilidade, Universidade Federal de Santa Catarina. Joinville/SC, 2015.

CARNIN, R.L.P. **Reaproveitamento do resíduo de areia verde de fundição como agregado em misturas asfálticas**. 2008. 131 p. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Química, Departamento de Química, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2008.

CASOTTI, B. P.; BEL FILHO, E.; CASTRO, P. C.. Indústria de fundição: situação atual e perspectivas. **BNDES Setorial**, n. 33, mar. 2011, p. 121-162, 2011.

CHEGATTI, S. **Estudo da influência da bentonita presente na areia descartada de fundição na contaminação do solo e águas subterrâneas**. 2012. 146p. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2012

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO – CETESB. **Decisão de diretoria nº152/2007/C/E**. Procedimentos para gerenciamento de areia de fundição. São Paulo, 15 p., ago.2007. Disponível em: <residuossolidos.cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/sites/36/2013/11/20100621111349_14c906d046b6f3c904a8e859375107c5.pdf>. Acesso em: 14 jun.2016

CONSELHO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE DE SANTA CATARINA – CONSEMA. **CONSEMA Nº26/2013**. Estabelece as diretrizes sobre a utilização das Areias Descartadas de fundição – ADF e adota outras providências. Florianópolis, 12 p., set.2013. Disponível em: <<http://www.sds.sc.gov.br/index.php/biblioteca/consema/legislacao/resolucoes/432-resolucao-consema-no-262013/file>>. Acesso em: 14 jun.2016

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). **Anuário CNT de Transporte 2016** – Estatísticas consolidadas. Brasília, 2016a. Disponível em: <<http://anuariodotransporte.cnt.org.br/>>. Acesso em: 11 jun.2016.

_____. **Boletim Estatístico** – 01-2016. Brasília, 2016b. Disponível em: <<http://www.cnt.org.br/Boletim/boletim-estatistico-cnt>>. Acesso em: 19 jun. 2016.

COSTA, C. **Mistura asfáltica com o uso de areia de fundição de ferro descartada**. 2008. 214 p. Dissertação (Mestrado), Engenharia de Transportes, Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro, 2008.

COSTA, C.; PINTO, S; VENTORINI L. A. Misturas asfálticas com o uso de areia de fundição de ferro descartada. **38º Reunião anual de pavimentação (RAP)/12º encontro nacional de conservação rodoviária (ENACOR)**. Manaus, 2007.

COUTINHO NETO, B. **Avaliação de reaproveitamento de areia de fundição como agregado em misturas asfálticas densas**. 2004. 271 p. Tese (Doutorado) Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos/SP, 2004.

DEPARTAMENTO ESTADUAL DE INFRAESTRUTURA – ESTADO DE SANTA CATARINA (DEINFRA-SC) **DEINFRA/ES/P/05/2016**. Especificações gerais para obras rodoviárias. Florianópolis, 2016, 14 p. Disponível em: <http://www.deinfra.sc.gov.br/jsp/relatorios_documentos/doc_tecnico/download/engenharia_rodoviaria/ES%20-%20P%20-05-16%20-%20CAUQ.pdf>. Acesso em: 13 maio2016.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADA E RODAGEM (DNER) **DNER – ME 004/1994**. Material betuminoso – determinação da viscosidade Saybolt-Furol a alta temperatura método da película delgada. Rio de Janeiro, 1994, 2 p. Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dner-me004-94.pdf>>. Acesso em: 13 maio2016.

_____. **DNER – ME 035/1998**. Agregados – determinação da abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro, 1998, 6 p. Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dner-me035-98.pdf>>. Acesso em: 13 maio2016.

_____. **DNER – ME 078/1994**. Agregados graúdo – adesividade a ligante betuminoso. Rio de Janeiro, 1994, 3 p. Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dner-me078-94.pdf>> Acesso em: 13 maio2016.

_____. **DNER – ME 081/1998**. Agregados: Determinação da Absorção e da Densidade do Agregado Graúdo. Rio de Janeiro, 1998, 6 p. Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dner-me081-98.pdf>>. Acesso em: 13 maio2016.

_____. **DNER – ME 084/1995**. Agregado miúdo – determinação da densidade real. Rio de Janeiro, 1995, 3 p. Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dner-me084-95.pdf>>. Acesso em: 13 maio2016.

_____. **DNER – ME 085/1994.** Material finamente pulverizado – determinação da massa específica real. Rio de Janeiro, 1994, 4 p. Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dner-me085-94.pdf>>. Acesso em: 13 maio2016.

_____. **DNER – ME 086/1994.** Agregados – determinação do índice de forma. Rio de Janeiro, 1994, 5 p. Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dner-me086-94.pdf>>. Acesso em; 13 maio2016.

_____. **DNER – ME 089/1994.** Agregados – avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio. Rio de Janeiro, 1994, 6 p. Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dner-me089-94.pdf>>. Acesso em: 13 maio2016.

_____. **DNER – ME 117/1994.** Mistura betuminosa – determinação da densidade aparente. Rio de Janeiro, 1994, 4 p. Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dner-me117-94.pdf>>. Acesso em: 13 maio2016.

_____. **DNER – ME 194/1998.** Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman. Rio de Janeiro, 1998, 4 p. Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dner-me194-98.pdf>>. Acesso em: 13 maio2016.

_____. **DNER – ME 401/1999.** Agregados – determinação do índice de degradação de rochas após compactação Marshall – ID_{ML} e sem ligante – ID_M. Rio de Janeiro, 1999, 7 p. Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dner-me401-99.pdf>>. Acesso em: 13 maio2016.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT)
DNIT – ES 031/2006. Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de serviços. Rio de Janeiro, 2006a, 14 p. Disponível em: < http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/especificacao-de-servicos-es/dnit031_2006_es.pdf>. Acesso em: 25 jun.2016

_____. **DNIT – ME 131/2010.** Materiais asfálticos _ Determinação do ponto de amolecimento – Método do Anel e Bola – Método do ensaio. Rio de Janeiro, 2010, 6 p. Disponível em: < http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dnit131_2010_me.pdf>. Acesso em: 06 jun. 2016.

_____. **DNIT – ME 155/2010.** Material asfáltico – Determinação da Penetração – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2010, 8 p. Disponível em: < http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dnit155_2010_me.pdf>. Acesso em: 06 jun.2016.

_____. **Manual de Pavimentação.** 3. ed. Rio de Janeiro. Publicação Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR) - 719. 2006b. Disponível em: < http://www1.dnit.gov.br/arquivos_internet/ipr/ipr_new/manuais/Manual_de_Pavimentacao_Versao_Final.pdf>. Acesso em: 06 jun.2016.

DI BENEDETTO, H.; BAAJ, H.; PRONK, A., LUNDSTRÖM, R., Fatigue of Bituminous Mixtures: different approaches and RILEM Group contribution. **Proceedings of the 6th International RILEM Symposium**. Zurique, 2003.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (FHWA), **User Guidelines for Waste and By-Products Materials in Pavement Construction**. McLean/VA. Publicação nº. FHWA-RD-97-148. 1998. Disponível em: <<http://isddc.dot.gov/OLPFiles/FHWA/009686.pdf>>. Acesso em: 14 jun.2016.

GLOBAL CASTING MAGAZINE STAFF REPORT. 49th Census of World Casting Production. **Global Casting Magazine**. Disponível em: <<http://content.yudu.com/web/y5b2/0A1snzj/GlobCastVol6No1/flash/resources/44.htm>>. Acesso em: 05 jun.2016.

HAMLAT, S. **Étude de la résistance des revêtements routiers aux sollicitations tangentielles**. 2007. 178 p. Tese (Doutorado), École Doctorale Mécanique, Thermique et Génie Civil, École Centrale de Nantes et Université de Nantes. Nantes, 2007.

HECK, J. V. **Modélisation des déformations réversibles et permanents des enrobés bitumineux** – Application a l'ornièrage des chaussées. Tese (Doutorado). 230 p. École Doctorale Mecanique, Thermique et Genie Civil de Nantes, Université de Nantes. Nantes, 2001.

HERMANN, M.; REINERT, M.I.; DUARTE, I.R. **Processo areia a verde**. Blumenau: Nova Letra Gráfica e Editora, 2014.

HICKS, R. P. **Moisture Damage in Asphalt Concrete**. National Cooperative Highway Research Program. Synthesis of Highway Practice 175. Transportation Research Board (TRB). Washington D.C., Nacional Research Council, 1991.

KLINSKY, L. M. G. **Proposta de reaproveitamento de areia de fundição em sub-base e bases de pavimento flexíveis, através de sua incorporação a solos argilosos**. 2008. 189 p. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes e Área de Concentração em Infraestrutura de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos/SP,2008.

KONDIC, V. **Princípios metalúrgicos de fundição**. São Paulo: Polígono, Ed. Da Universidade de São Paulo, 1973.

LABORATOIRE CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSÉES (LCPC). **Manuel LCP d'aide à la formulation des enrobés**. Paris: LCPC, 2007.

LUZ A. B., OLIVEIRA, C. H. **Rochas & Minerais Industriais**. Usos e Especificações. Rio de Janeiro: Centro de Tecnologia Mineral (CETEM-MCT), Ministério da Ciência e Tecnologia. 2005.

MAILLARD, S. **Fissuration et Autoréparation des liants bitumineux** – Apport de l'essai de rupture locale répétée sur bitumen. 2005, 210 p. Tese (Doutorado), École

Doctorale Mecanique, Thermique et Genie Civil, L'École Centrale de Nantes et L'Université de Nantes. Nantes, 2005.

MARIOTTO, C. L. **Areias de Moldagem aglomeradas com argila**. São Paulo: Instituto de Pesquisa Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A, 1978.

MARIOTTO, C. L., BONIN, A. L. Tratamento dos Descartes de areia. **Fundição Matérias Primas**, São Paulo, 1996.

MELLO, O. J. **Estudo da viabilidade da reutilização de resíduo de areia verde de fundição em argamassa colante** – Enfoque ambiental. 2004, 159 p. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental (PPGEA), Centro de Ciências Tecnológicas, Universidade Regional de Blumenau. Blumenau/SC, 2004.

MEURER, P. **Caracterização de Materiais Rochosos do Norte de Santa Catarina para fins de Aplicação em Obras de Pavimentação**. 2015. 92 p. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Santa Catarina. Joinville/SC, 2015.

MOMM, L. **Estudo dos efeitos da granulometria sobre a macrotextura superficial do concreto asfáltico e seu comportamento mecânico**. 1998. 259 p. Tese (Doutorado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP). São Paulo, 1998.

NGUYEN, D. T. **Prediction des deformations permanentes des couches de surfaces des chaussées bitumineuses**. 2006, 169 p. Tese (Doutorado), Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. Paris, 2006.

OLARD, F. **Comportement thermomécanique des enrobés bitumineux à basses températures**: relations entre les propriétés du liant et de l'enrobé. 2003, 221 p. Tese (Doutorado), Institut National des Sciences Appliquées de Lyon. Laboratoire GéoMatériaux du Département Génie Civil et Bâtiment de École Nationale des Travaux Publics de l'État. Lyon, 2003.

PEREIRA, A. **Estudo da viabilidade técnica e ambiental da incorporação de resíduo de areia de fundição em matriz asfáltica**. 2004. 156 p. Tese (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental (PPGEA), Centro de Ciências Tecnológicas, Universidade Regional de Blumenau. Blumenau/SC, 2004.

PEREIRA, R. L., PIRATH, C. E. H., CUNHA, C. J., PEREIRA, D. Parte 1: Reaproveitamento do Resíduo Areia Verde de Fundição em Misturas Asfálticas de Infraestrutura para Pavimentação e Agregado em Misturas Asfálticas. **Simpósio de Prática de Engenharia Geotécnica da Região Sul**. GEOSUL, Curitiba, 2004.

PERRET, J. **Déformations des couches bitumineuses au passage d'une charge de trafic**. 2003. 237 p. Tese (Doutorado), Faculté Environnement Naturel, Architectural et Construit, École Polytechnique Fédérale de Lausanne. Lausana, 2003.

ROMANUS, A. **Moldagem em Areia a Verde**: Manual de Defeitos e Soluções. São Paulo: Global Market, 2005

SENÇO, W. **Manual de Técnicas de Pavimentação**. 2. ed. São Paulo: PINI, 2008, Vol. 1.

SHEIBE, L. F., **A geologia de Santa Catarina** – Sinopse Provisória. Universidade Federal de Santa Catarina. Departamento de Geociências. Disponível em: <<https://periodicos.ufsc.br/index.php/geosul/article/viewFile/12542/11811>>. Acesso em: 6 jun. 2016.

SIEGEL, M. *et al.* **Fundição**. Associação Brasileira de Metais (ABM). 12. ed. São Paulo: Edilé, 1981.

SILVA, T. C. D., **Comparativo entre os regulamentos existentes para reutilização dos resíduos de fundição**. 2007. 56 p. Trabalho de Conclusão de Curso, Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2007.

STEFENNON, F. **Incorporação de Resíduos Industriais em Concreto Betuminoso Usinado à Quente**. 2003. 101 p. Dissertação (Mestrado), Mestrado Profissional em Engenharia, Universidade de Caxias do Sul. Porto Alegre, 2003.