

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

RODOLPHO MEDEIROS FROSSARD

**INFLUÊNCIA DA ADESIVIDADE LIGANTE-AGREGADO NAS
PROPRIEDADES DE FRATURA DE MISTURAS
ASFÁLTICAS SUJEITAS AO DANO POR UMIDADE**

VITÓRIA
2021

RODOLPHO MEDEIROS FROSSARD

**INFLUÊNCIA DA ADESIVIDADE LIGANTE-AGREGADO NAS
PROPRIEDADES DE FRATURA DE MISTURAS
ASFÁLTICAS SUJEITAS AO DANO POR UMIDADE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração Construção Civil.

Orientadora: Prof.^a Ph.D. Jamilla Emi Sudo
Lutif Teixeira.

VITÓRIA
2021

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

F938i Frossard, Rodolpho Medeiros, 1987-
Influência da adesividade ligante-agregado nas propriedades de fratura de misturas asfálticas sujeitas ao dano por umidade / Rodolpho Medeiros Frossard. - 2021.
122 f. : il.

Orientadora: Jamilla Emi Sudo Lutif Teixeira.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Agregados. 2. Escória. 3. Asfalto. 4. Umidade. I. Teixeira, Jamilla Emi Sudo Lutif. II. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. III. Título.

CDU: 624

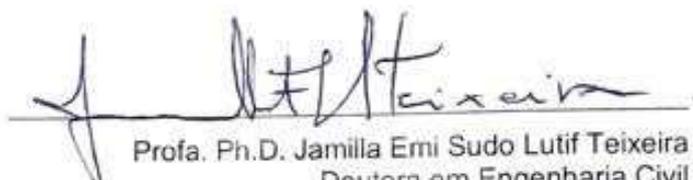
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

INFLUÊNCIA DA ADESIVIDADE LIGANTE-AGREGADO NAS PROPRIEDADES DE FRATURA DE MISTURAS ASFÁLTICAS SUJEITAS AO DANO POR UMIDADE

Rodolpho Medeiros Frossard

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Civil do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de Construção Civil.

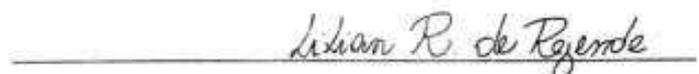
Aprovada no dia 07 de maio de 2021 por:



Prof. Ph.D. Jamilla Erni Sudo Lutf Teixeira
Doutora em Engenharia Civil
Orientadora – UFES



Prof. Dr. Patricio José Moreira Pires
Doutor em Engenharia Civil
Examinador Interno – UFES



Prof. Dra. Lilian Ribeiro de Rezende
Doutora em Geotecnia
Examinadora Externa - UFG

“A persistência é o caminho do êxito.”

(Charles Chaplin)

AGRADECIMENTOS

Antes de qualquer coisa agradeço a Deus por ter me dado a oportunidade de iniciar, desenvolver e concluir esta pesquisa mesmo em meio ao caos gerado pela pandemia da Covid 19. Agradeço a Ele que me sustenta em todos os momentos e direciona minhas escolhas desde sempre. Confesso que a princípio eu não entendi algumas escolhas que fiz, porém no decorrer dos meses percebi que essas foram as melhores que eu poderia ter feito para conseguir concluir essa etapa com sucesso e em tempo. Por isso e por tudo, eu te agradeço, Deus. *“Porque a Tua graça é melhor do que a vida; os meus lábios te louvam (Salmo 63:3)”*.

Agradeço à minha família. Meus pais Samuel e Marlene, pelo apoio e amor incondicional, por entender e respeitar cada momento de afastamento necessário para a dedicação à minha pesquisa, por nunca me permitirem desistir de meus sonhos e objetivos. Minha irmã Elaine e cunhado Elias, por toda motivação, confiança e amor que eles têm em mim. E não posso me esquecer de meus sobrinhos, Ester e Davi Lucca, que ainda sendo crianças, me inspiram com toda pureza e simplicidade, me ensinando a ver a graça de Deus mesmo nas menores coisas. Vocês, família, me fazem querer minha melhor versão a cada dia. Amo vocês.

À minha orientadora, Jamilla. Deus sabe o quanto sou grato por ter colocado profissional tão completa em minha vida acadêmica, desde a graduação, quando já tive a grata oportunidade de termos trabalhado juntos em meu projeto de graduação. Sou grato pela confiança, inspiração, motivação, dedicação e todo conhecimento compartilhado ao longo da pesquisa. Seus ensinamentos vão para muito além da pesquisa científica.

Aos professores Lilian e Patrício por fazerem parte da banca examinadora em minha dissertação. Obrigado por toda contribuição para o melhoramento da pesquisa desenvolvida.

Agradeço aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFES, pelo conhecimento transmitido em todas as disciplinas que cursei, em especial à professora Rudiele por toda ajuda com o tratamento estatístico dos dados.

Aos meus amigos do mestrado, Anna, Dalmon, Lara, Lilian, Mariana, Matheus e Thiago. Foi muito bom estar com vocês durante esse momento da minha vida. Cada momento de parceria, vitórias, “perrengues” e diversão ficará gravado para sempre

em minha memória, principalmente os nossos esperados cafés das 15h. Sucesso a cada um!

Também quero agradecer à Bárbara, mais uma amiga que o mestrado me deu, por todo compartilhamento de experiência que com certeza me foram muito úteis. Sua paciência e dedicação em me ajudar sempre que precisei foram essenciais para que eu pudesse completar essa jornada com minha saúde mental intacta.

Aos meus amigos e irmãos da Igreja Presbiteriana do Brasil da Mata da Praia que me acolheram e caminharam comigo durante todos esses anos. Saibam que cada um de vocês tem um lugar especial em meu coração. Que Deus abençoe a cada um.

Aos técnicos do Laboratório de Geotecnia e Pavimentação (LGP) e do Laboratório de Ensaaios em Materiais de Construção (LEMAC) pela ajuda no desenvolvimento dos ensaios.

Ao Laboratório de Microscopia Eletrônica do Departamento de Geologia da UFC, ao Laboratório de Nanometria Fotônica do Centro Tecnológico da UFES e ao Laboratório de Sedimentologia do Departamento de Oceanografia da UFES pela parceria na realização de alguns ensaios.

Agradeço às empresas Arcelor Mittal Tubarão, Brasitália e Vilabetume que gentilmente forneceram todo o material necessário para a realização da pesquisa.

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da UFES e Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro.

Ao Instituto Federal do Espírito Santo por me conceder a oportunidade de aprimorar meus conhecimentos para que eu possa servir melhor em meu trabalho. Aos colegas do meu campus de lotação, Ifes – Nova Venécia, pelo apoio e parceria de sempre.

Enfim, agradeço a todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para que se tornasse possível a conclusão desta etapa.

RESUMO

As manifestações patológicas mais recorrentes em pavimentos asfálticos são afundamento em trilha de roda, trincamento por fadiga, desagregação dos agregados e buracos, sendo que esses danos são intensificados com a presença da água. Ademais, uma preocupação mundial é a utilização de materiais naturais de fontes não renováveis, dessa forma faz-se necessário a busca por alternativas sustentáveis. Uma alternativa de agregados para pavimentação são as escórias de alto-forno provenientes da siderurgia. Contudo, estudos mostraram que estes materiais apresentam características químicas, físicas e termodinâmicas que afetam a adesividade ligante-agregado. Assim, é preciso ampliar a compreensão do comportamento de misturas asfálticas contendo agregados de escória. Dessa forma, o objetivo da presente pesquisa é investigar os efeitos da substituição parcial de 25% de agregados naturais (AN) por escória de alto forno resfriada ao ar (EFRA) em misturas asfálticas, com e sem adição de fíleres de diferentes composições químicas (cal hidratada, pó de precipitador eletrostático (EP), pó de AN e pó de EFRA), verificando a influência de características de cada material nas propriedades de fratura das misturas asfálticas sujeitas ao dano por umidade. Para isso, corpos-de-prova foram submetidos aos ensaios de dano por umidade induzida e de fratura em geometria semicircular estático (SCB). Os resultados indicaram que misturas com ambas as composições de agregados apresentaram comportamentos similares. A adição de cal hidratada proporcionou maior rigidez às misturas e maior resistência ao dano por umidade. A adição de pó EP também promoveu melhora na resistência ao dano por umidade das misturas, e proporcionou a manutenção da capacidade das amostras de absorver energia, além de ter contribuído para ganho de ductilidade das misturas asfálticas após condicionamento de umidade. Percebeu-se que o agregado siderúrgico pode ser uma alternativa sustentável e com grande potencial para a substituição parcial de agregados naturais em misturas asfálticas desde que adições sejam incorporadas para sanar sua deficiência na adesividade ao ligante asfáltico.

PALAVRAS-CHAVE: Agregados siderúrgicos; Adesividade; Dano por Umidade Induzida; SCB; Fratura.

ABSTRACT

The most recurrent problems in asphaltic are rutting, fatigue cracking, raveling due to the dislodgment of the aggregate materials, and potholes, and these damages are intensified with the presence of water. In addition, a worldwide concern is the use of natural materials from non-renewable sources, so it is necessary to search for sustainable alternatives. An alternative aggregate material is blast furnace slag from the steel industry. However, studies have shown that those materials have chemical, physical and thermodynamic characteristics that affect the binder-aggregate adhesion. Thus, it is necessary to broaden the understanding of the behavior of asphalt mixtures containing slag aggregates. Therefore, the aim of this research is to investigate the effects of the partial substitution of 25% of natural aggregates (AN) by air-cooled blast furnace slag (ACBFS) in asphalt mixtures, with and without the addition of fillers of different chemical compositions (hydrated lime, electrostatic precipitator (EP) powder, AN powder and ACBFS powder), checking the influence of the characteristics of each material on the fracture properties of asphalt mixtures subject to moisture damage. For this, specimens were subjected to induced moisture-damage and static semi-circular bending (SCB). The results indicated that mixtures with both aggregate compositions showed similar behaviors. The addition of hydrated lime provided greater rigidity to the mixtures and greater resistance to moisture damage. The addition of EP powder also promoted an improvement in the resistance to moisture damage of the mixtures and maintained the capacity of the samples to absorb energy, in addition to contributing to the ductility gain of the asphalt mixtures after moisture conditioning. It was realized that the steel aggregate can be a sustainable alternative and with great potential for the partial replacement of natural aggregates in asphalt mixtures as long as additions are incorporated to solve its deficiency in the adhesion to the asphalt binder.

KEYWORDS: Steel aggregates; Adhesiveness; Moisture-induced damage; SCB; Fracture.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Comparativo de precipitações mensais na Estação Meteorológica de Vitória/ES	18
Figura 2 - Projeção da Produção do Aço Brasil.....	20
Figura 3 - Agregado ácido e sua interação entre a água e entre o ligante asfáltico..	26
Figura 4 - Perda relativa da $F_{m\acute{a}x}$ na interface ligante-agregado nas idades condicionadas	33
Figura 5 - Resultados dos ensaios de arrancamento Peel test, PATTI test e Pull-off test	34
Figura 6 - Ângulo de inclinação do entalhe	36
Figura 7 - Análises dos parâmetros de fratura em relação às variáveis da pesquisa	38
Figura 8 - Resultados de DUI para os diferentes aditivos e modificadores de ligante	39
Figura 9 - Resultados do ensaio SCB para os diferentes aditivos e modificadores de ligante.....	39
Figura 10 - Curva R para agregados granítico e calcário.....	40
Figura 11 - Curva tensão x deslocamento das amostras condicionadas a curto e a longo prazo.....	42
Figura 12 - Parâmetros de fratura para os ciclos de condicionamentos a curto e a longo prazo	42
Figura 13 - Inclinação da curva pós-pico e deslocamento crítico das misturas.....	43
Figura 14 - Programa experimental.....	46
Figura 15 - Sequência do Ensaio de Adesividade do Ligante Asfáltico no Agregado Graúdo	51
Figura 16 - Forma, angularidade e textura superficial dos agregados	52
Figura 17 - Nomeação das Misturas da Pesquisa.....	58
Figura 18 - Parâmetros para compactação giratória e CGS utilizado na pesquisa ...	59
Figura 19 - Curva de viscosidade do CAP 30/45 utilizado	61
Figura 20 - Procedimento de mistura e compactação dos CPs de MAC.....	63
Figura 21 - Procedimento de confecção dos corpos-de-prova semicirculares	64
Figura 22 - Ensaio de dano por umidade induzida	66
Figura 23 - Procedimento de execução do ensaio de fratura SCB.....	67

Figura 24 - Curva carga x deslocamento com indicação de alguns parâmetros	68
Figura 25 - Dimensões para cálculo da área de ligamento (Alig).....	69
Figura 26 - Exemplo de curva carga x deslocamento com Gf similares.....	70
Figura 27 - Layout do <i>software</i> I-FIT	70
Figura 28 - Curva carga x deslocamento com marcação das etapas do ensaio	71
Figura 29 - Andamento do ensaio de fratura SCB.....	72
Figura 30 - Ensaio de adesividade nos agregados	75
Figura 31 - Composição granulométrica dos agregados.....	76
Figura 32 - DRX do agregado siderúrgico EFRA	79
Figura 33 - DRX do fíler pó EP.....	81
Figura 34 - Granulometria a laser dos fíleres	82
Figura 35 - Curva granulométrica da composição da pesquisa.....	83
Figura 36 - Resultados do ensaio DUI	87
Figura 37 - Curva média carga x deslocamento das misturas não condicioandas....	89
Figura 38 - Curva média carga x deslocamento das misturas condicionadas.....	89
Figura 39 - Comparação dos P _{máx} e Relação Condicionado/Não Condicionado das misturas.....	90
Figura 40 - Comparação das Gf e Relação Condicionado/Não Condicionado das misturas.....	93
Figura 41 - Curvas Carga x Deslocamento das misturas não condicionadas e condicionadas	96
Figura 42 - Comparação dos IF e Relação Condicionado/Não Condicionado das misturas.....	98
Figura 43 - Comparação dos δ crítico e Relação Condicionado/Não Condicionado das misturas.....	99

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classificação de Basicidade de Rochas.....	25
Quadro 2 - Variáveis envolvidas na pesquisa	47
Quadro 3 - Ensaio de caracterização dos agregados e laboratórios utilizados	49
Quadro 4 - Ensaio de caracterização dos fíleres e laboratórios utilizados	55
Quadro 5 - Misturas da Pesquisa	58
Quadro 6 - Critério de Compactação para o CGS.....	59
Quadro 7 - Valores limites de características para misturas compactadas	60
Quadro 8 - Faixa granulométrica pelo DNIT 031/2006-ES	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades Físicas do Granito.....	28
Tabela 2 - Composição Química do Granito	28
Tabela 3 - Propriedades Físicas da EFRA	29
Tabela 4 - Composições Químicas da EFRA.....	29
Tabela 5 - Especificações do CAP 30/45 utilizado na pesquisa.....	48
Tabela 6 - Classificação proposta por Al Rousan (2004)	53
Tabela 7 - Classificação proposta por Ibiapina (2018)	54
Tabela 8 - Caracterização geral dos agregados.....	73
Tabela 9 - Classificação AIMS dos agregados.....	77
Tabela 10 - Resultados do FRX da EFRA.....	80
Tabela 11 - Massas específicas dos fileres	80
Tabela 12 - Resultados do FRX dos fileres.....	82
Tabela 13 – Teores ótimos de projeto e parâmetros volumétricos das misturas.....	84
Tabela 14 - Volume de vazios dos corpos-de-prova	85
Tabela 15 – Resultados do ensaio DUI.....	86
Tabela 16 - ANOVA - Influência dos agregados e do condicionamento no $P_{máx}$	92
Tabela 17 - ANOVA - Influência dos fileres e do condicionamento no $P_{máx}$	93
Tabela 18 - ANOVA - Influência dos agregados e do condicionamento no G_f	97
Tabela 19 - ANOVA - Influência dos fileres e do condicionamento no G_f	97
Tabela 20 - ANOVA - Influência dos agregados e do condicionamento no IF	100
Tabela 21 - ANOVA - Influência dos fileres e do condicionamento no IF.....	100
Tabela 22 - ANOVA - Influência dos agregados e do condicionamento no $\delta_{crítico}$	101
Tabela 23 - ANOVA - Influência dos fileres e do condicionamento no $\delta_{crítico}$	101
Tabela 24 - Resultados do $P_{máx}$ por corpo-de-prova.....	120
Tabela 25 - Resultados do G_f por corpo-de-prova	121
Tabela 26 - Resultados do IF por corpo-de-prova.....	121
Tabela 27 - Resultados do $\delta_{crítico}$ por corpo-de-prova	122

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AIMS	<i>Aggregate Image Measurement System</i>
Alig	Área de Ligamento
AN	Agregado Natural
B0	Brita 0
B1	Brita 1
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CGS	Compactador Giratório <i>Superpave</i>
COV	Coefficiente de Variação
DMT	Densidade Máxima Teórica
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagens
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes
DRX	Difratograma de Raio-X
DUI	Dano por Umidade Induzida
EFRA	Escória de Alto-Forno Resfriada ao Ar
EP	Precipitador Eletrostático
FGD	<i>Flue Gas Desulfurization</i>
FRX	Fluorescência de Raio-X
Gf	Energia de Fratura
Gmb	Densidade Aparente da Mistura
ICT	<i>Illinois Center for Transportation</i>
IF	Índice de Flexibilidade
LD	<i>Linz-Donawitz</i>
m	Inclinação da curva pós-pico
MAC	Mistura Asfáltica Completa
MAF	Matriz de Agregados Finos
NBR	Norma Brasileira
NM	Norma Mercosul
PDI	Processamento Digital de Imagem
Pmáx	Carga Máxima de Ruptura
RBV	Relação Betume/Vazios

REDUC	Refinaria Duque de Caxias
RRT	Resistência à Tração Retida
RT	Resistência à Tração
RTc	Resistência à Tração Condicionada
SCB	<i>Semi-Circular Bending Tests</i>
VAM	Vazio de Agregado Mineral
Vv	Volume de Vazios
Wf	Trabalho de Fratura
δ	Deslocamento Crítico

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO DA PESQUISA E JUSTIFICATIVA.....	17
1.2. OBJETIVOS	21
1.2.1. Objetivos Gerais.....	21
1.2.2. Objetivos Específicos.....	21
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	22
2. REVISÃO DE LITERATURA	23
2.1. BREVE INTRODUÇÃO SOBRE A IMPORTÂNCIA ECONÔMICA E AS CONDIÇÕES ATUAIS DOS PAVIMENTOS ASFÁLTICOS	23
2.2. EFEITOS DOS CONSTITUINTES DA MISTURAS ASFÁLTICAS NO DANO POR UMIDADE E NA RESISTÊNCIA A FRATURA.....	24
2.2.1. A influência dos agregados no desempenho das misturas.....	24
2.2.2. A influência do fíler no desempenho das misturas.....	30
2.3. CONTRIBUIÇÃO DE PESQUISAS RECENTES SOBRE O ESTUDO DO DANO POR UMIDADE EM MISTURAS ASFÁLTICAS	32
2.4. CONTRIBUIÇÃO DE PESQUISAS RECENTES SOBRE O ESTUDO DA RESISTÊNCIA À FRATURA UTILIZANDO O ENSAIO SCB	35
3. ABORDAGEM METODOLÓGICA	44
3.1. MATERIAIS.....	44
3.1.1. Ligante Asfáltico.....	44
3.1.2. Agregados.....	44
3.1.3. Fíleres	45
3.2. PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	46
3.3. VARIÁVEIS DA PESQUISA	46
3.4. MÉTODOS	47
3.4.1. Caracterização dos materiais.....	47

3.4.2. Definição das misturas asfálticas estudadas	56
3.4.3. Dosagem das misturas asfálticas	58
3.4.4. Preparação dos corpos-de-prova.....	62
3.4.5. Dano por umidade induzida (DUI) – DNIT 180/2018-ME	65
3.4.6. Ensaio de Fratura com Geometria Semicircular Estático (SCB).....	66
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	73
4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	73
4.1.1. Agregados Naturais e Siderúrgicos.....	73
4.1.2. Fíleres	80
4.2. DOSAGEM DAS MISTURAS ASFÁLTICAS	83
4.3. PARÂMETROS VOLUMÉTRICOS DOS CPS PARA ENSAIOS MECÂNICOS ..	84
4.4. ENSAIO DE DANO POR UMIDADE INDUZIDA (DUI) – DNIT 180/2018-ME	85
4.5. ENSAIO DE FRATURA COM GEOMETRIA SEMICIRCULAR (SCB)	88
4.5.1. Carga máxima de ruptura ($P_{m\acute{a}x}$).....	90
4.5.2. Energia de fratura (G_f).....	93
4.5.3. Índice de Flexibilidade (IF) e Deslocamento Crítico ($\delta_{cr\acute{i}tico}$).....	97
5. CONCLUSÕES	102
5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	104
REFERÊNCIAS	106
APÊNDICE A – Imagens dos corpos-de-prova antes e depois do ensaio de fratura SCB.....	116
APÊNDICE B – Tabelas de resultados dos parâmetros de fratura por corpo-de-prova	120

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO DA PESQUISA E JUSTIFICATIVA

O Brasil possui um total de 1.720.035 km de rodovias, e apenas 213.601 km dessas são consideradas como pavimentadas, isto é, apenas 12,4% possuem todas as camadas geralmente necessárias para uma estrutura de pavimento – sub-base, base e camada de revestimento. A maioria das rodovias brasileiras pavimentadas é construída de pavimentos flexíveis, empregando concreto asfáltico como material em suas camadas de rolamento. Destas, 52,4% classificam-se como regular, ruim ou em péssimas condições, precisando passar por manutenções, restaurações ou até mesmo por uma reconstrução total das vias (CNT, 2020). Esses dados revelam a necessidade de um estudo cada vez mais aprofundado das estruturas de pavimentos, dos materiais e soluções de pavimentação para assegurar o bom desempenho dos pavimentos.

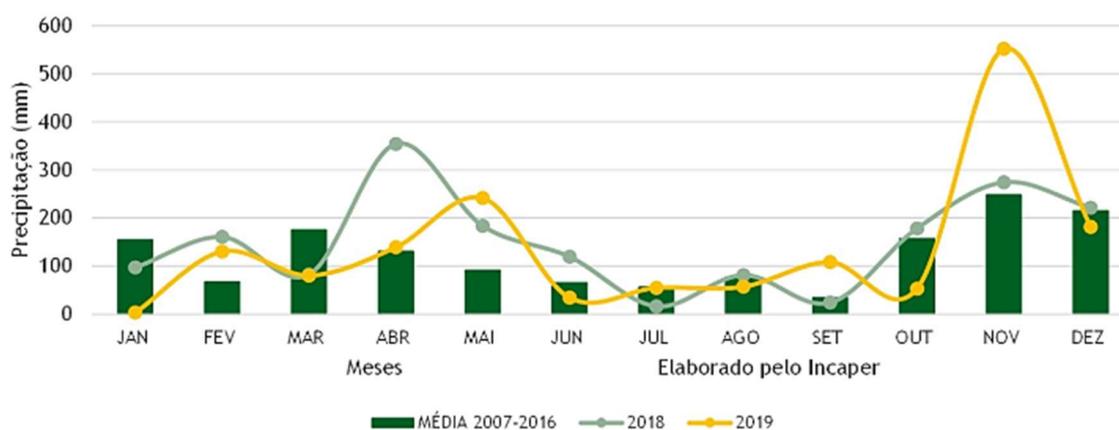
A situação precária encontrada nas rodovias brasileiras é decorrente principalmente das condições da pavimentação, que é resultado das diversas manifestações patológicas presentes nas mesmas, como trincas, fendas, afundamentos, ondulações, escorregamentos, exsudações, desgastes, panelas e remendos (BERNUCCI *et al.*, 2008). Uma das formas mais severas de deterioração do concreto asfáltico ocorre, pela presença da água em seu meio, podendo resultar no aparecimento de múltiplas manifestações patológicas e conseqüente redução da vida útil do pavimento (KIM *et al.*, 2008).

O dano por umidade em misturas asfálticas pode ser desencadeado por meio da infiltração da água da superfície, da capilaridade das águas subterrâneas ou pela difusão de vapor de água (ABUAWAD; AL-QADI; TREPANIER, 2015; MASAD *et al.*, 2007). A água pode penetrar no concreto asfáltico pelas trincas dos pavimentos, sendo disseminada para seu interior por meio da interconectividade do sistema de vazios, ou até mesmo pela pressão das águas subterrâneas, que também podem encontrar trincas que possibilitarão sua ascensão nas camadas de rolamento das vias (HAMZAH; KAKAR; HAININ, 2015).

O Brasil é um país de dimensões continentais apresentando em toda sua extensão climas variados, porém, em sua predominância, possui o clima tropical e equatorial,

com características chuvosas. Como exemplo, apresentam-se na Figura 1 as médias das precipitações dos anos de 2007-2016, assim como as precipitações dos anos de 2018 e 2019 na região de Vitória - ES, local em que o presente estudo foi realizado, e é possível verificar que as precipitações alcançaram uma média máxima de aproximadamente 250 mm, podendo ainda ocorrer esporadicamente meses com marcas superiores como 350 mm no mês de abril de 2018 e 550 mm no mês de novembro de 2019. Constata-se assim, que os pavimentos brasileiros são bastante solicitados pelas chuvas e, conseqüentemente, tendem a apresentar danos por umidade recorrentes.

Figura 1 - Comparativo de precipitações mensais na Estação Meteorológica de Vitória/ES



Fonte: INCAPER (2021)

Cala *et al.* (2019) definem dano por umidade como sendo a perda da capacidade estrutural dos materiais constituintes do concreto asfáltico devido a presença de água em meio a sua estrutura. O dano por umidade resultará em mecanismos de fraturas que levarão às conseqüentes manifestações patológicas. Essas fraturas podem ser coesivas – ocorrendo pela propagação de trincas na matriz de agregados finos, ou adesiva – ocorrendo na interface ligante-agregado (KIM *et al.*, 2008).

Para prevenir o dano por umidade, alguns estudos analisam o uso de diferentes melhoradores de adesividade, sejam eles aditivos químicos (PRADO; NASCIMENTO; GENARO, 2018), fileres (KIM; PINTO; PARK, 2012) e o mais usual, cal hidratada (BRASIL, 2018a; MOGHADAS NEJAD; HAMED; AZARHOOSH, 2013; KIM *et al.*, 2008).

Uma das grandes dificuldades dos estudos de dano por umidade está em determinar quais propriedades físicas ou químicas tem maior influência na ocorrência das fraturas, uma vez que esses mecanismos ainda não foram totalmente compreendidos

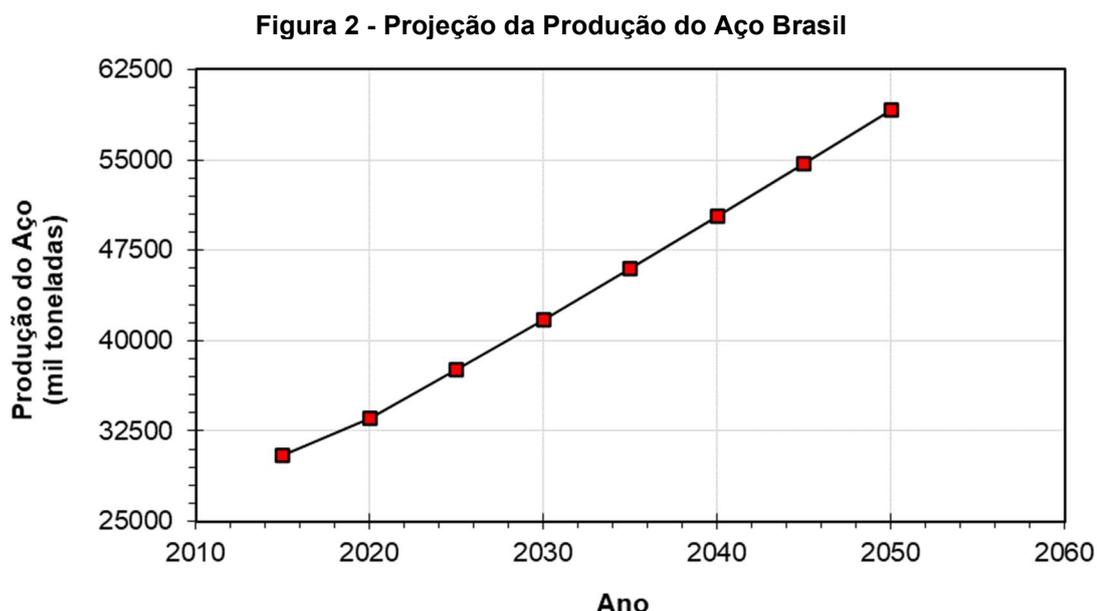
(LUCAS JÚNIOR; BABADOPULOS; SOARES, 2019; ABUAWAD; AL-QADI; TREPANIER, 2015). Kim *et al.* (2008) ainda dizem que ocorre uma interação sinérgica nesse sistema ligante-agregado, o que dificulta a compreensão da identificação das causas de fratura em matrizes asfálticas.

Outra preocupação abordada nesta pesquisa é a grande necessidade do uso de agregados na pavimentação. Considerando a extensa malha rodoviária, o uso cada vez mais intenso de agregados naturais é preocupante, uma vez que este é utilizado tanto nas construções quanto na manutenção e/ou restaurações das rodovias.

A produção anual de brita no país supera a marca de 210 milhões de toneladas (BRASIL, 2018b). Essas atividades de extração de materiais naturais de fontes não renováveis, tanto a remoção de blocos de rochas como a mineração de areias de rios, resultam no desequilíbrio ecológico, por isso se torna recomendável a limitação de seu uso e a busca por materiais alternativos para sua substituição (JAVALI *et al.*, 2017). Como alternativa, tem-se difundido cada vez mais o uso de resíduos gerados nas indústrias siderúrgicas como agregados, sendo, portanto, denominados de agregados siderúrgicos (MOURA *et al.*, 2020; MOURA *et al.*, 2019; RONDÓN-QUINTANA; RUGE-CÁRDENAS; DE FARIAS, 2019; RONDON-QUINTANA *et al.*, 2018; CHEN *et al.*, 2018; MARTINHO; PICADO-SANTOS; CAPITÃO, 2018; CHEN *et al.*, 2014).

A indústria siderúrgica vem crescendo a cada ano, e, de acordo com a perspectiva da produção do aço no Brasil até 2050, apresentada na Figura 2, tende a continuar em pleno crescimento. Em decorrência disso, tem-se a geração de muitos resíduos e coprodutos, portanto, é imprescindível que haja um gerenciamento cada vez mais eficiente desses resíduos (BRASIL, 2017).

A produção do aço passa por algumas etapas, a primeira delas é a preparação da carga, onde ocorre a sinterização do minério de ferro e a coqueria do carvão mineral. Após essa etapa, o material é levado ao alto forno, etapa chamada de redução, em que a inserção de um fundente permite a separação de um coproduto, a escória de alto forno, do ferro gusa. Em seguida o ferro gusa passa para a etapa de refino, também conhecida como aciaria, onde são geradas as escórias de aciarias e o aço bruto (IABr, 2019).



Fonte: Adaptado de BRASIL (2017)

A escória de alto forno, gerada na etapa de redução, é dividida em duas diferentes escórias a depender do tipo de resfriamento que lhe é empregado. Quando resfriada de maneira brusca, adquire um potencial hidráulico e recebe o nome de Escória Granulada de Alto Forno - EGAF; já quando não há um controle no resfriamento, ou seja, a escória é resfriada ao ar, tornando-se não reativa e recebe o nome de Escória de Alto Forno Resfriada ao Ar - EFRA (IABr, 2019).

O estudo da EFRA como agregado alternativo para produção de misturas asfálticas já vem sendo realizado (MOURA *et al.*, 2020; MOURA *et al.*, 2019; RONDÓN-QUINTANA *et al.*, 2018; RONDÓN-QUINTANA; RUGE-CÁRDENAS; DE FARIAS, 2019). A norma DNIT 031/2006-ES apresenta alguns requisitos de desempenho para o uso de agregados na pavimentação asfáltica sendo alguns deles a adesividade do agregado ao ligante betuminoso e o dano por umidade induzida nos pavimentos. No Brasil são adotadas metodologias empíricas para a avaliação desses requisitos a fim de conhecer as características dos materiais.

No entanto, o estudo de Moura *et al.* (2019) mostrou que a substituição parcial de agregado natural por EFRA resultou em misturas asfálticas com valores de resistência à tração retida inferiores ao recomendado na norma DNIT 031/2006-ES, indicando susceptibilidade destas ao dano por umidade induzida. Os autores também mostraram que a EFRA possui algumas características químicas, morfológicas e termodinâmicas que afetam a adesividade do agregado ao ligante. Acredita-se que estas características afetam, conseqüentemente, a resistência à fratura das misturas.

Assim, a presente pesquisa tem como propósito avaliar como as características diferenciadas de agregados e fíleres podem afetar a adesividade agregado-ligante e, conseqüentemente, os efeitos destas na resistência à fratura das misturas. Ao final, busca-se uma melhor compreensão dos parâmetros de fratura e a correlação destes com as características intrínsecas dos agregados, principalmente àquelas relacionadas à adesividade agregado-ligante.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivos Gerais

A presente pesquisa tem por objetivo investigar a influência das características físicas, químicas, mineralógicas e morfológicas de agregados naturais graníticos e siderúrgicos, bem como de fíleres nas propriedades de fratura de misturas asfálticas sujeitas ao dano por umidade.

1.2.2. Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo geral, faz-se necessário atingir os seguintes objetivos específicos:

- Avaliar se a substituição parcial (25%) de agregado natural por agregado EFRA altera a resistência à tração retida das misturas asfálticas;
- Avaliar se a adição de 2% de fíleres com diferentes composições químicas e mineralógicas podem melhorar a resistência à tração retida das misturas contendo EFRA;
- Avaliar como a substituição parcial (25%) de agregado natural por agregado EFRA e as adições de diferentes fíleres alteram os parâmetros de fratura em amostras com e sem condicionamento de umidade;
- Analisar quais parâmetros de fratura estão mais susceptíveis a alterações devido ao dano por umidade;
- Investigar quais características intrínsecas de cada constituinte da mistura tem maior correlação com os parâmetros de fratura estudados.

1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação está estruturada em cinco capítulos. No Capítulo 1, contém a introdução na qual constam a justificativa da escolha do tema, os objetivos da dissertação e a estrutura da dissertação.

No Capítulo 2 é apresentada uma revisão de literatura referente a tópicos importantes para o entendimento de conceitos de pavimentos flexíveis, dos danos devido a umidade em pavimentos asfálticos, da influência dos constituintes da mistura asfáltica e por fim, um pouco sobre a contribuição de pesquisas encontradas na literatura sobre temas afins.

No Capítulo 3 trata dos materiais utilizados na pesquisa, sobre sua obtenção e caracterização, a combinação das misturas e o processo de dosagem, a confecção dos corpos-de-prova, assim como os procedimentos experimentais necessários para obtenção de dados que foram analisados na pesquisa. Neste capítulo também é apresentado o programa experimental e as variáveis da pesquisa.

No Capítulo 4, são apresentados e discutidos os resultados obtidos em cada etapa experimental detalhada no Capítulo 3.

E finalmente, no Capítulo 5 são abordadas as principais conclusões e algumas recomendações para a continuidade da pesquisa em trabalhos futuros.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. BREVE INTRODUÇÃO SOBRE A IMPORTÂNCIA ECONÔMICA E AS CONDIÇÕES ATUAIS DOS PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

A maioria das rodovias brasileiras são projetadas com pavimentos flexíveis, ou seja, em suas camadas de rolamento são utilizados concretos asfálticos. Esta camada é responsável por receber diretamente todas as cargas provenientes dos veículos que trafegam sobre ela e levá-las às suas camadas adjacentes – base, sub-base e subleito, além do mais, precisam ser resistentes às ações da natureza (BERNUCCI *et al.*, 2008).

De acordo com o Boletim Estatístico da Confederação Nacional de Transportes (CNT, 2020), no Brasil as rodovias são responsáveis por 61,1% da movimentação anual de transporte de cargas, e tem uma participação de 50% de todo o transporte de passageiros. Segundo a CNT (2018), do ano 2009 ao ano 2017 houve um crescimento de 65,4% da frota, o que leva a perceber que o setor está em crescente demanda, acentuando assim sua importância econômica para o país.

Apesar de toda a importância econômica que as rodovias possuem para o Brasil, 52,4% dos 213.601 km pavimentados classificam-se, quanto a situação de uso, como regular, ruim ou péssima (CNT, 2020). Nota-se, portanto, que há uma deficiência quanto à manutenção das vias e possíveis problemas decorrentes de seu mal uso, como o tráfego de veículos com cargas superiores às de projeto. Também pode-se citar como causas de suas deficientes condições de uso a escolha inapropriada de materiais para compor as camadas de pavimento, falhas no processo construtivo ou na análise da estrutura do solo que receberá o pavimento, ou ainda no dimensionamento.

A norma DNIT 005/2003–TER apresenta os principais danos observados nos pavimentos asfálticos denominando-os como fendas, afundamentos, corrugações ou ondulações, escorregamentos, exsudações, desgastes, painelas e remendos. Esses danos são ocasionados por meio de deformações permanentes e/ou pelo trincamento dos pavimentos.

Ao serem solicitados, os pavimentos tendem a dissipar a energia por meio da deformação, e quando o pavimento atinge sua capacidade máxima de deformação,

começam a surgir as trincas. Quanto maior for a ductilidade da mistura asfáltica, maior será sua capacidade de deformação, e quanto mais rígida ela for, mais susceptível ao trincamento será. Ou seja, um grande desafio ao se projetar misturas asfálticas é conseguir uma mistura que seja capaz de resistir tanto às deformações permanentes quanto ao trincamento.

2.2. EFEITOS DOS CONSTITUINTES DA MISTURAS ASFÁLTICAS NO DANO POR UMIDADE E NA RESISTÊNCIA A FRATURA

As trincas presentes na camada de rolamento de pavimentos flexíveis podem ser definidas como degradações do revestimento, permitindo a entrada de água nas camadas subjacentes e, conseqüentemente, provocando o enfraquecimento da estrutura (FONTES *et al.*, 2009).

Huang *et al.* (2010) afirmam que uma das principais preocupações em relação aos pavimentos asfálticos é o excesso de água. A presença da água pode levar a deterioração do concreto asfáltico, resultando no surgimento e na aceleração do desenvolvimento das manifestações patológicas, diminuindo a vida útil do pavimento, (KAKAR; HAMZAH; VALENTIN, 2015; KIM *et al.*, 2008).

Os danos da ação da água nos pavimentos asfálticos são a redução da rigidez e a redução da resistência estrutural. Esses danos são originados pelas fraturas adesivas e coesivas, que são a perda de adesão entre o ligante e o agregado, e/ou perda de coesão do ligante asfáltico, respectivamente (ABUAWAD; AL-QADI; TREPANIER, 2015; ZHANG *et al.*, 2015; CUI *et al.*, 2014).

Diversos fatores contribuem para o desenvolvimento de danos devido à umidade, destacando-se: (i) o tipo de agregado empregado nas misturas asfálticas; (ii) o tipo de ligante asfáltico utilizado na produção das misturas; (iii) a dosagem de misturas e a execução da camada de revestimento; (iv) o nível do tráfego; (v) as condições ambientais de onde o pavimento está inserido (GORKEM; SENGOZ, 2009).

2.2.1. A influência dos agregados no desempenho das misturas

Aproximadamente 94% dos pavimentos asfálticos são constituídos de agregados, e são necessários cerca de 9,8 mil toneladas de agregados para a construção de apenas 1 km de estrada pavimentada, o que faz do setor rodoviário um consumidor

potencial deste recurso (ANEPAC, 2015; BAGAMPADDE; ISACSSON; KIGGUNDU, 2005).

O agregado para ser utilizado nos serviços de pavimentação precisa ter algumas características tais como distribuição granulométrica bem graduada, forma rugosa e angularidade mediana, baixa absorção de água, resistência ao choque e ao desgaste, durabilidade, ausência de impurezas, e a adesividade ao ligante satisfatória (PINTO; PINTO, 2019).

Com relação ao dano por umidade de misturas asfálticas, o conhecimento das características de adesividade agregado-ligante são fundamentais. As propriedades de adesão entre o ligante e o agregado não dependem exclusivamente das características dos ligantes, elas também variam de acordo com a origem e mineralogia do agregado utilizado (AGUIAR-MOYA *et al.*, 2018; ZHANG *et al.*, 2015). Baseado nisso, Cala *et al.* (2019) concluíram em suas pesquisas que em geral agregados de caráter básico possuem uma melhor adesividade ao ligante asfáltico do que os agregados de caráter ácido.

A basicidade de uma rocha é medida de acordo com o teor de sílica que ela possui. No Quadro 1 é apresentada a classificação das rochas quanto à presença do óxido de silício.

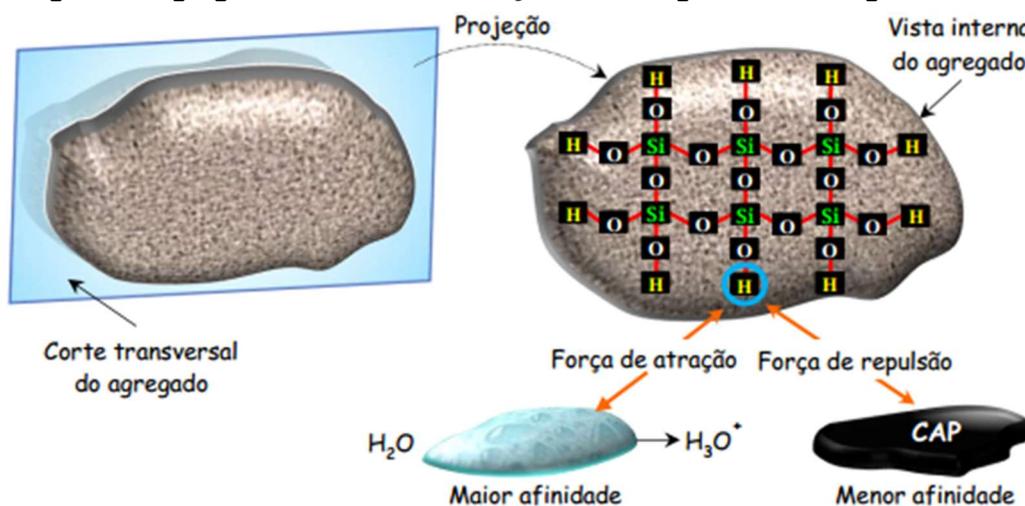
Quadro 1 - Classificação de Basicidade de Rochas

CLASSIFICAÇÃO	% SÍLICA (SiO ₂)	EXEMPLO
Ácida	> 65	Granito, Riólito, Quartzito
Neutra	52 a 65	Sienito, Diorito
Básica	45 a 52	Basalto. Gabro
Ultrabásica	< 45	Piroxênio

Fonte: Adaptado de BERNUCCI *et al.* (2008)

Quando um agregado possui caráter ácido, ele possui a presença de grupos silanol (Si-OH) polares em sua superfície, que reagem com a água e liberam íons de hidrogênio (H⁺) o que os tornam carregados negativamente. Essas cargas negativas geram uma força de repulsão com o ligante asfáltico, apolar e de caráter ácido, e uma força de atração com a água (DONG *et al.*, 2017; HARNISH, 2010; BAGAMPADDE; ISACSSON; KIGGUNDU, 2005). Na Figura 3 é ilustrada essa interação entre o agregado com elevado teor de sílica, a água e o ligante asfáltico.

Figura 3 - Agregado ácido e sua interação entre a água e entre o ligante asfáltico



Fonte: Lucas Júnior (2018)

Zhang *et al.* (2015) e Cui *et al.* (2014) analisaram a relação da composição química existente nos agregados com a sua capacidade de adesividade ao ligante asfáltico em condições de umidade, constatando que agregados com uma maior presença de CaO estão menos propícios a danos devido a umidade que aqueles onde o SiO₂ é preponderante.

Por meio de ensaios e análises estatísticas, Cala *et al.* (2019) chegaram à conclusão que agregados com a presença de óxidos como Al₂O₃, Fe₂O₃, MgO, e MnO ajudam na prevenção do dano devido a umidade na mistura, enquanto os agregados com a presença de SiO₂ proporciona um efeito de intensificação deste dano.

Zhang *et al.* (2018) avaliaram indiretamente a adesividade por meio da interação ligante-agregado, analisando as propriedades reológicas de mastiques produzidos com fileres de agregados de calcário e basalto, que possuem respectivamente elevados teores de CaO e SiO₂. Foi realizado o ensaio de varredura de frequência e verificado que houve um aumento no valor dos módulos complexos e uma redução nos ângulos de fase nos mastiques com teores de CaO em detrimento aos mastiques com SiO₂, concluindo que há uma maior interação do ligante asfáltico com o agregado calcário.

Airey *et al.* (2008) estudaram a influência dos agregados na mistura asfáltica, comparando diferentes agregados (granito e calcário) com adições de fileres calcário, cal hidratada e fíler granito. Os autores verificaram que misturas com agregado calcário tiveram uma maior resistência aos danos devido à umidade que as com agregado granítico.

O Brasil possui uma área territorial de 8.511.00 km² e obtém uma grande diversidade de rochas em toda sua extensão. Tanto rochas ígneas, quanto metamórficas e sedimentares são encontradas ao longo do território brasileiro. Segundo o Anuário Brasileiro Mineral (2010), no estado do Espírito Santo são encontradas as maiores jazidas de granito (rocha ígnea) do país, enquanto as de mármore (rocha metamórfica) pertencem ao Ceará. Já as maiores jazidas de calcário (rocha sedimentar) do país ficam no estado de Minas Gerais.

Como nesta pesquisa foram utilizados agregados naturais de origem granítica, visto que o granito é a rocha predominante no estado do Espírito Santo e o mais utilizado pelas usinas locais, e agregado siderúrgico EFRA, coproduto da produção do aço, destacam-se a seguir as características destes materiais.

a. Agregado Natural (Granítico)

A rocha granítica é uma rocha ígnea intrusiva, isto é, uma rocha proveniente da atividade vulcânica e endurecida internamente à crosta terrestre, de forma lenta, formando minerais cristalinos com grãos médios e grossos. Os principais minerais desta rocha são o quartzo, o feldspato e a mica, sendo o primeiro o maior responsável pelo alto teor de sílica presente nesta rocha, dando a ela características de uma rocha félsica, ou seja, uma rocha com caráter ácido (KUDO, 2021).

O granito é uma rocha que, em geral, possui boas propriedades mecânicas. A resistência à abrasão de um agregado é dada pela perda de massa ocorrida após este material ser condicionado a uma situação de impacto ou desgaste, sendo que quanto menor for essa perda, maior é a resistência à abrasão do agregado. No entanto, estudos realizados com agregados graníticos extraídos no estado no Espírito Santo reportaram resultados de perda de massa por abrasão variando de 41% a 45%. Estes valores são elevados, mostrando uma baixa resistência à abrasão dos agregados locais, porém ainda assim atendendo ao limite de 50% de perda por abrasão permitido pela norma DNIT 031/2006-ES para agregados utilizados para pavimentação (MOURA, 2020; JOAQUIM, 2019; NEPOMUCENO, 2019; SCHUMACHER, 2018).

Na Tabela 1 são mostradas propriedades de absorção de água e massa específica de granitos da região encontradas na literatura, assim como de outras localidades do Brasil e do mundo. Percebe-se que independentemente do local de extração, a rocha

granítica possui uma baixa absorção de água com valores inferiores a 1%, e massa específica variável de 2,65 a 2,88 g/cm³.

Tabela 1 - Propriedades Físicas do Granito

PROPRIEDADES FÍSICAS	MOURA (2020)	NEPOMUCENO (2019)	SCHUMACHER (2018)	CHEN et al. (2014)	COUINHO (2012)	ONOFRE et al. (2011)
Absorção de Água (%)	0,73	0,49	0,58	0,60	0,99	0,62
Massa Específica Real (g/cm ³)	2,88	2,81	2,86	2,72	2,65	2,66

Fonte: Autor

No entanto, a composição química deste tipo de rocha, com alto teor de sílica, pode ser preocupante quando seu uso é destinado a produção de agregados britados para composição de misturas asfálticas. Na Tabela 2 são dadas composições químicas de granitos estudados por outros autores, ratificando a presença de um alto teor de sílica.

Tabela 2 - Composição Química do Granito

ÓXIDOS	ABANDANSARI e MODARRES (2017)	ALMEIDA et al. (2006)	VIEIRA et al. (2004)
SiO ₂ (%)	68,10	72,67	63,51
CaO (%)	2,40	1,37	3,48
Al ₂ O ₃ (%)	14,80	12,86	18,81
FeO ou Fe ₂ O ₃ (%)	1,40	2,56	4,44
MgO (%)	0,80	0,27	1,24
Na ₂ O (%)	-	3,26	-
K ₂ O (%)	-	4,86	-
MnO (%)	-	0,04	-
TiO ₂ (%)	-	0,35	0,59

Fonte: Autor

b. Agregado Siderúrgico (EFRA)

A escória de alto-forno resfriada ao ar é um coproduto gerado na etapa de redução da produção do aço. Este material possui uma estrutura cristalina devido ao seu processo lento de resfriamento, o que permite que suas moléculas se organizem formando cristais, resultando em uma estrutura não reativa, e diferentemente de outras escórias, a EFRA não é expansiva.

Este coproduto apresenta propriedades mecânicas relevantes, como a alta resistência à abrasão. Estudos de Moura (2020) e Silva, Costa e Fialho (2018), realizados com EFRA geradas no estado no Espírito Santo, mostram resistências a abrasão Los

Angeles de 36,3% e 25,13%, respectivamente. Além da boa resistência a abrasão que a EFRA possui, seu formato voltado para o angular gera um ângulo de atrito elevado, tornando-a um material atrativo para o uso na pavimentação (WANG, 2016).

Na Tabela 3 são apresentadas algumas propriedades físicas da escória de alto-forno resfriada ao ar geradas no estado do Espírito Santo, e em outras localidades do mundo, como Colômbia e Holanda, segundo autores. Notou-se que as absorções de água dos materiais encontraram-se entre 2,73% e 5,57%, enquanto as massas específicas real variaram de 2,11 a 2,67 g/cm³.

Tabela 3 - Propriedades Físicas da EFRA

PROPRIEDADES FÍSICAS	MOURA (2020)	SILVA <i>et al.</i> (2018)	RONDÓN-QUINTANA <i>et al.</i> (2019)	RONDÓN-QUINTANA <i>et al.</i> (2018)	AKBARNEJAD <i>et al.</i> (2014)
Absorção de Água (%)	5,23	3,30	5,57	2,73	2,99
Massa Específica Real(g/cm ³)	2,67	2,65	2,39	2,11	2,65

Fonte: Autor

São mostradas, na Tabela 4, composições químicas de escórias de alto-forno estudadas em algumas pesquisas.

Tabela 4 - Composições Químicas da EFRA

ÓXIDOS	MOURA <i>et al.</i> (2020)	RONDÓN-QUINTANA <i>et al.</i> (2019)	DAS <i>et al.</i> (2007)
SiO ₂ (%)	32,40	32,90	37,10
CaO (%)	41,20	47,90	37,40
Al ₂ O ₃ (%)	9,30	8,90	9,15
Fe ₂ O ₃ (%)	2,70	2,40	1,05
K ₂ O (%)	0,32	0,40	-
MgO (%)	5,20	5,70	11,70
MnO (%)	0,55	-	-
Na ₂ O (%)	0,28	-	-
P ₂ O ₅ (%)	0,10	0,60	-
TiO ₂ (%)	0,49	0,50	-
SO ₃ (%)	4,50	-	0,37

Fonte: Autor

É possível notar que o coproduto EFRA possui o CaO com o maior teor entre os óxidos presentes na composição, sendo seguido pelo SiO₂. Esses teores de óxido o classificam como uma escória básica uma vez que a relação CaO/SiO₂ > 1 (SILVA; BATTAGIN; GOMES, 2017). Apesar dessa classificação, na pesquisa de Moura *et al.* (2020) foi realizado o ensaio de energia de superfície no agregado EFRA e verificado

que este não possui boa afinidade com o ligante asfáltico. Com isso possível que outras características deste agregado contribuam para a sua baixa adesividade.

Moura *et al.* (2020) estudaram misturas com 75% de agregados naturais e 25% de agregados siderúrgicos EFRA com adições de fíleres tais como a cal hidratada, o pó FGD e o pó EP, além de misturas com 75% de agregados naturais e 25% de agregados siderúrgicos LD. Em seus estudos os autores analisaram a adesividade ligante-agregado e chegaram à conclusão de que o teor de sílica presente na EFRA aproxima o comportamento das misturas com este agregado siderúrgico ao comportamento de misturas com agregados graníticos, isto é, as misturas apresentaram baixa adesividade. Além disso verificaram que a mistura com o agregado LD, devido ao teor de óxido de ferro presente neste, resultou em uma boa adesividade.

2.2.2. A influência do fíler no desempenho das misturas

O fíler é um material de enchimento, preenchendo os vazios entre os agregados graúdos e miúdos, o que contribui para o melhor empacotamento da mistura asfáltica. Esse material modifica a trabalhabilidade da mistura, a resistência ao dano por umidade e a resistência ao envelhecimento (BARDINI; KLINSKY; FERNANDES, 2009). Além do efeito de preenchimento dos fíleres, pesquisadores ainda discutem que estes, a depender de sua granulometria, quando possuem elevada finura, podem se misturar ao ligante formando o masticue, modificando a reologia do ligante (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Vários autores demonstraram que a interação entre o ligante asfáltico e os fíleres tem um impacto relevante nas propriedades e no desempenho das misturas asfálticas (GUO; BHASIN; TAN, 2017).

Desde os anos 70, pesquisas mostram que não é apenas a granulometria dos fíleres que modificam o ligante, mas também suas interações físico-químicas (ANDERSON; GOETZ, 1973).

As propriedades dos fíleres influenciam nas características dos ligantes e conseqüentemente no desempenho da mistura asfáltica, sendo assim, geralmente os fíleres são adicionadas às misturas asfálticas para enrijecer o ligante, melhorando suas resistências (WANG *et al.*, 2011).

Alvarez, Ovalles e Caro (2012) ainda dizem que a qualidade da adesividade da mistura asfáltica vai depender não apenas das propriedades físicas do fíler utilizado, sua granulometria, seu teor de matéria orgânica ou sua morfologia, mas também por suas propriedades químicas e termodinâmicas.

A composição química do fíler é uma propriedade que pode afetar diretamente na qualidade da adesão entre o agregado e o ligante asfáltico, e a depender de sua composição, pode agir como um melhorador da adesividade.

Segundo Cala *et al.* (2019) alguns óxidos presentes em agregados, tais como Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , e MnO , permitem uma melhor adesividade ligante-agregado. Dessa forma, é possível que fíleres com a presença desses óxidos, misturados em agregados de caráter ácido geram uma película básica ao mesmo, ajudando assim na adesão entre os materiais da mistura (ZHANG *et al.*, 2017).

Propriedades termodinâmicas, como a energia de superfície livre, também são responsáveis pela adesividade de materiais. Esta propriedade é utilizada para quantificar o trabalho da força adesiva entre dois materiais. As interações coesivas e adesivas da mistura asfáltica estão diretamente ligadas à energia de superfície (ZAIDI *et al.*, 2019; ALVAREZ; OVALLES; CARO, 2012).

A energia de superfície portanto, não é uma medida diretamente ligada ao dano por umidade, mas sim uma medida utilizada para calcular a força de adesão entre o agregado e o ligante asfáltico de uma mistura em estado seco, assim como o potencial que a água tem de deslocar o ligante da superfície do agregado (CARO *et al.*, 2008). Devido isso, a energia de superfície livre, indiretamente se torna um parâmetro considerável de análise do dano à umidade.

Sakanlou, Shirmohammadi e Hamedi (2018) estudaram dois tipos de agregados (granito e calcário), quatro fíleres (pó de pedra, cal hidratada, carbonato de cálcio e cimento Portland) e dois tipos de ligantes (classificados por penetração em dm nos estudos como CAP 60/70 e CAP 85/100). Em suas análises, os autores investigaram os efeitos que cada fíler causavam no dano por umidade de vinte misturas combinadas, e chegaram à conclusão de que as misturas com cal hidratada (maior teor de CaO dos fíleres selecionados) resultaram nas maiores resistências ao dano por umidade, exceto para na mistura com granito e CAP 60/70.

Moghadas Nejad, Hamedi e Azarhoosh (2013) em seus estudos sobre a adição de cal hidratada em misturas asfálticas utilizando técnicas de energia de superfície livre para verificar o efeito dos danos por umidade, concluíram que a polaridade do agregado é reduzida com a adição da cal hidratada, diminuindo a tendência de adesão entre o agregado e a água, tendência essa que é responsável pelo dano por umidade.

Moura (2020) estudou o melhoramento de adesividade em misturas asfálticas produzidas parcialmente com o agregado siderúrgico EFRA, adicionando cal hidratada, pó FGD, pó EP como fíleres melhoradores de adesividade. A autora realizou o ensaio de DUI e percebeu que com a adição de qualquer dos fíleres estudados houve um incremento na resistência ao dano por umidade às misturas. Concluiu-se, portanto, que os efeitos químicos das adições foram preponderantes na melhora da adesividade ligante-agregado.

2.3. CONTRIBUIÇÃO DE PESQUISAS RECENTES SOBRE O ESTUDO DO DANO POR UMIDADE EM MISTURAS ASFÁLTICAS

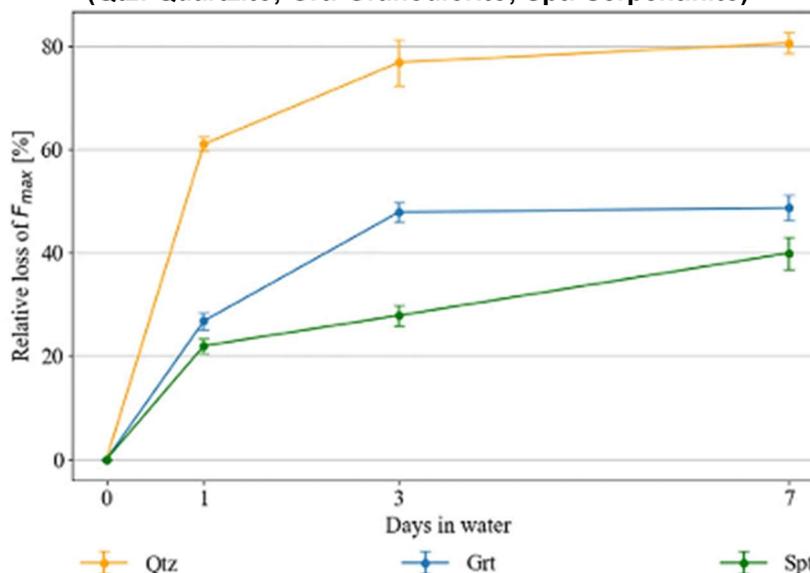
Diversos pesquisadores, ao longo dos anos, vêm estudando sobre o dano por umidade em misturas asfálticas. Nesta seção foram compiladas algumas pesquisas recentes sobre esses assuntos.

Cui *et al.* (2014) estudaram o dano devido à umidade em mastiques, avaliando quatro agregados com diferentes composições químicas e porosidades (calcário, mármore e dois granitos), e utilizando o ligante CAP 40/60. Os autores perceberam que em condições secas, ao submeterem o sistema ligante-agregado ao *peel test*, em que uma força de arrancamento é aplicada no sistema, ocorre uma fratura coesiva, enquanto a mistura em contato com a água, a fratura passa a se apresentar de forma adesiva. Além disso, os autores comprovaram que, tanto em estado seco quanto em estado úmido, os agregados básicos possuem melhores resistências de adesividade que os agregados ácidos.

Cala *et al.* (2019) verificaram a interação de três diferentes tipos de agregados (um quartzito, um granodiorito e um serpentinito) com o ligante asfáltico (CAP 60/70) em estado seco e condicionado em água por 1, 3 e 7 dias. A pesquisa teve por objetivo identificar a composição química dos agregados que mais afetavam a resistência ao dano por umidade. Para isso foi realizado um ensaio de arrancamento nas quatro

idades de condicionamento de umidade e analisados estatisticamente os resultados dos ensaios com as composições químicas dos agregados. Dessa forma, foi chegado à conclusão de que rochas com alto teor de sílica promovem o dano por umidade, enquanto rochas com maiores teores de óxidos de ferro, alumínio, magnésio e manganês aumentam a resistência a este dano. Na Figura 4 é possível verificar a perda relativa da força máxima necessária para desprender o ligante dos agregados nas diferentes idades de condicionamento em água.

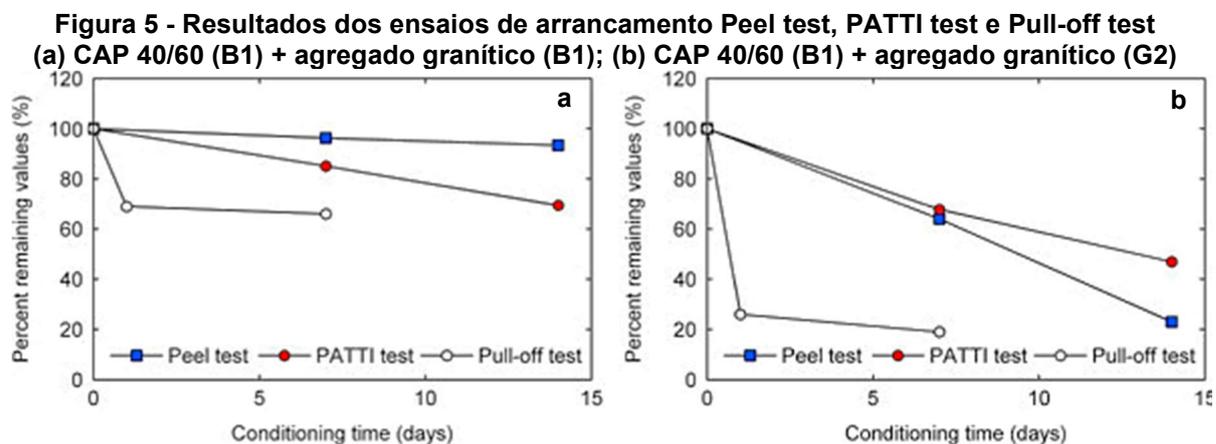
Figura 4 - Perda relativa da F_{max} na interface ligante-agregado nas idades condicionadas (Qtz: Quartzito; Grt: Granodiorito; Spt: Serpentinito)



Fonte: Cala *et al.* (2019)

Zhang *et al.* (2015) estudaram o efeito da água na adesividade entre o ligante e o agregado. Para isso utilizaram dois tipos de ligantes asfálticos (CAP 40/60 e CAP 70/100) e quatro agregados de diferentes composições químicas e absorções de água (dois calcários e dois granitos). Foram realizados três ensaios de arrancamento com distintas metodologias, o *peel test*, o *PATTI test* e o *Pull-off test*, todos em estado seco e condicionado em água. Foram comparadas em relação às forças de arrancamento, as perdas percentuais desses valores nas distintas idades de condicionamento de umidade. Observou-se que os agregados com menor absorção de água alcançaram resistências de arrancamento superiores aos de maior absorção. Com isso, o estudo concluiu que além da correlação química e mineralógica dos agregados na adesividade, há uma relação entre a absorção de água dos agregados e a sensibilidade da mistura à umidade, isto é, quanto menor a absorção do agregado maior sua adesividade. Na Figura 5 é apresentado o resultado comparativo dos três testes para dois agregados graníticos (G1 e G2). Esses agregados possuem

composição química semelhantes, porém absorções distintas, sendo a absorção de G1 menor que a de G2.



Fonte: Zhang *et al.* (2015)

Oliveira (2020) estudou os efeitos dos danos por umidade em misturas asfálticas com a adição de minério de ferro. Foram preparadas misturas com dois agregados gnaisses de localidades diferentes e um ligante asfáltico CAP 50/70. Após realizar ensaio de dano por umidade induzida em misturas asfálticas completas (MACs) e ensaios de varredura em matrizes de agregados finos (MAFs) com e sem condicionamento de umidade, o autor observou que houve um ganho na resistência ao dano por umidade nas misturas com a adição de minério de ferro.

Pesquisas de Moghadas Nejad, Hamedi e Azarhoosh (2013) avaliaram o efeito da cal hidratada nos agregados através da aplicação de conceitos termodinâmicos e do método de energia de superfície. Para isso utilizaram como materiais dois diferentes agregados (calcário e granito) e um ligante asfáltico (CAP 60/70). Foi realizado o ensaio no dispositivo de sorção universal (USD) e verificado que o uso da cal hidratada diminui a polaridade do agregado, reduzindo a tendência de atração da água com a superfície do agregado, tornando assim a mistura menos suscetível aos danos causados pela umidade. Com esses resultados chegaram à conclusão de que a superfície tratada com a cal hidratada reduz a acidez do agregado, melhorando assim a adesão entre os componentes do concreto asfáltico.

Um dos objetivos da pesquisa de Sousa *et al.* (2013) foi desenvolver um *software* para analisar os dados do *Dynamic Mechanical Analyzer* (DMA) e calcular parâmetros da resistência às trincas por fadiga e por danos à umidade em MAFs. Os autores concluíram que o tipo do agregado tem grande impacto na resistência ao dano por

umidade, e demonstraram que MAFs preparadas com agregado calcário (caráter básico) apresentam melhores resistências à umidade que as preparadas com agregados silicosos (caráter ácido) qualquer que seja a dimensão do agregado, isto é, independente da faixa de granulometria dos agregados a composição química e mineralógica são relevantes nos danos por umidade.

Na pesquisa de Mehrara e Khodaii (2017) o objetivo era investigar se as respostas baseadas em energia distinguem as misturas asfálticas sensíveis e resistentes à umidade em diferentes condições ambientais. Para isso utilizaram como material dois diferentes agregados (calcário e granito) e um ligante asfáltico CAP 60/70. Foi realizado o ensaio de módulo de resiliência e resistência IDT em amostras secas e condicionadas a umidade. Foram testadas as amostras em três diferentes temperaturas (4,4°C, 21,1°C e 37,8°C). Foram calculadas a energia total (FE) que o material absorvia até se romper, a energia elástica (EE), que é a que o material absorve e consegue liberar totalmente após ser descarregado, e a energia plástica (DCSE) que é a parte irreversível, que corresponde às deformações permanentes. Os autores concluíram que em temperaturas mais elevadas, além das amostras apresentarem comportamentos mais dúcteis que frágeis, os efeitos da umidade não eram percebidos. Outra contatação dos autores foi que analisar as energias calculadas de forma diretas não possuíam influência tão significativa quanto analisá-las de maneira modificada, normalizando-as em função da tensão de falha dos resultados do IDT.

2.4. CONTRIBUIÇÃO DE PESQUISAS RECENTES SOBRE O ESTUDO DA RESISTÊNCIA À FRATURA UTILIZANDO O ENSAIO SCB

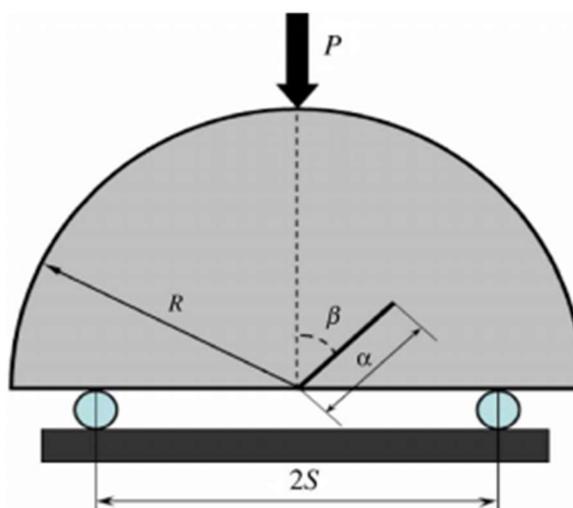
Pesquisas têm sido realizadas para verificar as propriedades de fratura das misturas asfálticas, e um ensaio que vem crescendo em utilização é o ensaio de fratura com geometria semicircular SCB. Este ensaio pode ser realizado através de carregamento estático ou dinâmico, no entanto este último ainda não é padronizado (SAHA; BILIGIRI, 2016).

Para o ensaio com carregamento estático, mais amplamente difundido, já existem normas como a AASHTO TP 105 e a AASHTO TP 124. O objetivo do ensaio de fratura SCB é avaliar alguns parâmetros de fratura, assim como o caminho percorrido pela

propagação das trincas quando o corpo-de-prova semicircular é submetido a uma carga aplicada a três pontos. O ensaio vem recebendo grande atenção de pesquisadores da área de pavimentação, como Rivera-Pérez *et al.* (2021); Lu, Saleh e Nguyen (2020); Manrique-Sanchez, Caro e Kim (2020); Fonseca *et al.* (2019); Godoi *et al.* (2019); Saha e Biligiri (2016) e Aragão *et al.* (2014), entre outros, pois tem como resultado parâmetros de fratura que podem ser associados a resistência à fratura de misturas asfálticas.

O ensaio com geometria semicircular com entalhe teve sua origem com Chong e Kuruppu (1984), sendo utilizado para materiais frágeis como rochas e concreto. O entalhe realizado na base do corpo-de-prova funciona como uma pré-trinca, tornando-se o ponto de maior concentração de tensão, ou seja, o local onde a trinca se originará. A depender do ângulo β que o entalhe faz com a perpendicular da base do corpo-de-prova, tem-se o ensaio realizado em modo I, II ou III. Nesta pesquisa a fratura ocorreu sempre em modo I, pois o ângulo β foi igual a zero. Na Figura 6 é mostrada a indicação do ângulo β no corpo-de-prova.

Figura 6 - Ângulo de inclinação do entalhe



Fonte: Ayatollahi, Aliha e Hassani (2006)

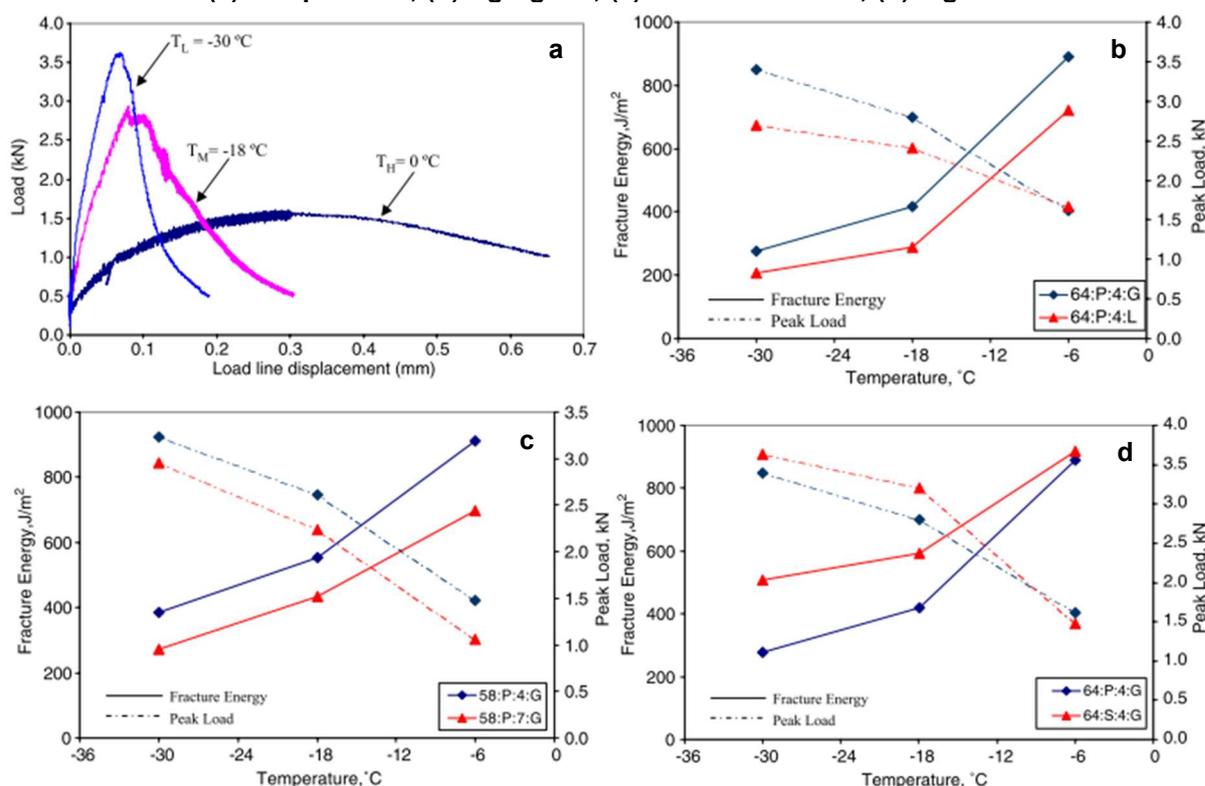
As vantagens deste ensaio são a simplicidade no procedimento, o baixo custo e a facilidade da confecção dos corpos-de-prova, uma vez que a partir de um corpo-de-prova cilíndrico podem ser gerados pelo menos 6 corpos-de-prova (VARGAS; OLIVEIRA; ARAGÃO, 2018; SAHA; BILIGIRI, 2016; LUTIF, 2011). Em contrapartida alguns estudos apontam limitações no uso da geometria utilizada devido ao efeito do

arqueamento resultante do estado de tensões de compressão no topo da amostra (AL-QADI *et al.*, 2015; ARAGÃO *et al.*, 2014).

A seguir estão compiladas algumas pesquisas recentes que realizaram estudos sobre parâmetros de fratura utilizando o ensaio de fratura com geometria semicircular SCB.

Li e Marasteanu (2010) avaliaram a resistência ao trincamento de seis misturas asfálticas por meio do ensaio de fratura SCB. As misturas tinham como variável o tipo de ligante (PG 58-28, PG 64-28 e PG 64-28 SBS), o volume de vazios (4% e 7%), e o tipo de agregado (granito e calcário). Os ensaios foram realizados em três diferentes temperaturas (-30°C, -18°C e -6°C), e foi verificado que à temperatura mais próxima de zero as misturas se mostraram mais dúcteis, com menores picos de carga e maiores deslocamentos em detrimento àquela mais inferior (Figura 7a). Outra verificação do ensaio constatou que as misturas com granito apresentaram maiores energias de fratura e maiores picos de carga que as misturas com calcário (Figura 7b). Quanto ao volume de vazio, as misturas com menor volume de vazio apresentaram maiores energias de fratura e maiores picos de carga (Figura 7c). Já na comparação entre os tipos de ligante percebeu-se que as misturas com ligante modificado apresentaram maiores energias de fratura em relação aos ligantes convencionais (Figura 7d).

Figura 7 - Análises dos parâmetros de fratura em relação às variáveis da pesquisa (a) Temperatura; (b) Agregado; (c) Volume de vazio; (d) Ligante



Fonte: Li e Marasteanu (2010)

Abuawad, Al-Qadi e Trepanier (2015) avaliaram o impacto do uso de dois aditivos melhoradores de adesividade (líquido *anti-strip* e cal hidratada) e dois modificadores de ligante (estireno butadieno estireno - SBS e ácido polifosfórico – PPA). Para isso foram utilizadas duas misturas típicas do centro-oeste de *Illinois/US* sensíveis à umidade. Dentre outras análises, as misturas foram avaliadas por meio do ensaio de dano por umidade induzida e do ensaio de fratura SCB, e com os resultados chegaram à conclusão de que o aditivo líquido *anti-strip* e a cal hidratada foram os mais resistentes aos danos por umidade, enquanto o modificador PPA não se mostrou satisfatório em nenhuma das análises. A cal hidratada foi adicionada usando diferentes técnicas de adição, a saber: marinação (M), pasta (S), seca (D) e úmida (W). Na Figura 8 encontram-se os resultados do ensaio DUI. Quanto aos efeitos da energia de fratura das amostras, o estudo apresentou que as misturas com o líquido *anti-strip*, o SBS e com cal-M, cal-D e cal-W obtiveram energias de fratura superiores à mistura de controle (Figura 9).

Figura 8 - Resultados de DUI para os diferentes aditivos e modificadores de ligante

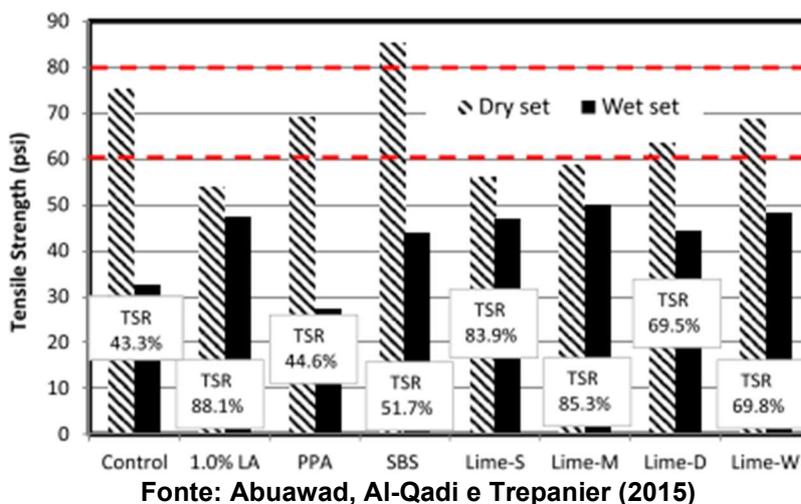
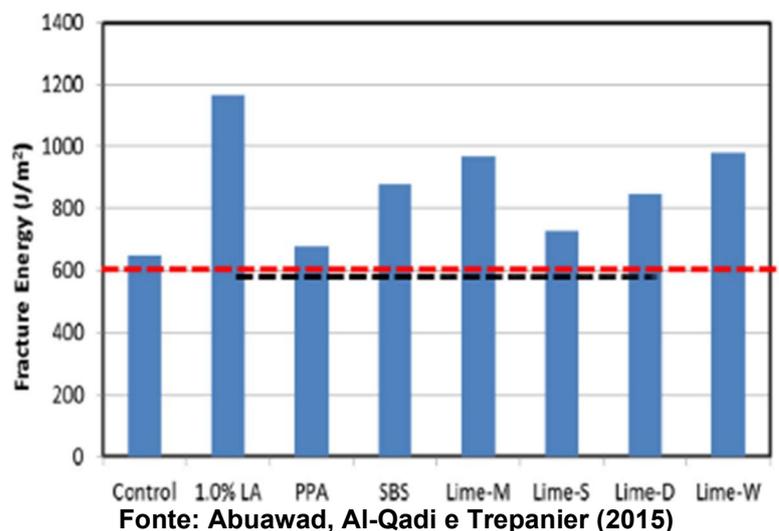
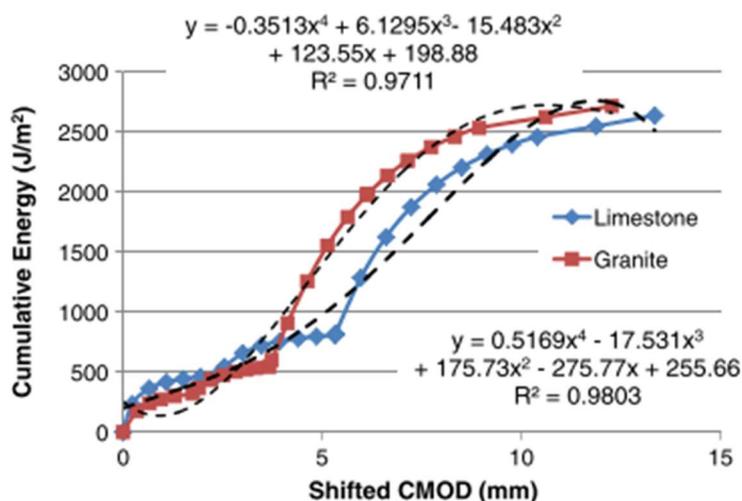


Figura 9 - Resultados do ensaio SCB para os diferentes aditivos e modificadores de ligante



Braham e Mudford (2013) em seus estudos analisaram os efeitos da curva R plotada em função da energia cumulativa e do deslocamento da abertura da trinca de misturas com agregados graníticos e calcário (Figura 10). Os dados para a curva foram extraídos do teste de tensão compacta em forma de disco. Os autores verificaram que os ensaios realizados em temperatura mais elevada, quando a energia cumulativa é superior a 600 J/m², as misturas com agregados graníticos se mostraram mais resistentes às fraturas que as misturas com agregados calcários.

Figura 10 - Curva R para agregados granítico e calcário



Fonte: Braham e Mudford (2013)

Rivera-Pérez *et al.* (2020) estudaram misturas asfálticas utilizando como ligante asfáltico um PG 64-22, como agregado dolomita triturada, areia natural e fíler mineral, sendo o tamanho máximo nominal dos agregados de 9,5 mm. Os autores procuraram entender, por meio do índice de flexibilidade (IF) e da estimativa da zona de processo de fratura (eFPZ) encontrados pelo ensaio de fratura SCB, os efeitos da espessura das amostras, da variação do volume de vazios, da taxa de carregamento e do comprimento do entalhe. Para isso, foram preparados quatro grupos de testes, o primeiro variando a espessura das amostras (25; 30; 40; 45; 50 e 60 mm), a segunda variando o volume de vazio (2; 4; 6; 8 e 10%), a terceira variando a taxa de carregamento (0,7; 6,25; 25 e 50 mm/min), e a quarta variando o comprimento do entalhe (10; 15; 20 e 35 mm). Concluiu-se que quanto menor for a espessura do corpo-de-prova e maior o volume de vazios, maior é a área do eFPZ e maior o IF. Além disso percebeu-se que o comprimento ideal do entalhe é de 15 mm, e que a taxa de carregamento mais alta em temperaturas intermediárias permite um melhor controle das deformações viscosas e plásticas.

Lu, Saleh e Nguyen (2020) investigaram a aplicabilidade do ensaio de fratura SCB com corpos-de-prova de 100 mm de diâmetro, uma vez que a maioria dos estudos utilizam 150 mm de diâmetro. Além disso, os autores avaliaram a influência do tamanho do entalhe, variando entre 5, 10 e 15 mm, e dois volumes de vazios, 5% e 7%. O tamanho máximo nominal do agregado utilizado foi de 10 mm e a espessura dos corpos-de-prova 30 mm. Os testes foram realizados em misturas asfálticas a

quente, misturas asfálticas mornas e misturas mornas com RAP. As misturas utilizavam com ligante um CAP 80/100, um aditivo WMA, um aditivo rejuvenescedor, agregados virgens e um RAP com 12 anos de uso. Os autores concluíram que os testes nas amostras não padronizadas (diâmetro de 100 mm) podem ser usados para avaliar a resistência à fissuração em misturas asfálticas com agregados com tamanho máximo nominal de 10 mm. Outra conclusão foi que o comprimento do entalhe e o volume de vazios afetam no comportamento da fissuração das misturas asfálticas. Quanto maior foi o volume de vazio e o comprimento do entalhe, mais alto o índice de flexibilidade se mostrou, isto é, a mistura asfáltica tornou-se mais resistente ao trincamento.

Fonseca *et al.* (2019) em sua pesquisa, estudaram misturas asfálticas em escala MAF com agregados de dimensão máxima de 2 mm, ligante asfáltico CAP 50/70 e adições de dois diferentes fíleres (pó de resíduo de rochas ornamentais e pó de escória de aço). Os autores avaliaram os efeitos das duas alternativas de fíleres nas propriedades de fratura e viscoelásticas das misturas asfálticas. Para isso realizaram o ensaio SCB em amostras com 100 mm de diâmetro, e o ensaio de varredura de frequência e de tempo. Foi concluído que as misturas referência e as misturas com adição de escória de aço obtiveram menores resistências à fratura, sendo, portanto, misturas mais rígidas. Outra conclusão da pesquisa foi que as misturas com adição dos dois fíleres analisados apresentaram a melhor resistência à fadiga dentre as MAFs estudadas.

Manrique-Sanchez, Caro e Kim (2020) estudaram misturas de agregados calcário, ligante modificado com polímero, fibra de celulose e aditivo melhorador de adesividade. O objetivo da pesquisa era avaliar os efeitos combinados da umidade e do envelhecimento a curto e a longo prazo nas propriedades viscoelásticas e de fratura de MAFs. Após a obtenção dos resultados os autores concluíram que com os ensaios de fratura SCB as amostras envelhecidas a longo prazo resistiram a maiores tensões e tiveram e fraturas mais precoces em comparação às envelhecidas a curto prazo (Figura 11). Outra conclusão desse estudo foi que com os ciclos de condicionamento percebeu-se que a longo prazo ocorreu uma tendência de decréscimo dos parâmetros analisados, o que não foi visto no condicionamento a curto

prazo. Ainda foi notado que o parâmetro energia de fratura foi o que apresentou maior perda (43%) após o terceiro ciclo de condicionamento (Figura 12).

Figura 11 - Curva tensão x deslocamento das amostras condicionadas a curto e a longo prazo

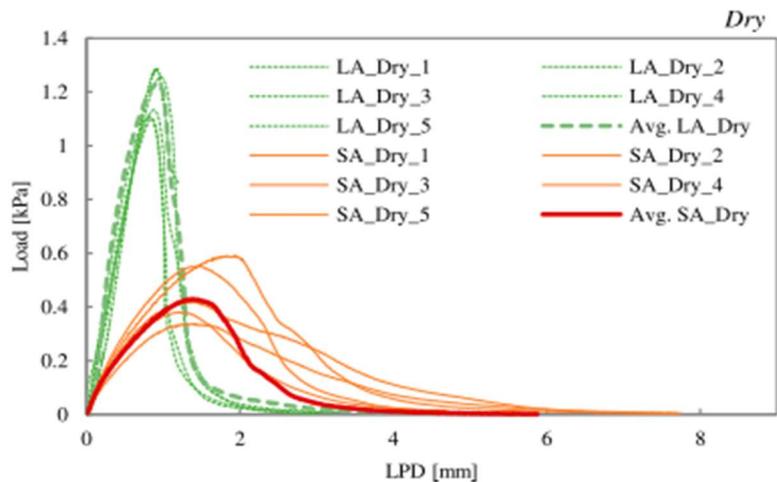
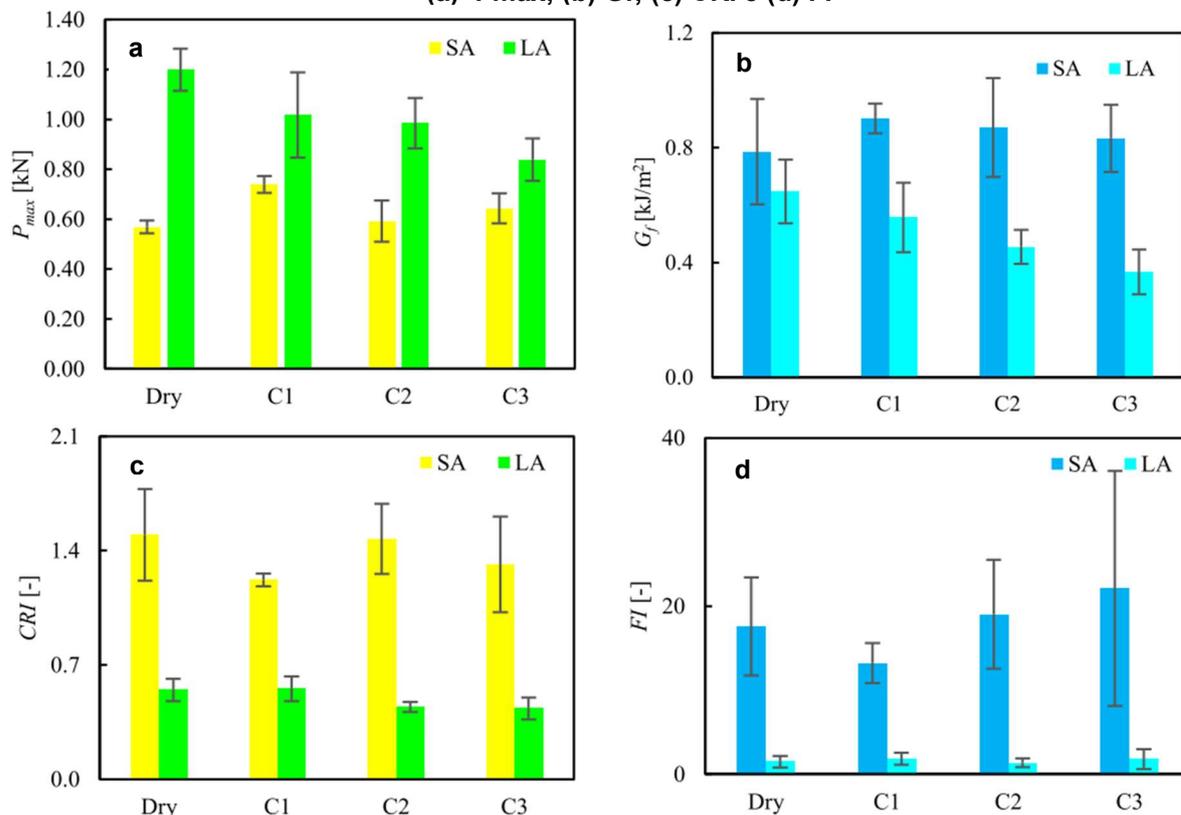
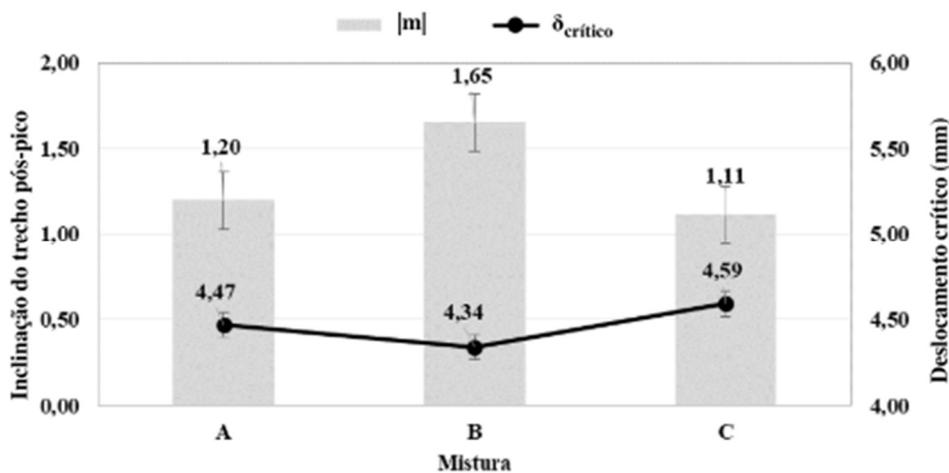


Figura 12 - Parâmetros de fratura para os ciclos de condicionamentos a curto e a longo prazo
(a) P_{max} ; (b) G_f ; (c) CRI e (d) FI



Godoi *et al.* (2019) utilizaram em suas pesquisas três misturas com agregados basálticos, variando o tipo de ligantes (CAP 50/70, AMP 60/85 e AB8). O estudo buscou contribuir para a análise da propagação e resistência ao trincamento das misturas asfálticas empregando o ensaio de fratura com geometria semicircular. Os resultados indicaram que as misturas com AMP (asfalto modificado com polímero) obtiveram maior rigidez. Por outro lado, as misturas com CAP e AB (asfalto borracha) apresentaram-se mais dúcteis e com menor velocidade de propagação das trincas (Figura 13).

Figura 13 - Inclinação da curva pós-pico e deslocamento crítico das misturas (A: CAP 50/70; B: AMP 60/85; C: AB8)



Fonte: Godoi *et al.* (2019)

3. ABORDAGEM METODOLÓGICA

Neste capítulo são apresentados os materiais utilizados na pesquisa assim como os procedimentos de ensaio de caracterização realizados. Também é apresentada a matriz experimental e as variáveis da pesquisa. Por fim, são mostrados os métodos utilizados para caracterizar os materiais e as misturas, a combinação das misturas avaliadas, o estudo das dosagens, a preparação dos corpos-de-prova e a realização dos ensaios necessários para conseguir atingir os objetivos da pesquisa.

3.1. MATERIAIS

3.1.1. Ligante Asfáltico

O ligante asfáltico empregado nesta pesquisa foi um CAP 30/45 fornecido pela empresa Vilabetume situada na Marca Ambiental, município de Cariacica – ES. Este ligante é refinado pela Refinaria de Duque de Caxias (REDUC), localizada no estado do Rio de Janeiro

3.1.2. Agregados

Nesta pesquisa foram utilizados dois tipos de agregados, um natural de origem granítica comumente utilizado na pavimentação asfáltica do estado do Espírito Santo e um siderúrgico proveniente do processo de produção do aço.

Os agregados naturais utilizados nas misturas da pesquisa são provenientes de rochas graníticas e foram fornecidos pela pedreira Brasitália, localizada no município de Cariacica - ES. Esses foram submetidos a ensaios de caracterização física, morfológica, química e mineralógica. Os agregados siderúrgicos empregados foram as escórias de alto-forno resfriada ao ar (EFRA), cedidos pela empresa Arcelor Mittal Tubarão, localizada no município da Serra - ES. O material foi coletado no pátio da empresa e entregue no Laboratório de Geotecnia e Pavimentação da UFES em granulometria variada, sendo necessária a separação das frações para sua adequação à faixa C do DNIT.

Foram reproduzidos para os agregados siderúrgicos todos os ensaios de caracterização física, morfológica, química e mineralógica realizados para a caracterização dos agregados naturais.

3.1.3. Fíleres

Os fíleres utilizados nesta pesquisa foram adicionados às misturas com a intenção de agirem como melhoradores de adesividade. Foram utilizados quatro materiais com composições químicas distintas, i.e., cal hidratada, pó EP, pó de AN e pó de EFRA, objetivando verificar qual a influência da variação química do fíler na adesividade ligante-agregado e conseqüentemente nas resistências à fratura de misturas asfálticas sujeitas ao dano por umidade.

A cal hidratada empregada foi uma CH-I, material rico em Ca(OH)_2 . O material para a pesquisa foi cedido pelo Laboratório de Geotecnia e Pavimentação – UFES.

O pó EP, é um resíduo da indústria siderúrgica, proveniente do precipitador eletrostático, e possui alta concentração de Fe_2O_3 . Ele é gerado durante a etapa de sinterização do minério de ferro durante a produção do aço. Este material também foi cedido pela empresa Arcelor Mittal Tubarão.

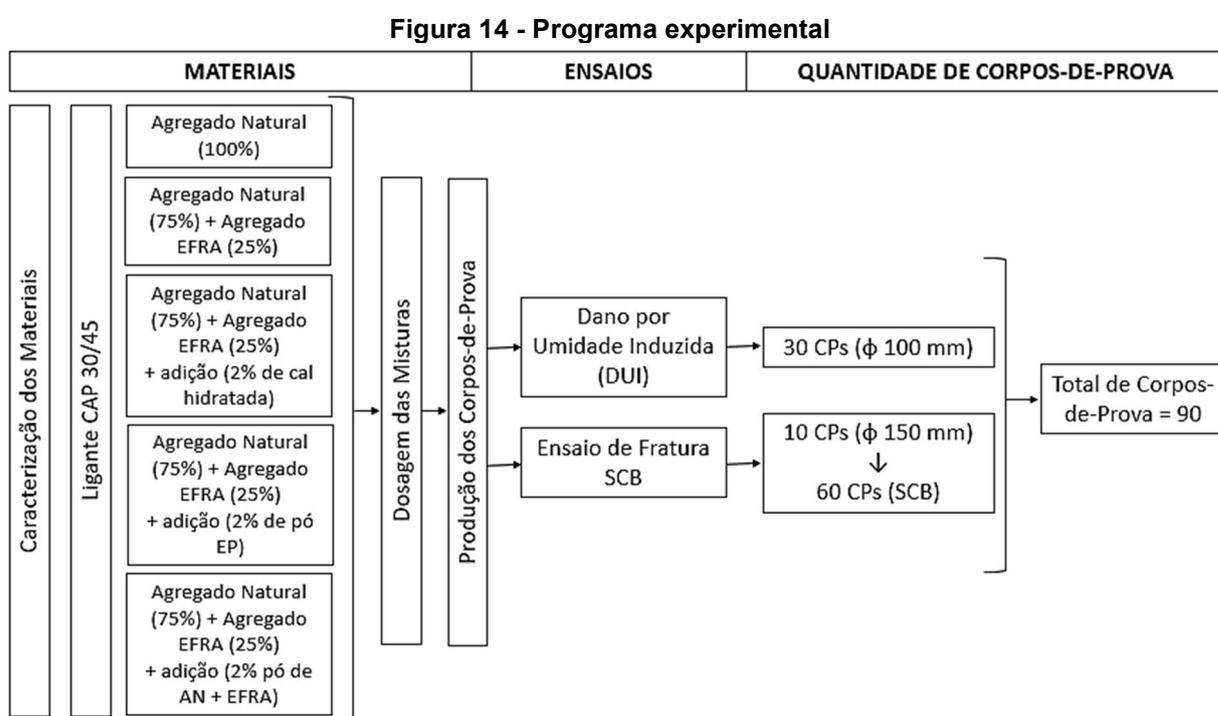
O pó de EFRA foi obtido pelo fracionamento da EFRA. Foi considerado como a fração passante pela peneira #200, ou seja, todo material com dimensões inferiores a 0,075mm (DNER, 1997). Este material possui elevados teores de CaO e SiO_2 .

O pó AN é proveniente da britagem da rocha granítica, considerando apenas a fração passante pela peneira #200 (DNER, 1997). Este por sua vez é um material com alta concentração de SiO_2 e foi fornecido pela pedreira Brasitália, juntamente com os agregados naturais graníticos.

O pó EFRA e o pó AN, por possuírem a mesma composição química de seus respectivos agregados, foram utilizados com o intuito de verificar a influência física do material na adesividade ligante-agregado, preenchendo os poros superficiais existentes nos agregados. A escolha desses materiais para fíler melhoradores de adesividade foi baseada nas conclusões de Zhang *et al.* (2015) que comprovaram que quanto maior a absorção do agregado, menor é a adesividade da mistura realizada com ele.

3.2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental desta pesquisa consiste nas etapas mostradas na Figura 14. Primeiramente foram realizados os ensaios de caracterização de cada material utilizado na pesquisa. Logo após passou-se para o estudo de dosagem das misturas asfálticas, seguida da preparação dos corpos-de-prova e realização dos ensaios mecânicos. Na Figura 14 também é possível verificar a quantidade de corpos-de-prova necessária para cada ensaio, e o total de corpos-de-prova moldados para a realização da pesquisa.



Fonte: Autor

3.3. VARIÁVEIS DA PESQUISA

Neste estudo foram consideradas variáveis do tipo independentes, dependentes e de controle. No Quadro 2 são apresentadas as variáveis da pesquisa separadas para cada ensaio.

Quadro 2 - Variáveis envolvidas na pesquisa

TIPO DE VARIÁVEL	VARIÁVEL	
	ENSAIO DUI	ENSAIO DE FRATURA SCB
DEPENDENTE (respostas)	Relação de Resistência a Tração (RRT)	Carga máxima de ruptura
		Energia de fratura
		Índice de resistência à fratura
		Índice de flexibilidade
INDEPENDENTE	Tipo de fíler adicionado	Tipo de fíler adicionado
	Tipos de agregados	Condicionamento de umidade
	Proporções dos agregados	Tipos de agregados
		Proporções dos agregados
CONTROLE	Condicionamento de umidade	Agregado Natural Granítico
	Agregado Natural Granítico	Agregado Siderúrgico EFRA
	Agregado Siderúrgico EFRA	Volume de Vazios
	Volume de Vazios	Teor de Ligante
	Teor de Ligante	Dimensões dos CPs
	Dimensões dos CPs	Taxa de carregamento
	Taxa de carregamento	

Fonte: Autor

3.4. MÉTODOS

3.4.1. Caracterização dos materiais

Foram realizados ensaios de caracterização física, química, mineralógica e morfológica de cada material utilizado na pesquisa a fim de conhecer suas características isoladas, para servirem de base para entendimento dos resultados dos ensaios realizados nas misturas compactadas. Além disso, os materiais utilizados na pavimentação asfáltica precisam atender aos critérios requeridos pela norma DNIT 031/2006–ES: Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de serviço, e pela norma DNER-EM 260/94: Escória de alto-forno para pavimentos rodoviários.

Nas seções seguintes são discriminados os ensaios de caracterização realizados para cada material envolvido na pesquisa.

3.4.1.1. *Ligante asfáltico*

A caracterização no ligante asfáltico foi realizada e enviada pelo laboratório da REDUC, e pode ser encontrada na Tabela 5.

Tabela 5 - Especificações do CAP 30/45 utilizado na pesquisa

CERTIFICADO DE ENSAIO (Cimento Asfáltico 30/45)				
Características	Método	Especificação	Resultado	Unidade
Penetração	D 5	30 a 45	35	0,1 mm
Ponto de Amolecimento	D 36	52 min	52,0	grau C
Viscosidade Brookfield 135 GC-SP21 20 RPM	D 4402	374 min	508	cP
Viscosidade Brookfield 150 GC-SP21	D 4402	203 min	246	cP
Viscosidade Brookfield 177 GC-SP21	D 4402	76 a 285 min	88	cP
RTFOT Penetração Retida	D 5	60 min	66	%
RTFOT - Aumento do Ponto de Amolecimento	D 36	8 máx	4	grau C
RTFOT - Ductilidade a 25GC	D 113	10 min	>150	cm
RTFOT Variação em % Massa	D 2872	-0,5 a 0,5	0,1	%
Ductilidade a 25 GC	D 133	60 min	>150	cm
Solubilidade no Tricloroetileno	D 2042	99,5 min	100,0	% massa
Ponto de Fulgor	D 92	235 min	>360	grau C
Índice de Suscetibilidade Térmica	X 018	-1,5 a 0,7	-1,5	N/A
Densidade Relativa a 20/4 Graus Celsius	D 70	-	1,054	N/A
Aquecimento a 177 GC	X 215	NESP	NESP	N/A
Local: TQ 230258	Data/hora amostragem: 17/05/2020 13:00			

Notas:

- Viscosidade Brookfield a 60°C (D-4402) – (SP29, 5 RPM) > 200000 cP

- NESP = Não Espuma

Fonte: Laboratório REDUC

3.4.1.2. Agregados naturais e siderúrgicos

A caracterização dos agregados tem por objetivo verificar sua adequação aos requisitos de aplicabilidade em misturas asfálticas especificados na norma DNIT 031/2006-ES. Além disso, é importante que se conheça as características dos agregados pois servem de base para o entendimento dos resultados dos ensaios que foram realizados nas misturas compactadas.

Os ensaios de caracterização dos agregados foram os mesmos tanto para os agregados naturais quanto para os agregados siderúrgicos. Foram realizados ensaios físicos, químicos, morfológicos e mineralógicos. No Quadro 3 são apresentados os ensaios realizados nos agregados assim como os laboratório em que foram realizados.

Quadro 3 - Ensaio de caracterização dos agregados e laboratórios utilizados

ENSAIOS		LABORATÓRIO
FÍSICOS	Massa específica real e aparente	Laboratório de Geotecnia e Pavimentação – LGP/CT - UFES
	Equivalente de areia	
	Composição granulométrica	
	Absorção de água	
	Abrasão <i>Los Angeles</i>	Laboratório de Ensaio em Materiais de Construção LEMAC/CT-UFES
MORFOLÓGICOS	Determinação das propriedades de forma por meio do Processamento Digital de Imagens (PDI) - AIMS	Laboratório de Microscopia Eletrônica/ Departamento de Geologia-UFC
QUÍMICOS	Durabilidade	Laboratório de Geotecnia e Pavimentação – LGP/CT - UFES
	Fluorescência de Raio-X – FRX	Empresa FRX Service
MINERALÓGICOS	Difratograma de Raio-X - DRX	Laboratório de Nanometria Fotônica – LNF/CT - UFES

Fonte: Autor

a. Ensaio de massa específica real e aparente

Os ensaios de massa específica real e massa específica aparente são normalizados pelas ABNT NBR NM 52:2009 e ABNT NBR NM 53:2009. A primeira descreve os procedimentos para o ensaio em agregados miúdos, isto é, para aqueles com dimensões inferiores a 4,8 mm. Já a segunda norma apresenta os procedimentos para o ensaio em agregados graúdos, aqueles com dimensões superiores a 4,8 mm.

b. Ensaio de absorção de água

O ensaio de absorção de água do agregado tem por objetivo conhecer sua porosidade. Um agregado poroso poderá absorver ligante asfáltico, consumindo assim parte do ligante necessário para a dosagem da mistura, o que pode interferir na adesividade do ligante-agregado. Esse ensaio é normalizado pela ABNT NBR NM 53:2009.

c. Ensaio de equivalente de areia

O ensaio de equivalente de areia se torna importante para a caracterização do agregado para o uso na pavimentação asfáltica uma vez que, a depender do percentual de pó encontrado no agregado, este se torna inviável para o uso. Esse

ensaio, portanto, determina a proporção relativa de pó nas amostras de agregados miúdos, e é normalizado pela ABNT NBR NM 12052:1992 e é um requisito da norma DNIT 031/2006-ES que tem como critério de utilização um equivalente de areia igual ou superior a 55%.

d. Ensaio de abrasão *Los Angeles*

O ensaio de abrasão *Los Angeles* tem por objetivo verificar a resistência do agregado ao desgaste provocado por esferas de aço que giram no interior de um tambor metálico. Esse ensaio é normalizado pela ABNT NBR NM 51:2001 e é um requisito da norma DNIT 031/2006-ES, em que o agregado natural precisa ter um desgaste igual ou inferior a 50%. A norma DNER-EM 260/94, refere-se aos agregados siderúrgicos e determina o desgaste por abrasão *Los Angeles* sendo igual ou inferior a 35%.

e. Ensaio de durabilidade

O ensaio de durabilidade verifica a resistência do agregado à desintegração química. Essa é quantificada por meio do ataque ao agregado com uma solução saturada de sulfato de sódio ou de magnésio. Esse ensaio é normalizado pela DNER-ME 089/94 e é um requisito da norma DNIT 031/2006-ES, que traz como critério de aceitação uma perda de massa inferior a 12%.

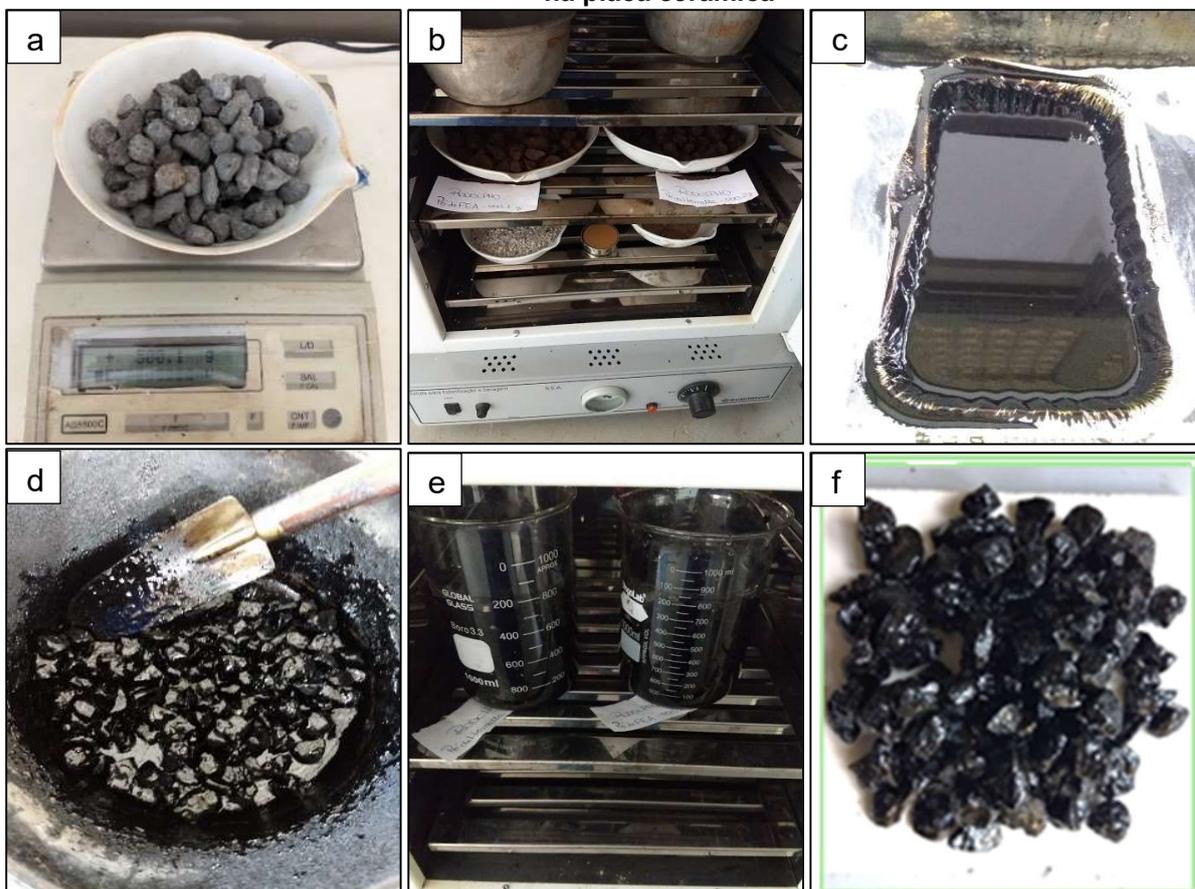
f. Adesividade ao ligante betuminoso

O ensaio de adesividade ao ligante betuminoso verifica, qualitativamente, a adesividade do ligante ao agregado graúdo, inferindo assim, sobre a resistência à fratura adesiva de misturas asfálticas.

Esse ensaio segue os procedimentos da norma ABNT NBR 12583:2017. Primeiramente o agregado é levado à estufa por 2 horas na temperatura de 120°C e em seguida é misturado ao ligante na mesma temperatura. Com o agregado completamente envolvido pelo ligante, a mistura, após esfriada, é colocada em água destilada por 72 horas a 40°C em estufa. Retirado da estufa, a mistura é depositada em uma placa cerâmica e verificada, visualmente, se houve desprendimento do

ligante da superfície dos agregados. Na Figura 15 é apresentada a sequência do ensaio.

Figura 15 - Sequência do Ensaio de Adesividade do Ligante Asfáltico no Agregado Graúdo
(a) Agregado Graúdo, (b) Agregado 2h na estufa a 120°C, (c) CAP, (d) Mistura CAP + Agregado Graúdo, (e) Mistura 72h em água destilada na estufa a 40°C, (f) Mistura final na placa cerâmica



Fonte: Autor

g. Ensaio de composição granulométrica

O ensaio de composição granulométrica tem por objetivo conhecer cada fração presente no agregado a fim permitir o enquadramento em uma faixa granulométrica adequada para o uso requerido. Esta etapa de adequação da faixa granulométrica é de grande importância pois traz consequências na rigidez, estabilidade, durabilidade, permeabilidade, trabalhabilidade, resistência à fadiga e a deformação permanente, resistência ao dano por umidade induzida, entre outras propriedades (BERNUCCI *et al.*, 2008). Esse ensaio é normalizado pela ABNT NBR NM 248:2003.

h. Determinação das propriedades de forma por meio do Procedimento Digital de Imagens (PDI)

O ensaio de determinação das propriedades de forma por meio do Procedimento Digital de Imagens verifica parâmetros de angularidade, textura superficial, esfericidade e razão de achatamento e alongamento dos agregados graúdos. Para agregados miúdos são verificados apenas a angularidade e a forma 2D dos materiais. Este ensaio é normalizado pela DNIT 432/2020–ME.

Um equipamento de análise de imagens dos agregados bastante aceito entre as técnicas de PDI é o *Aggregate Image Measurement System – AIMS* (DNIT, 2020), equipamento utilizado para caracterizar as propriedades de forma dos agregados desta pesquisa.

Além de obter dados sobre a forma dos agregados, requisito este presente na norma DNIT 031/2006-ES, o objetivo da realização desse ensaio é conhecer a textura dos agregados, uma vez que há uma correlação entre a textura e o desempenho de adesividade ligante-agregado (BERNUCCI *et al.*, 2008; PACKHAM, 2003).

Segundo Diógenes (2018), a análise de forma relaciona os agregados em suas três dimensões, classificando-o como plano, alongado ou esférico. A angularidade por sua vez tem o objetivo de descrever os ângulos existentes ao longo da superfície dos agregados, isto é, os ângulos formados por suas arestas. Já a textura avalia as irregularidades superficiais dos agregados. Na Figura 16 é ilustrada essas três propriedades.

Figura 16 - Forma, angularidade e textura superficial dos agregados



Fonte: Diógenes (2018)

Segundo Ibiapina (2018), para partículas maiores ou iguais a 4,75 mm (agregados graúdos), o fator de forma é avaliado por meio de sua esfericidade. O valor dessa

propriedade varia de 0 a 1, quanto mais cúbico for o grão do agregado, próximo de 1 é o fator. A análise da textura superficial, também aplicável a agregados graúdos, é quantificada por meio de variações no nível de cinza dos pixels das imagens capturadas durante o ensaio, seu valor varia de 0 a 1000, quanto maior este fator, mais rugosa a partícula.

A angularidade, por sua vez, é analisada nos agregados graúdos e miúdos (menores que 4,75 mm). Nesta análise é observada as alterações de direção existente ao longo do contorno da partícula, e pode variar de 0 a 10.000, assim quanto mais arredondada é uma partícula, menor será o valor da angularidade. Por fim, para a análise de forma dos agregados miúdos, são utilizados parâmetros de forma 2D, que indica a quão alongada é a partícula. Esse parâmetro varia de 0 a 20, neste caso, quanto mais próximo de 20 é o fator, mais alongada é a partícula.

Os resultados do ensaio foram analisados com base em dois métodos de classificação, um proposto por Al Rousan (2004) e outro por Ibiapina (2018). Na Tabela 6 e na Tabela 7 são apresentadas as classificações propostas pelos autores, respectivamente.

Tabela 6 - Classificação proposta por Al Rousan (2004)

PROPRIEDADE	VALORES LIMITES				
Forma 2D	< 6,5	6,5 – 8,0	8,0 – 10,5	> 10,5	-
	Circular	Semicircular	Semialongado	Alongado	
Angularidade	< 2100	2100 – 4000	4000 – 5400	> 5400	
	Arredondado	Subarredondado	Subangular	Angular	
Esfericidade	< 0,6	0,6 – 0,7	0,7 – 0,8	> 0,8	
	Achatado/ Alongado	Baixa esfericidade	Esfericidade moderada	Alta esfericidade	
Textura Superficial	< 165	165 – 275	275 – 350	350 – 460	> 460
	Polido	Macio	Baixa rugosidade	Rugosidade moderada	Alta rugosidade

Fonte: Al Rousan (2004)

Tabela 7 - Classificação proposta por Ibiapina (2018)

PROPRIEDADE	VALORES LIMITES				
Forma 2D	< 4,0	4,0 - 11,0	11,0 – 15,5	> 15,5	-
	Circular	Semicircular	Semialongado	Alongado	
Angularidade	< 1260	1260 - 4000	4080 – 7180	> 7180	
	Arredondado	Subarredondado	Subangular	Angular	
Esfericidade	< 0,5	0,5 – 0,7	0,7 – 0,9	> 0,9	
	Achatado/ Alongado	Baixa esfericidade	Esfericidade moderada	Alta esfericidade	
Textura Superficial	< 260	260 - 440	440 – 600	600 – 825	> 825
	Polido	Macio	Baixa rugosidade	Rugosidade moderada	Alta rugosidade

Fonte: Ibiapina (2018)

i. Difração de Raio-X (DRX)

A difração de Raio-X é uma técnica que consiste em aplicar radiação em uma determinada amostra e detectar o feixe de fótons difratado. Essa técnica mede os ângulos e as intensidades dos feixes difratados, e a partir dessas informações é possível identificar a mineralogia do material estudado. Para a realização desse ensaio é necessário a separação da amostra dos agregados moídos passando na peneira N° 230, ou seja, com abertura de 63µm e secas em estufa a 105 ± 5°C. O difratômetro de Raio-X utilizado foi o *Ultima IV* da marca *Rigaku*, com um tubo de ânodo de molibdênio.

Com a mineralogia dos agregados busca-se compreender os resultados obtidos nos demais ensaios realizados na pesquisa. Foi realizado o DRX apenas do agregado siderúrgico EFRA.

j. Fluorescência de Raio-X (FRX)

A fluorescência de Raio-X é uma técnica que consiste na identificação dos elementos químicos de uma amostra e os quantifica em óxidos. Este ensaio foi realizado a fim de conhecer os elementos químicos presentes nos agregados e assim conseguir fazer inferências sobre suas consequências nas propriedades analisadas das misturas.

Para a realização deste ensaio será necessário a separação da amostra dos agregados secos e moídos passando na peneira N° 200 (abertura de 75µm). O

equipamento utilizado foi o espectrômetro de fluorescência de Raio-X WDS da marca *Philips* modelo PW-2404, tubo de anodo de Rh.

3.4.1.3. Fíleres

Foram realizados ensaios de caracterização dos materiais utilizados como fíleres melhoradores de adesividade. Foram realizados ensaios físicos, morfológicos, mineralógicos e químicos. No Quadro 4 são apresentados os ensaios realizados nos agregados assim como os laboratório em que foram realizados.

Quadro 4 - Ensaio de caracterização dos fíleres e laboratórios utilizados

ENSAIO	MATERIAL	LABORATÓRIO
Massa específica real	Cal hidratada – CH-I	Laboratório de Geotecnia e Pavimentação – LGP/CT - UFES
	Pó EP	
	Pó AN	
	Pó EFRA	
Granulometria a laser	Cal hidratada – CH-I	Laboratório de Sedimentologia - UFES
	Pó EP	
	Pó AN	
	Pó EFRA	
Difratograma de Raio-X	Cal hidratada – CH-I	Laboratório de Nanometria Fotônica – LNF/CT - UFES
	Pó EP	
	Pó AN	
	Pó EFRA	
Fluorescência de Raio-X	Cal hidratada – CH-I	Empresa FRX Service
	Pó EP	
	Pó AN	
	Pó EFRA	

Fonte: Autor

a. Ensaio de massa específica real

Os ensaios de massa específica real foram realizados seguindo o mesmo procedimento dos agregados, exposto na seção 3.4.1.2 item a.

b. Difração de Raio-X (DRX)

A difração de Raio-X foi realizada apenas no filer pó EP por este ser um material proveniente da geração de um terceiro (aço) e não se possuir um conhecimento tão

difundido como os demais fíleres utilizados (agregado natural granítico e cal hidratada).

Este ensaio foi realizado com a intenção de conhecer e entender a composição mineralógica do material em busca da compreensão dos benefícios da adição dos fíleres nas propriedades analisadas das misturas asfálticas.

Os procedimentos para a difração de Raio-X foram os mesmos descritos na seção 3.4.1.2 item i.

c. Fluorescência de Raio-X (FRX)

A fluorescência de Raio-X seguiu os mesmos procedimentos da seção 3.4.1.2 item j, e tem como objetivo ajudar a entender, por meio da composição química dos fíleres, a influência de cada um nas propriedades estudadas das misturas.

d. Ensaio de granulometria a laser

O ensaio de granulometria a laser tem por objetivo obter a composição granulométrica dos materiais finos. A amostra para a realização do ensaio deve ser passada na peneira N°230, com abertura de 63 μ m, estar livre de matéria orgânica e sais, e levada ao granulômetro a laser para a obtenção dos resultados.

O granulômetro a laser utilizado foi o *Mastersizer 2000/Malvern*, que emprega a técnica de difração a laser para medir o tamanho as partículas. O processo consiste na medição da intensidade da luz espalhada à medida que o feixe de laser interage com as partículas dispersas da amostra.

Este ensaio foi realizado a fim de caracterizar os fíleres quanto a sua distribuição granulométrica e tamanho dos grãos, e assim buscar um melhor entendimento dos resultados encontrados nos ensaios desta pesquisa.

3.4.2. Definição das misturas asfálticas estudadas

Foram realizadas cinco combinações de misturas para serem analisadas, uma vez que o objetivo da pesquisa envolve a análise das propriedades de fratura de misturas asfálticas com agregados naturais (granito) e agregados siderúrgicos (EFRA)

combinados a quatro fíleres melhoradores de adesividade com distintas composições químicas (cal hidratada, pó EP, pó EFRA e pó AN).

Foram preparadas misturas com 100% de agregado naturais e misturas com 75% agregado naturais e 25% agregado EFRA com e sem a adição dos fíleres. A porcentagem de agregados utilizadas seguiu a utilizada no estudo de Moura *et al.* (2020).

Moura *et al.* (2020) realizaram em seus estudos ensaio de determinação de dano por umidade induzida utilizando teores de 1,5% de fíleres melhoradores de adesividade em suas misturas. Os autores investigaram, dentre outros, materiais semelhantes ao da presente pesquisa, e, com o teor de fíler adotado, não foi possível atingir um valor de resistência à tração retida (RRT) satisfatória. Dessa forma, a presente pesquisa utilizou teores de fíleres melhoradores de adesividade de 2%, a fim de conseguir misturas com RRT maiores ou iguais a 70%, limite estabelecido pela norma DNIT 031/2006-ES.

A adição dos fíleres propostos para agirem como a melhoradores de adesividade foram realizados embasados na adição em massa da cal hidratada, sendo separados uma quantidade de 2% em massa de fíler em relação ao agregado. Uma vez separada a massa necessária de cal hidratada, e conhecendo sua massa específica, calculou-se o volume de cal hidratada utilizado em cada amostra. Os demais fíleres (pó EP, pó EFRA e pó AN), com o auxílio de suas massas específicas, foram adicionados com o mesmo volume da cal hidratada.

Para a preparação das misturas, era necessário que os agregados possuíssem 3% de umidade a fim de garantir um bom envolvimento do pó à sua superfície. Isso foi possível adicionando água destilada em uma proporção de 3% da massa total dos agregados após serem secos em estufa.

A mistura 75% agregado natural e 25% agregado EFRA teve uma particularidade na adição dos fíleres de AN e de EFRA. Posto que o propósito de utilizar esses fíleres é buscar excluir a influência física na adesividade da mistura, foram preparadas separadamente a quantidade de agregado natural e a quantidade de agregado EFRA, e misturados seus respectivos fíleres em quantidades proporcionais, para somente depois serem unidos e homogeneizados para a preparação da mistura.

No Quadro 5 são apresentadas as combinações que foram realizadas nesta pesquisa com suas respectivas proporções.

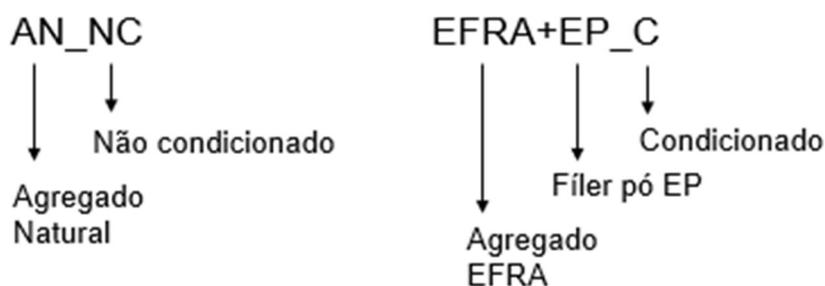
Quadro 5 - Misturas da Pesquisa

MISTURA	AGREGADO NATURAL (GRANITO) (%)	EFRA (%)	CAL (%)	PÓ EP (%)	PÓ EFRA (%)	PÓ AN (%)
AN	100	0	0	0	0	0
EFRA	75	25	0	0	0	0
EFRA+CAL	75	25	2	0	0	0
EFRA+EP	75	25	0	2	0	0
EFRA+EFRA	75	25	0	0	0,5	1,5

Fonte: Autor

Metade das misturas produzidas passaram por processos de condicionamento de umidade, dessa forma, na nomeação das misturas foi indicado o estado de condicionamento por NC e C, para não condicionada e condicionada, respectivamente, como representado na Figura 17. Com as composições das misturas definidas iniciou-se o estudo de dosagem.

Figura 17 - Nomeação das Misturas da Pesquisa



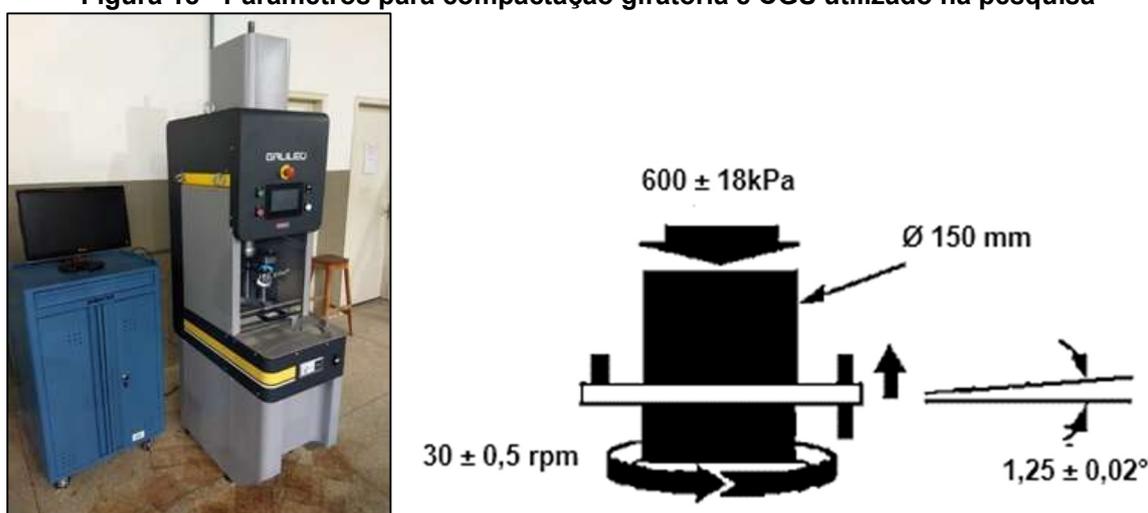
Fonte: Autor

3.4.3. Dosagem das misturas asfálticas

A dosagem das misturas asfálticas estudadas foi baseada na metodologia *Superpave*, uma técnica relativamente nova no Brasil, que foi desenvolvida e já vem sendo utilizada nos Estados Unidos desde 1993. Uma das principais diferenças entre a metodologia Marshall – a mais usual no Brasil, é a forma de compactação dos corpos-de-prova. Enquanto na Marshall os corpos-de-prova são compactados por impacto, a *Superpave* fornece a compactação por meio de amassamento realizado com giros (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Conforme a norma DNIT 178/2018-PRO, a compactação por meio do compactador giratório *Superpave* (CGS) é realizada por meio da aplicação de uma pressão de 600 ± 18 kPa em um molde cilíndrico com uma inclinação externa de $1,25 \pm 0,02^\circ$ e uma rotação de $30 \pm 0,5$ rpm. Essa rotação aplicada faz com que a orientação das partículas de agregados seja, de certa forma, parecida com a compactação que ocorre em campo, realizada por meio de rolos compactadores. Na Figura 18 são ilustrados os parâmetros da compactação giratória, assim como o CGS da marca IPC Global modelo Galileo 78-PV20G02 utilizado nesta pesquisa.

Figura 18 - Parâmetros para compactação giratória e CGS utilizado na pesquisa



Fonte: Autor; Adaptado de DNIT (2018)

É necessário a determinação do número de giros como parâmetro de compactação, e este número por sua vez é definido em conformidade com o volume de tráfego de projeto conforme apresentado no Quadro 6. Para a presente pesquisa foi considerado um volume de tráfego médio, obtendo-se assim um número de giros de projeto ($N_{projeto}$) igual a 75.

Quadro 6 - Critério de Compactação para o CGS

VOLUME DE TRÁFEGO COMERCIAL	PARÂMETROS DE COMPACTAÇÃO NÚMERO DE GIROS		
	N_{ini}	$N_{projeto}$	N_{max}
MUITO BAIXO	6	50	75
MÉDIO	7	75	115
PESADO	8	100	160
MUITO PESADO	9	125	205

Fonte: DNIT (2018)

Pela norma DNIT 031/2006-ES algumas características da mistura compactada precisam ser atendidas, e essas podem ser encontrada no Quadro 7.

Quadro 7 - Valores limites de características para misturas compactadas

CARACTERÍSTICAS	CAMADA DE ROLAMENTO
PERCENTAGEM DE VAZIOS, % (VV)	3 a 5
RELAÇÃO BETUME/VAZIOS (RBV)	75 – 82
VAZIO DE AGREGADO MINERAL (VAM)	≥ 16

Fonte: Adaptado de DNIT (2006)

Para preparação das misturas asfálticas faz-se necessário a separação correta dos materiais atendendo a algumas especificações. A primeira delas é a escolha da faixa granulométrica dos agregados. A metodologia *Superpave* possui seu próprio critério para o estabelecimento da curva granulométrica, portanto nesta pesquisa, apesar de se basear nessa metodologia, utilizou-se a Faixa C de acordo com as especificações da norma DNIT 031/2006-ES apresentado no Quadro 8. Esta opção se deve ao fato de que mesmo não utilizando o método de dosagem Marshall, procurou-se estudar as misturas dentro da realidade brasileira.

Quadro 8 - Faixa granulométrica pelo DNIT 031/2006-ES

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%

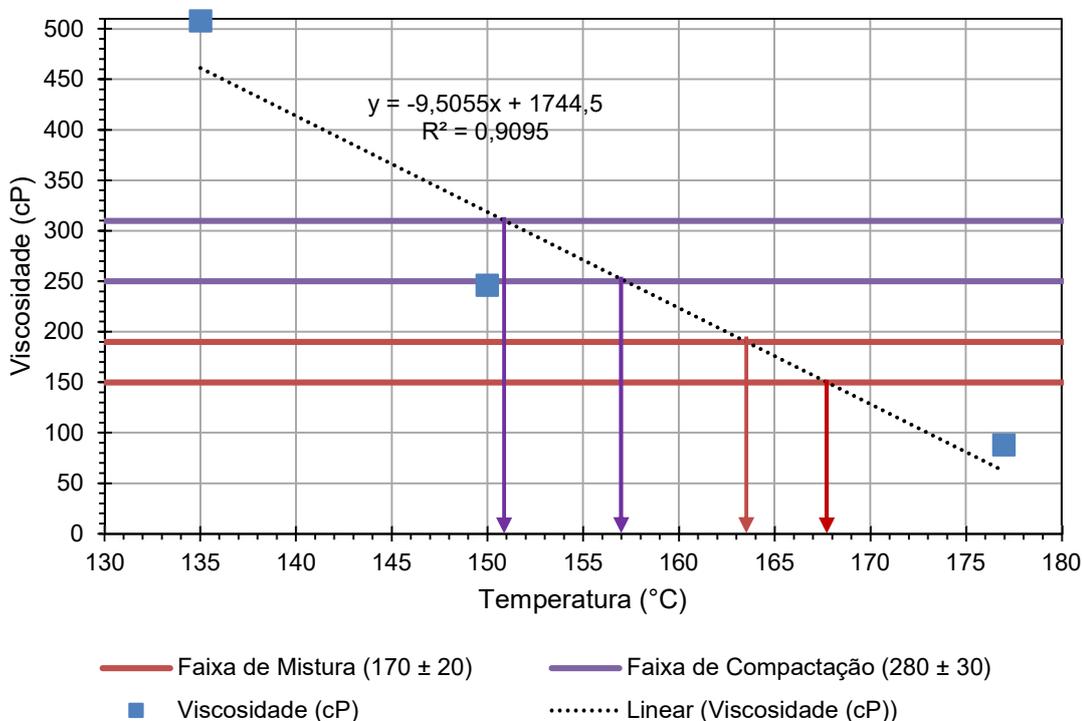
Fonte: DNIT (2006)

Outras especificações que precisam ser definidas para a preparação de misturas asfálticas são às temperaturas de trabalho do ligante, que são determinadas pela sua viscosidade. A viscosidade do ligante asfáltico é uma medida de sua consistência, por resistência ao escoamento. Essa consistência tem grande importância para a

determinação das temperaturas de trabalho do ligante para que ele proporcione uma perfeita cobertura do agregado e permita condições ideais para a compactação.

Para identificar esse parâmetro é necessário plotar a curva de viscosidade do ligante e, de acordo com a viscosidade em determinadas temperaturas, verificar a faixa de mistura e a faixa de compactação. Segundo a norma DNIT 178/2018-PRO a faixa de mistura do ligante é quando sua viscosidade está em 170 ± 20 cP, e a faixa de compactação quando a viscosidade está em 280 ± 30 cP. Pela curva de viscosidade apresentada na Figura 19 a temperatura de mistura e de compactação foram $166 \pm 2^\circ\text{C}$ e $154 \pm 3^\circ\text{C}$, respectivamente.

Figura 19 - Curva de viscosidade do CAP 30/45 utilizado



Fonte: Autor

Os corpos-de-prova, portanto, foram moldados no CGS com todas as especificações mencionadas na presente seção, partindo das misturas dosada por Izoton (2020) e Moura (2020), realizadas segundo a dosagem Marshall. Compactados os corpos-de-prova, foram calculados os parâmetros volumétricos e verificados todos os requisitos da norma DNIT 031/2006-ES, realizando as devidas alterações para que os critérios fossem alcançados.

3.4.4. Preparação dos corpos-de-prova

3.4.4.1. Corpos-de-prova cilíndricos

A preparação dos corpos-de-prova cilíndricos das misturas asfálticas seguiu os procedimentos da norma DNIT 178/2018–PRO utilizando o CGS.

Os materiais e o recipiente de mistura foram levados à estufa à $166 \pm 2^\circ\text{C}$ por um período de 1 hora. Após esse tempo, foi realizada a mistura até a cobertura completa dos agregados pelo ligante. Realizado esse processo, a mistura foi novamente colocada na estufa, por um período de 2 horas a uma temperatura de $154 \pm 3^\circ\text{C}$, para simular o envelhecimento a curto prazo. O molde dos corpos-de-prova também foi inserido a essa temperatura por um período de pelo menos 45 minutos. Finalizado esse tempo, a mistura foi colocada no molde com cuidado para evitar segregação dos agregados, e com uma espátula foram realizados 12 golpes pelo perímetro e no interior do corpo-de-prova. Passado todo esse procedimento, o molde juntamente com a mistura foi levado ao CGS. Foi aplicada uma pressão de 600 ± 18 kPa com uma inclinação externa de $1,25^\circ \pm 0,02^\circ$ e uma rotação de $30 \pm 0,5$ rpm, conforme mencionado na seção 3.4.3. Após a compactação o corpo-de-prova foi extraído do molde. Após atingir a temperatura ambiente, procedeu-se com as pesagens para determinação dos parâmetros volumétricos. Na Figura 20 é mostrado o passo a passo do procedimento adotado.

Figura 20 - Procedimento de mistura e compactação dos CPs de MAC
 (a) Mistura dos materiais a quente; (b) Mistura solta aquecida indo à estufa por 2 horas; (c) Mistura solta adicionada no molde; (d) Molde + mistura inserida no compactador giratório; (e) Extração da mistura compactada do molde; (f) Corpo-de-prova compactado



Fonte: Autor

3.4.4.2. **Corpos-de-prova semicirculares – SCB**

A confecção dos corpos-de-prova semicirculares se deu por meio da partição de corpos-de-prova cilíndricos. Estes últimos foram produzidos no CGS com dimensões de 150 mm de diâmetro por aproximadamente 115 mm de altura, utilizando o mesmo número de giros da dosagem, 75 giros, obtendo um volume de vazio de $4 \pm 0,5\%$.

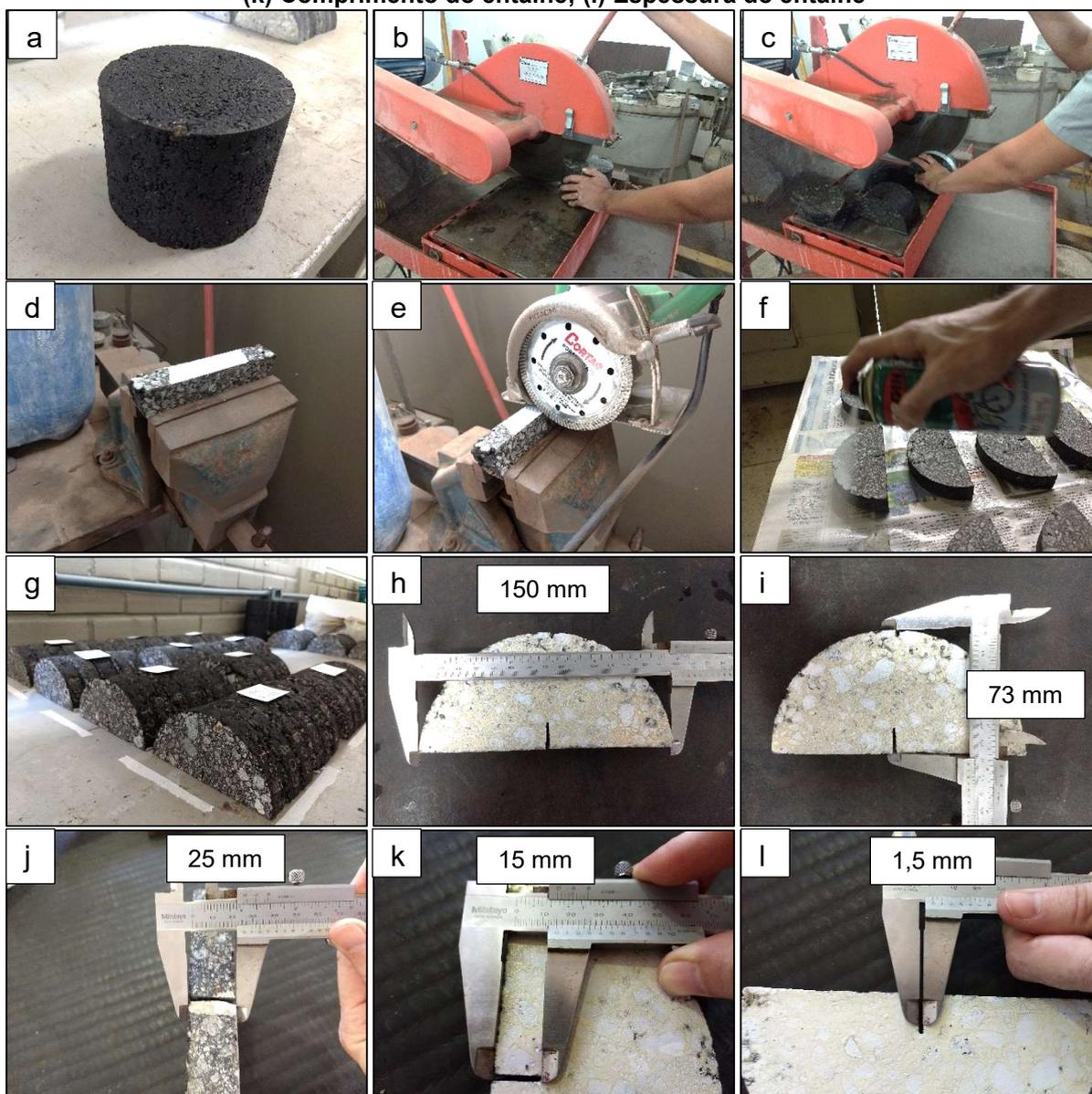
Após a moldagem, os corpos-de-prova cilíndricos foram inicialmente levados a uma mesa de corte. Utilizando uma serra clipper, foram feitos cortes longitudinais, dividindo os corpos-de-prova em duas partes. Em cada parte, foi extraída cerca de 10 mm das extremidades para eliminar o efeito das bordas, obtendo assim amostras com volume de vazio mais homogêneo. Após esse processo, realizaram-se os cortes transversais, ainda com a serra clipper, para a obtenção dos corpos-de-prova SCB com as medidas desejadas: 150 mm de diâmetro por $73 \pm 1,5$ mm de altura por 25 mm de espessura.

Por fim, foi feita a execução dos entalhes. Para isso, foi utilizada uma serra circular de disco diamantado para a produção de um corte de 15 mm de comprimento por 1,5 mm

de espessura. Após a confecção dos corpos-de-prova semicirculares com entalhe, foi realizado a pintura de sua superfície, na cor branca, a fim de facilitar a visualização da propagação das trincas durante a realização do ensaio. Na Figura 21 é mostrado todo procedimento realizado para a produção dos corpos-de-prova semicirculares com entalhe, assim como as dimensões adotadas. Um único corpo-de-prova cilíndrico resultou em seis corpos-de-prova semicirculares.

Figura 21 - Procedimento de confecção dos corpos-de-prova semicirculares

(a) Corpo-de-prova cilíndrico; (b) Corte longitudinal do corpo-de-prova cilíndrico; (c) Cortes transversais do corpo-de-prova; (d) Corpo-de-prova SCB fixado na morsa; (e) Corte do entalhe; (f) Pintura da superfície do corpo-de-prova; (g) Corpos-de-prova SCB utilizados na pesquisa; (h) Diâmetro do corpo-de-prova; (i) Altura do corpo-de-prova; (j) Espessura do corpo-de-prova; (k) Comprimento do entalhe; (l) Espessura do entalhe



Fonte: Autor

3.4.5. Dano por umidade induzida (DUI) – DNIT 180/2018-ME

O ensaio de DUI seguiu os procedimentos da norma brasileira DNIT 180/2018-ME, que se baseia na norma americana AASHTO T 283/2018, e tem por objetivo medir a alteração da resistência à tração diametral oriundas do efeito de saturação em água e do condicionamento acelerado com ciclos de congelamento e descongelamento dos corpos-de-prova compactados.

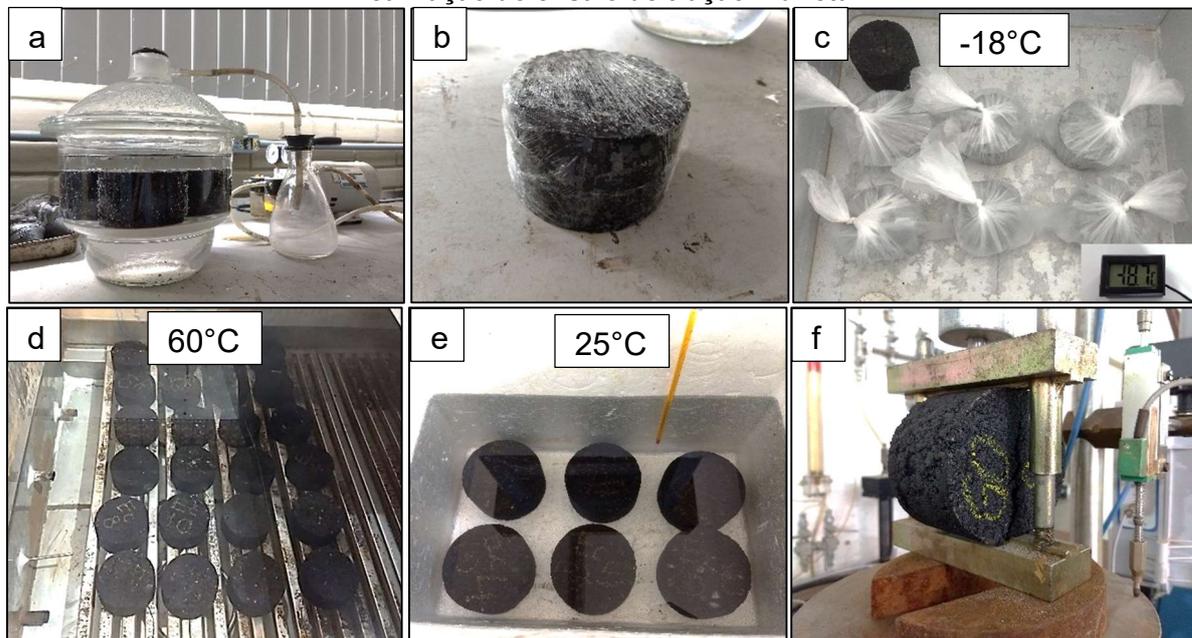
Segundo Ling, Hanz e Bahia (2016) este ensaio, também conhecido como *Lottman* modificado, é o mais utilizado quando se estuda a resistência à umidade em misturas asfálticas já que há uma relação direta entre a adesividade ligante-agregado e o dano devido a umidade.

Para a realização do ensaio foram compactados seis corpos-de-prova de cada amostra, seguindo a metodologia *Superpave* descrito na norma DNIT 178/2018-PRO, com um volume de vazios controlado de $7 \pm 1\%$. Metade dos corpos-de-prova foram levados ao condicionamento de umidade sendo levados a um grau de saturação entre 55 e 80%, embalados em filme plástico e colocados em um saco impermeável com 10 ml de água em seu interior. Foram deixados a uma temperatura de $-18 \pm 3^\circ\text{C}$ por um período de 16 horas. Após este período de congelamento os corpos-de-prova foram condicionados a um banho térmico por 24 horas à 60°C . Imediatamente após este banho térmico os corpos-de-prova foram submersos em banho de água a 25°C por um período de 2 horas a fim de voltarem à temperatura ambiente, finalizando assim o ciclo de condicionamento de umidade. Em seguida todos os corpos-de-prova foram levados ao ensaio de resistência à tração diametral, seguindo a norma DNIT 136/2018-ME para a obter as resistências à tração indireta dos corpos-de-prova condicionados (RTc) e não condicionados (RT). De posse desses dados, calculou-se o RRT conforme Equação 1.

$$\text{RRT} = \frac{\text{RTc}}{\text{RT}} \times 100\% \quad \text{Equação 1}$$

A resistência à tração retida (RRT) portanto será a razão entre a média das três resistências dos corpos-de-prova condicionados (RTc) pela média das três resistências dos corpos-de-prova não condicionados (RT). Na Figura 22 é mostrado o passo a passo realizado para o ensaio DUI.

Figura 22 - Ensaio de dano por umidade induzida
 (a) Saturação dos corpos-de-prova; (b) Corpo-de-prova envolto com plástico filme; (c) Corpos-de-prova no saco plástico com 10 ml de água no freezer a -18°C ; (d) Corpos-de-prova no banho térmico a 60°C ; (e) Corpos-de-prova no banho a 25°C ; (f) Corpo-de-prova posicionado para realização do ensaio de tração indireta



Fonte: Autor

3.4.6. Ensaio de Fratura com Geometria Semicircular Estático (SCB)

Este ensaio não é padronizado por uma norma brasileira. Dessa forma, tomou-se como base para o desenvolvimento do procedimento adotado a norma AASHTO TP 124/2016. No entanto, os parâmetros de espessura da amostra e taxa de deslocamento foram ajustados conforme pesquisas de Fonseca *et al.* (2019) e Aragão *et al.* (2014). As adaptações realizadas se deram para que pudesse ser verificado de maneira mais gradual o surgimento e a propagação das trincas, uma vez que taxas de deslocamento mais reduzidas possibilita esse melhor acompanhamento.

Dada a natureza viscoelástica do ligante asfáltico, tem-se uma forte influência da temperatura de realização do ensaio nos resultados. Para temperaturas elevadas, por razão da ocorrência mais significativa de mecanismos de deformação, os resultados podem ter uma maior variabilidade (FREIRE; CASTELO BRANCO; VASCONCELOS, 2014). Assim, a norma AASHTO TP 124/2016 trata do ensaio de fratura com geometria semicircular em temperaturas intermediárias, determinando a execução do ensaio a 25°C .

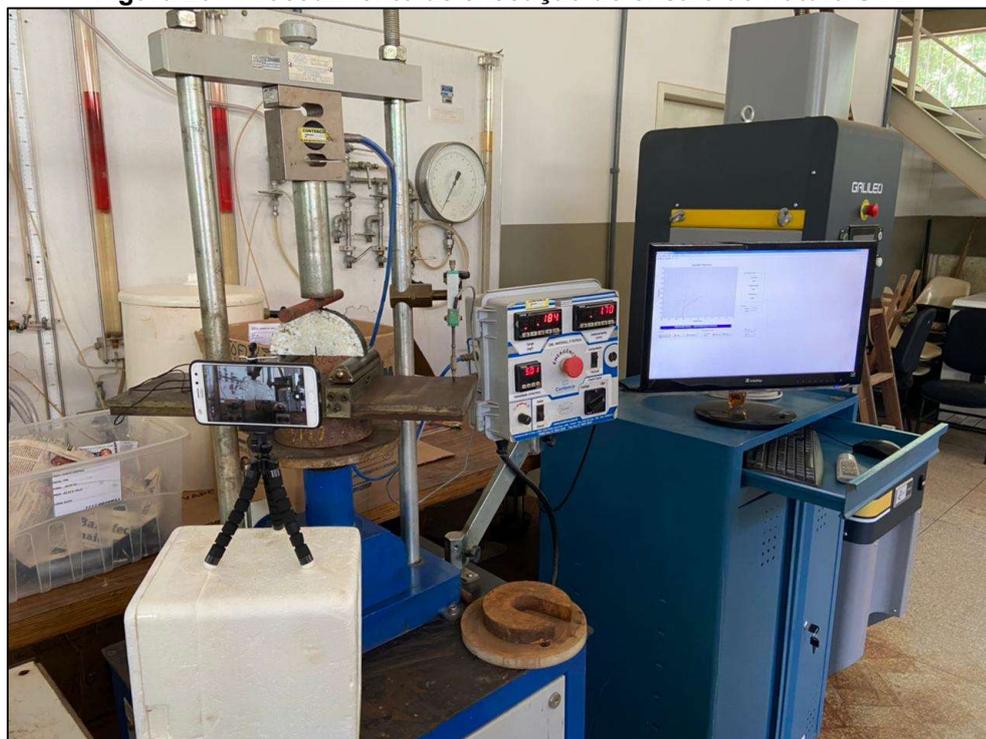
O ensaio SCB foi realizado à $25 \pm 1^{\circ}\text{C}$ na prensa eletrônica da marca Pavitest fabricado pela Contenco modelo I-1006-FA com capacidade de 5000 kgf em quatro

corpos-de-prova para cada mistura. Os corpos-de-prova foram apoiados centralizados em dois roletes metálicos afastados em 120 mm (80% da dimensão do corpo-de-prova), e na parte superior foi colocada uma haste metálica centralizada, conforme recomendado pela norma AASHTO TP 124/2016, permitindo assim a aplicação de uma carga monotônica a três pontos.

Para iniciar o ensaio foi aplicada uma pré-carga de 0,1 kN para que houvesse o assentamento do corpo-de-prova no equipamento. Em seguida foi aplicada a carga com uma taxa de deslocamento do atuador de 0,083 mm/s até que se verificasse uma carga igual ou inferior a 0,1 kN após o pico da curva. A taxa de deslocamento foi adotada baseada nas taxas utilizadas por Godoi *et al.* (2019), Minhajuddin *et al.* (2016) e Saha e Biligiri (2015). Já o critério de parada foi o mesmo utilizado por Godoi *et al.* (2019), e ainda é o critério recomendado pela norma AASHTO TP 124/2016.

Buscando verificar o caminho percorrido pelas trincas, analisando as fraturas ocorridas nos corpos-de-prova, toda a execução do ensaio foi filmada para que não se perdesse o momento do surgimento e da propagação das macrotrincas. Na Figura 23 é mostrado o procedimento do ensaio, sendo possível observar o corpo-de-prova posicionado na prensa eletrônica e a filmagem de todo o processo acontecendo.

Figura 23 - Procedimento de execução do ensaio de fratura SCB



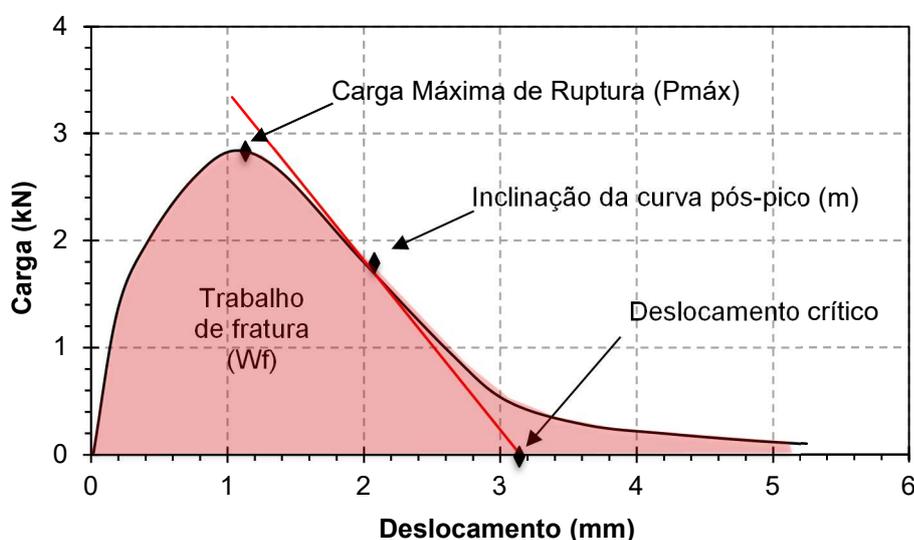
Fonte: Autor

Uma vez que o objetivo da pesquisa busca entender o comportamento de propriedades de fratura de diferentes misturas em situação de umidade, foi necessário realizar este ensaio levando alguns corpos-de-prova ao condicionamento de umidade. O condicionamento dos corpos-de-prova foi o mesmo descrito na norma DNIT 180/2018-ME, sendo realizado nos corpos-de-prova já em sua geometria final, após a etapa de pintura. Este método de condicionamento foi utilizado na pesquisa de Mehrara e Khodaii (2017) onde os autores tinham como um dos objetivos analisar a energia de fratura em misturas condicionadas.

Como respostas do ensaio foram obtidos o tempo de execução, as cargas aplicadas e os deslocamentos verticais. Com essas respostas foi possível plotar a curva carga (kN) *versus* deslocamento (mm), e extrair parâmetros de fratura para analisar o comportamento das diferentes amostras, quais sejam: i) Carga máxima de fratura ($P_{máx}$); ii) Energia de fratura (G_f); iii) Índice de Flexibilidade (IF) e iv) Deslocamento crítico ($\delta_{crítico}$). Os resultados desses quatro parâmetros de fratura passaram por um tratamento estatístico de análise de variância (ANOVA).

Dos quatro parâmetros citados, a carga máxima de ruptura e o deslocamento crítico podem ser extraídos diretamente da curva carga *versus* deslocamento. A primeira aponta a maior carga que a mistura consegue suportar, já a segunda está relacionada a habilidade da mistura de resistir à propagação do trincamento, isso quer dizer que, quanto maior for o deslocamento crítico, mais dúctil é a mistura. Esses parâmetros estão apontados na Figura 24.

Figura 24 - Curva carga x deslocamento com indicação de alguns parâmetros



Fonte: Autor

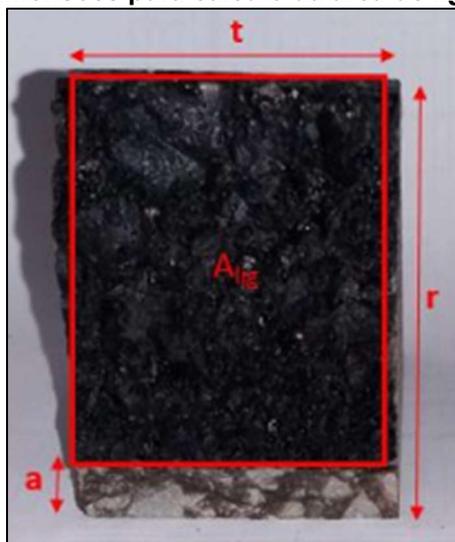
Além dos citados, é possível ver na Figura 24 parâmetros como o trabalho de fratura (W_f) e a inclinação da curva pós-pico (m), que servirão de base para o cálculo de outros parâmetros estudados na pesquisa.

Para encontrar a energia de fratura é necessário conhecer o trabalho de fratura (área sob a curva) e a área de ligamento do corpo-de-prova. A Equação 2, extraída da norma americana AASHTO TP-105/2020, é utilizada para determinar este parâmetro.

$$G_f = \frac{W_f}{A_{lig}} \quad \text{Equação 2}$$

Onde G_f é a energia de fratura em J/mm^2 ; W_f é o trabalho de fratura em J; A_{lig} é a área de ligamento dada por $(r - a) \times t$. As dimensões para o cálculo da área de ligamento são mostradas na Figura 25.

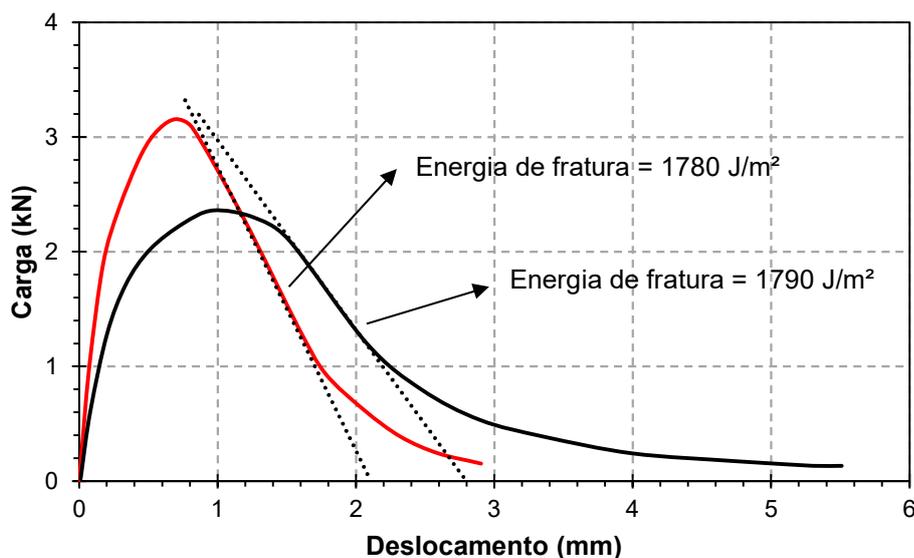
Figura 25 - Dimensões para cálculo da área de ligamento (A_{lig})



Fonte: Godoi (2017)

Este parâmetro indica a energia que a mistura suporta durante todo o processo do ensaio, porém, segundo Al-Qadi *et al.* (2015), este não é considerado um parâmetro suficiente para distinguir a forma do comportamento das misturas. Na Figura 26 é mostrado um exemplo em que duas misturas possuem energias de fratura similares, mas o comportamento da curva carga *versus* deslocamento, nitidamente apresentam características distintas que influenciam em suas respostas frente ao trincamento.

Figura 26 - Exemplo de curva carga x deslocamento com Gf similares



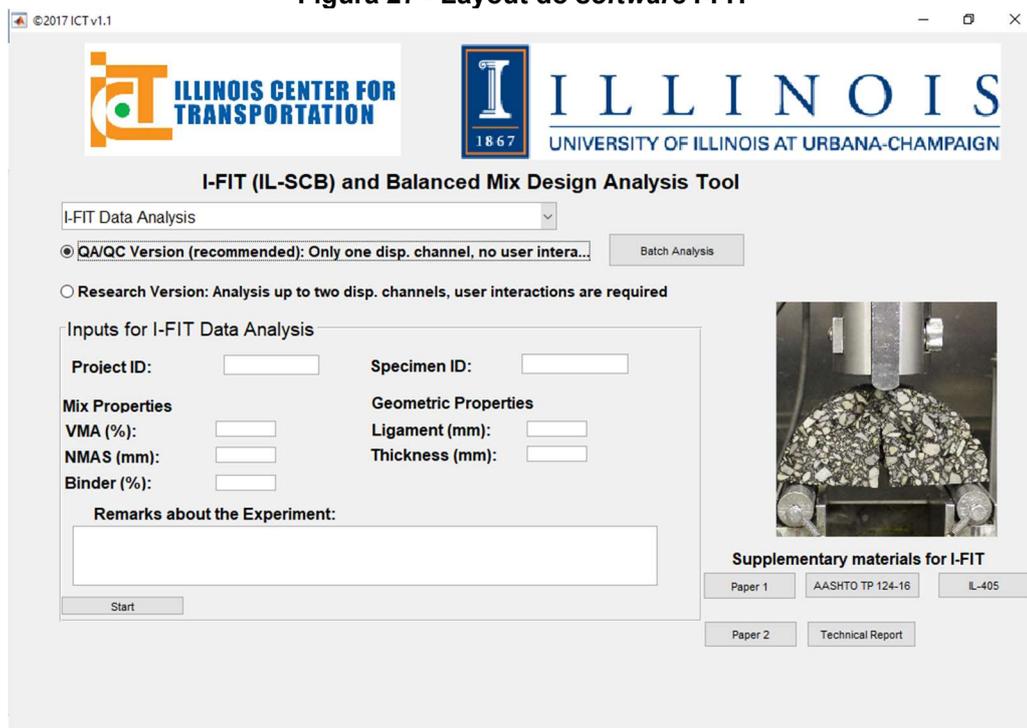
Fonte: Adaptado de Al-Qadi *et al.* (2015)

Com isso, o índice de flexibilidade foi proposto como um novo parâmetro a fim de identificar as misturas mais propensas à fratura prematura. Assim é possível inferir que quanto maior for o índice de flexibilidade, mais dúctil é a mistura. Este é calculado conforme Equação 3.

$$IF = \frac{G_f}{|m|} \times 0,01 \quad \text{Equação 3}$$

Onde IF é o índice de flexibilidade; G_f é a energia de fratura em J/m²; |m| é o valor absoluto da inclinação da curva pós-pico em kN/mm.

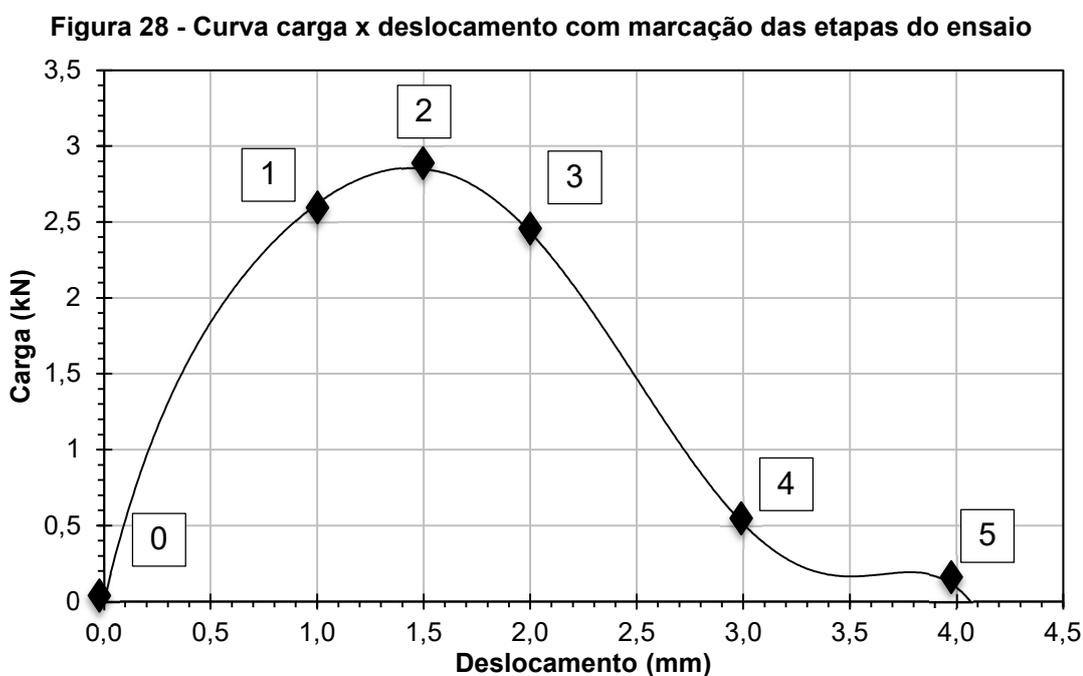
Figura 27 - Layout do software I-FIT



O Centro de Transportes de Illinois (ICT) em parceria com a Universidade de Illinois desenvolveu e disponibilizou um *software* que torna possível o cálculo automático dos valores de energia de fratura, inclinação da curva pós-pico, índice de flexibilidade e deslocamento crítico. Para isso é necessário dispor, como dados de entrada no *software*, as seguintes informações: tempo de ensaio, carga e deslocamento. Além desses, é necessário preencher os dados da mistura conforme mostrado na Figura 27. A versão utilizada do software foi a I-FIT 2017 v1.1.

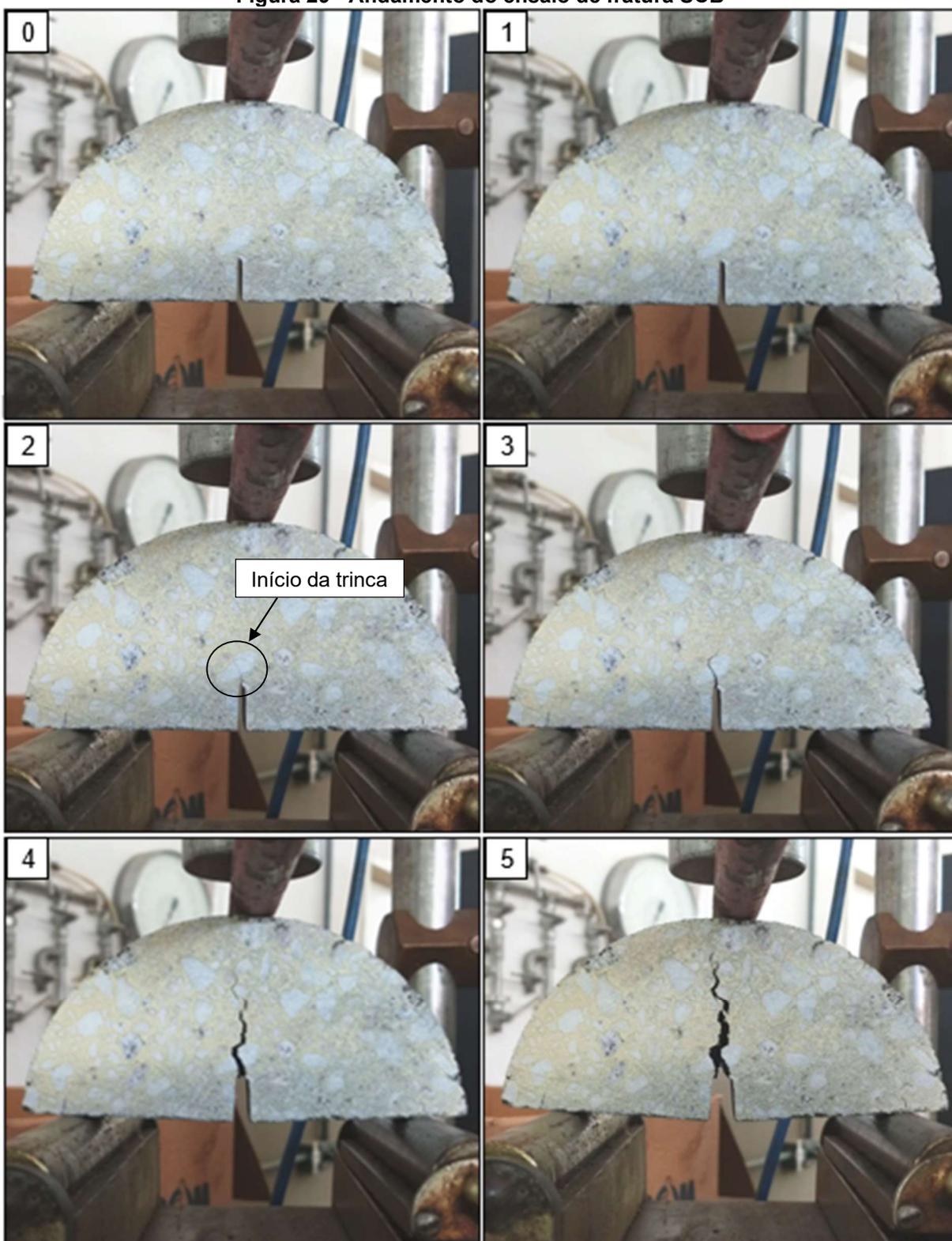
Na Figura 29 é mostrado o delineamento traçado pela propagação da trinca durante o ensaio de fratura em cada um dos pontos assinalados na curva carga *versus* deslocamento da Figura 28.

Do ponto zero ao ponto 1, observou-se que mesmo com um incremento de carga, o corpo-de-prova não apresentou trincas visíveis. O ponto 2 corresponde ao momento em que um corpo-de-prova atinge sua resistência máxima. Como resultado disso, neste instante, a partir do entalhe, as primeiras trincas visíveis começam a surgir. Essas vão se interligar no decorrer dos pontos 3 e 4 formando as macrotrincas que prosseguem até a ruptura total da amostra, no ponto 5.



Fonte: Autor

Figura 29 - Andamento do ensaio de fratura SCB



Fonte: Autor

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesse capítulo são apresentados os resultados e as discussões dos ensaios. Inicialmente, encontram-se os resultados das caracterizações de todos os materiais envolvidos na pesquisa, seguidos das determinações das temperaturas de mistura e compactação das composições, bem como da curva granulométrica adotada. Logo após são apresentados os resultados sobre as dosagens das misturas e por fim, os resultados dos ensaios realizados seguido de suas análises e discussões.

4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

4.1.1. Agregados Naturais e Siderúrgicos

Na Tabela 8 estão compilados os resultados dos ensaios requeridos pela norma DNIT 031/2006-ES e DNER-EM 260/94 com seus respectivos critérios de aceitação para o uso dos agregados na pavimentação.

Tabela 8 - Caracterização geral dos agregados								
		Massa Específica Real (g/cm³)	Massa Específica Aparente (g/cm³)	Absorção de água (%)	Equivalente de Areia (%)	Abrasão Los Angeles (%)	Durabilidade (%)	Adesividade
Agregado Natural	19-9,5 (B1)	2,82	2,75	0,82				
	9,5-4,8 (B0)	2,77	2,67	1,38	90	44	0,6	Não Satisfatória
	<4,8	2,83	-	-				
DNIT 031/2006-ES		-	-	-	>55	≤50	<12	Satisfatória
Agregado EFRA	19-9,5 (B1)	2,55	2,20	6,23				
	9,5-4,8 (B0)	2,63	2,18	7,83	84	31	10,7	Não Satisfatória
	<4,8	2,89	-	-				
DNER-EM 260/94		2 - 3		1 - 3	-	<35	0 - 5	-

Fonte: Autor

Conforme observado na Tabela 8, os agregados EFRA não atenderam aos critérios de absorção e durabilidade estabelecidos pela norma DNER-EM 260/94. Já em relação aos critérios da norma DNIT 031/2006-ES a maioria foi atendida, tanto pelos agregados naturais quanto pelos siderúrgicos. A exceção foi observada para os resultados do ensaio de adesividade, sendo determinados não satisfatórios. No entanto, acredita-se que por este ensaio ser bastante empírico, a adesividade dos agregados ao ligante precisa ser melhor avaliada por meio de outros ensaios. Mais ainda, a norma do DNIT 031/2006-ES recomenda, para casos em que a adesividade

se mostra insatisfatória, o uso de adições de melhoradores de adesividade, o que será avaliado neste trabalho.

A massa específica da EFRA mostrou-se similar à do agregado natural, observando-se uma variação média inferior a 5%. Pelo FHWA (2021) a escória de alto forno resfriada ao ar possui massa específica entre 2 e 2,5 g/cm³, podendo chegar a valores superiores a esses a depender do teor de materiais ferrosos e metálicos presentes em seu processo siderúrgico. Embora a norma de pavimentação asfáltica não exija a realização deste ensaio, ele é importante pois tem influência direta no peso da carga transportada durante a execução da pavimentação em campo. Portanto, como as massas específicas dos dois agregados utilizados são semelhantes, não há variações significativas no peso da carga durante o transporte.

Outro requisito analisado foi a absorção de água. Notou-se que a EFRA possui uma absorção média seis vezes superior à do agregado natural. Esse valor elevado era esperado uma vez que segundo a FHWA (2021) a absorção da EFRA pode chegar a valores próximos a 6%. Ressalta-se que agregados com absorção mais elevada podem promover um aumento do teor ótimo de ligante nas misturas asfálticas. No entanto, este aumento pode ser minimizado com a adição de fíleres às misturas, pois estes promovem, entre outros, um efeito de preenchimento de vazios, resultando em uma redução no teor ótimo de ligante asfáltico.

Com relação ao equivalente de areia, todos os agregados atenderam a condição imposta pela norma DNIT 031/2006-ES.

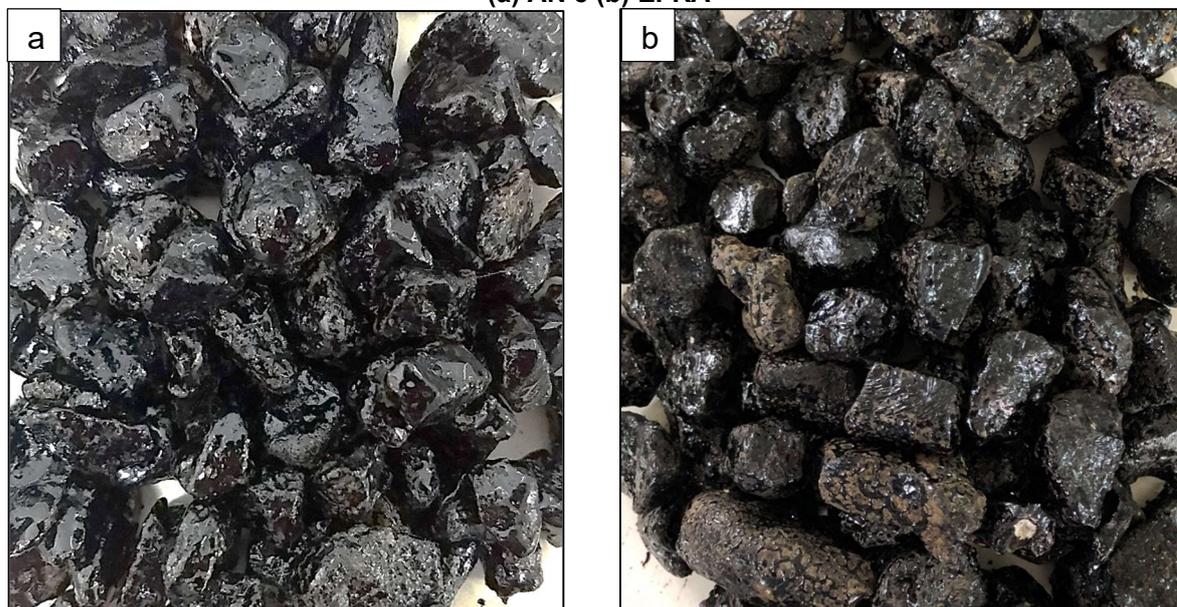
Os valores de resistência ao desgaste pela abrasão *Los Angeles* mostraram-se superiores na EFRA em relação ao agregado natural. A EFRA obteve um valor de 31% enquanto o agregado natural atingiu um valor de 44%. Vale ressaltar que quanto menor é essa porcentagem, mais resistente a abrasão é o agregado, conforme especificado na norma ABNT NBR NM 51:2001. Dessa forma, verifica-se que o agregado siderúrgico apresenta uma melhor resistência ao desgaste do que os agregados locais, que em geral apresentam valores de perda por abrasão próximos aos limites estabelecidos na norma do DNIT 031/2006-ES.

Em relação a durabilidade dos agregados, a norma DNER-EM 260/94 é mais criteriosa que a norma de pavimentação asfáltica (DNIT 031/2006-ES). Sendo assim, mesmo

que a EFRA não tenha atingido os limites estabelecidos pela primeira norma, ela se enquadraria abaixo do limite da segunda.

Por fim, quanto ao critério de adesividade, pela norma DNIT 031/2006–ES, tanto o agregado natural quanto o agregado EFRA tiveram resultados não satisfatórios, no entanto, o agregado EFRA obteve, visualmente, maior degradação que o agregado natural, já que houve uma maior perda de área recoberta do agregado pelo ligante. Na Figura 30 são apresentados os resultados do ensaio de adesividade segundo a norma ABNT NBR 12583:2017.

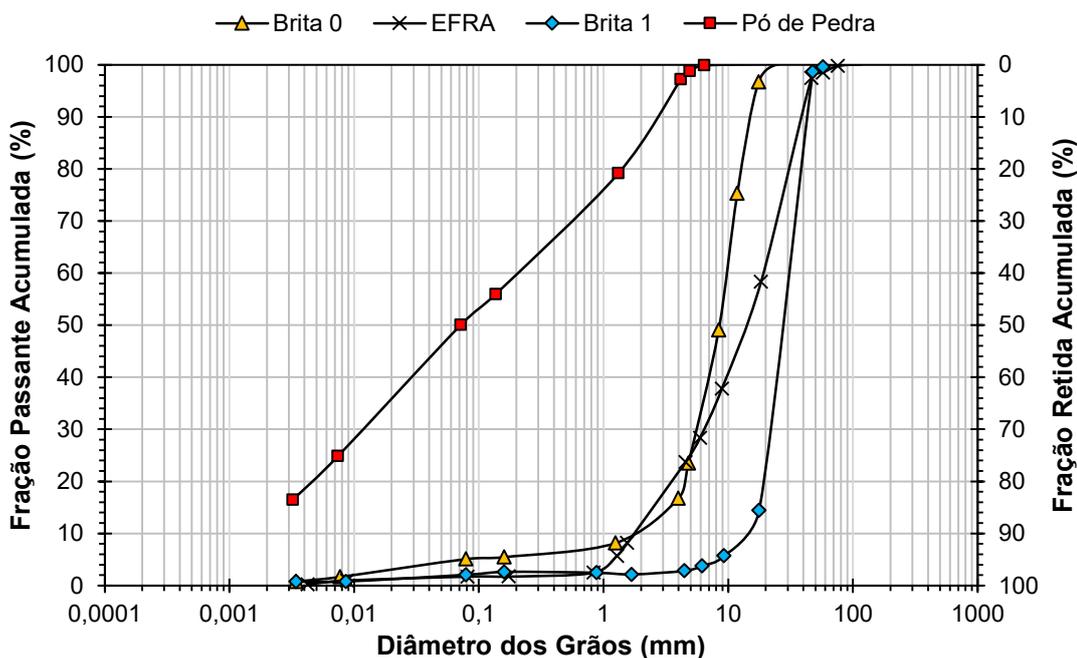
**Figura 30 - Ensaio de adesividade nos agregados
(a) AN e (b) EFRA**



Fonte: Autor

Além dos ensaios já citados, também foi realizado o ensaio de composição granulométrica dos agregados. Na Figura 31 são apresentadas as curvas granulométricas dos materiais.

Figura 31 - Composição granulométrica dos agregados



Além dos ensaios mais convencionais de caracterização dos agregados, foi também realizado o ensaio para a determinação das propriedades de forma por meio do Processamento Digital de Imagens (PDI). Este ensaio foi realizado no *Aggregate Image Measurement System* (AIMS), que forneceu valores para classificar a forma 2D e a angularidade dos agregados miúdos, e a esfericidade, a angularidade e a textura dos agregados graúdos. Na Tabela 9 são apresentados os resultados de acordo com as classificações de Al Rousan (2004) e Ibiapina (2018).

Tabela 9 - Classificação AIMS dos agregados

		Agregado Natural		EFRA	
		Al Rousan (2004)	Ibiapina (2018)	Al Rousan (2004)	Ibiapina (2018)
Forma 2D	Circular	22,2%	0,0%	45,7%	2,8%
	Semicircular	35,2%	93,7%	27,6%	92,2%
	Semialongado	33,3%	6,2%	20,4%	5,1%
	Alongado	9,4%	0,1%	6,3%	0,0%
Angularidade	Arredondado	10,0%	0,8%	16,9%	11,0%
	Subarredondado	58,1%	70,0%	58,4%	73,7%
	Subangular	24,3%	29,0%	19,2%	15,4%
	Angular	7,6%	0,3%	5,5%	0,0%
Textura Superficial	Polido	2,2%	4,5%	5,4%	22,5%
	Macio	2,8%	8,4%	24,9%	52,3%
	Baixa rugosidade	1,7%	30,3%	22,7%	21,7%
	Rugosidade moderada	7,9%	47,8%	23,6%	3,6%
	Alta rugosidade	85,4%	9,0%	23,4%	0,0%
Esfericidade	Achatado/ Alongado	20,9%	2,8%	10,2%	2,2%
	Baixa esfericidade	31,6%	49,7%	33,1%	41,1%
	Esfericidade moderada	28,2%	45,2%	34,4%	54,8%
	Alta esfericidade	19,2%	2,3%	22,3%	1,8%

Fonte: Autor

Na análise de Forma 2D, para Al Rousan (2004) tanto os agregados naturais quanto a EFRA são bem distribuídos entre circular, semicircular e semialongados. Para Ibiapina (2018) a classificação se destaca, com mais de 90%, como semicircular para os dois agregados analisados. Portanto, pode-se dizer que, considerando os dois autores, os agregados possuem suas formas mais próximas de circulares que alongadas.

Analisando a angularidade dos agregados, Al Rousan (2004) classifica o agregado natural entre subarredondado e subangular. Já Ibiapina (2018), além das já classificadas pelo primeiro autor, acrescenta a angularidade arredondado ao agregado natural. Para o agregado EFRA os dois autores os classificam entre subarredondado e subangulares.

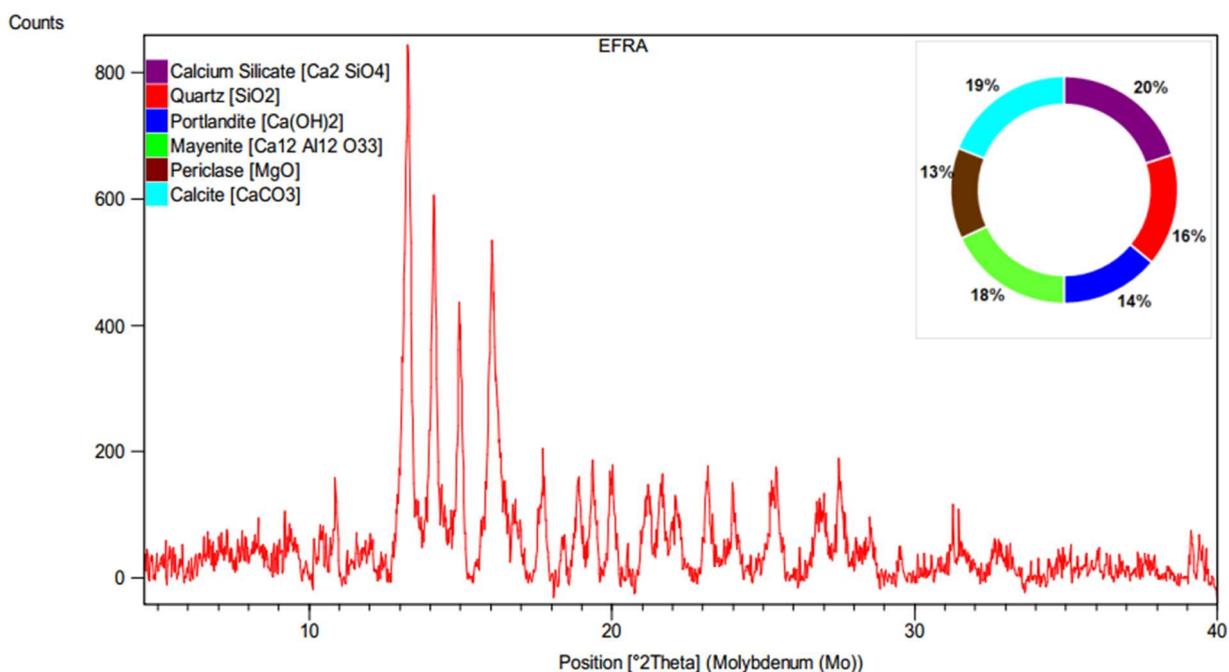
Quanto a textura superficial, Al Rousan (2004) classifica o agregado natural com alta rugosidade, e Ibiapina (2018) o classifica entre baixa rugosidade e rugosidade moderada. Para a EFRA, o primeiro autor apresenta uma classificação bem distribuída entre macio, baixa rugosidade, rugosidade moderada e alta rugosidade, enquanto o segundo autor distribui sua classificação entre polido, macio e baixa rugosidade. Diante dessas classificações, conclui-se que os agregados naturais possuem a textura mais rugosa que os agregados siderúrgicos, o que pode explicar o fato de no ensaio de adesividade ao ligante betuminoso o ligante ter se mantido mais aderido ao agregado natural que ao agregado siderúrgico.

Analisando os agregados quanto a sua esfericidade, Al Rousan (2004) apresenta os agregados naturais bem distribuídos entre todas as classificações, desde achatados/alongados até alta esfericidade, enquanto Ibiapina (2018) o classifica os agregados naturais entre baixa, moderada e alta esfericidade. As EFRA, por sua vez, são classificadas pelos dois autores com esfericidade baixa e moderada.

Considerando os ensaios realizados, percebe-se que os agregados naturais e siderúrgicos possuem uma grande similaridade em suas propriedades físicas e mecânicas. Com isso, verifica-se que a EFRA pode ser um agregado alternativo para o uso na pavimentação asfáltica. No entanto, este agregado apresentou adesividade ao ligante insatisfatória.

Autores como Zhang *et al.* (2015) e Bagampadde, Isacson e Kiggundu (2005) afirmam que um fator primordial quando o assunto é adesividade ligante-agregado, é a mineralogia do agregado, e portanto, essa característica precisa ser levada em consideração. Com isso, foi realizado o difratograma de Raio-X do agregado siderúrgico EFRA a fim de conhecer sua mineralogia e assim, poder fazer inferências sobre o comportamento desse agregado frente a adesividade ligante-agregado. Na Figura 32 é encontrado o DRX da EFRA.

Figura 32 - DRX do agregado siderúrgico EFRA



Fonte: Autor

A partir do difratograma do agregado siderúrgico (Figura 32) foi possível perceber a presença de calcita (CaCO₃), mineral presente em rochas calcárias, rocha que possui boa adesividade com o ligante asfáltico, uma vez que seu caráter básico interage de forma positiva com o ligante, de caráter ácido, sobretudo na presença de água (ZAIDI *et al.*, 2019; ZHANG *et al.*, 2015; CUI *et al.*, 2014). Entretanto, também se registra a presença do mineral quartzo (SiO₂), mineral fortemente presente em rochas graníticas, rocha de caráter ácido, que não possui boa interação com o ligante quando exposto à água, devido a presença do silanol (DONG *et al.*, 2017; BAGAMPADDE; ISACSSON; KIGGUNDU, 2005). Assim sendo, apesar da presença de calcita na mineralogia da EFRA, é possível que o quartzo suprima seu potencial de adesividade, resultando na má adesividade da EFRA constatado no ensaio de adesividade realizado.

Na Tabela 10 são encontrados os resultados do ensaio de fluorescência de Raio-X do agregado siderúrgico EFRA.

Tabela 10 - Resultados do FRX da EFRA

ÓXIDOS	EFRA		Média (%)
	1ª determinação (%)	2ª determinação (%)	
Al ₂ O ₃	9,3	6,02	7,66
CaO	41,2	33,01	37,105
Cr ₂ O ₃	-	< 0,01	-
Fe ₂ O ₃	2,7	12,3	7,5
K ₂ O	-	0,19	0,19
MgO	5,2	4,54	4,87
MnO	0,55	0,5	0,525
Na ₂ O	-	< 0,1	-
P ₂ O ₅	0,1	0,07	0,085
SiO ₂	32,4	21,32	26,86
TiO ₂	-	0,36	0,36
ZrO ₂	-	-	-
SO ₃	4,5	3,87	4,185
ZnO	-	0,13	0,13

Fonte: Autor

Com o FRX da EFRA foi reafirmado, agora por meio dos óxidos presente no agregado, que apesar deste material ser composto por 37% de óxido de cálcio, o óxido de silício também se faz presente com 27% do total de óxidos, impedindo assim a boa interação ligante-agregado.

4.1.2. Fíleres

Todos os fíleres melhoradores de adesividade utilizados na pesquisa passaram pelos mesmos ensaios de caracterização. Na Tabela 11 são encontrados os resultados das massas específicas dos fíleres.

Tabela 11 - Massas específicas dos fíleres

	CAL HIDRATADA	PÓ EP	PÓ AN	PÓ EFRA
Massa Específica Real (g/cm³)	2,33	3,67	2,85	3,08

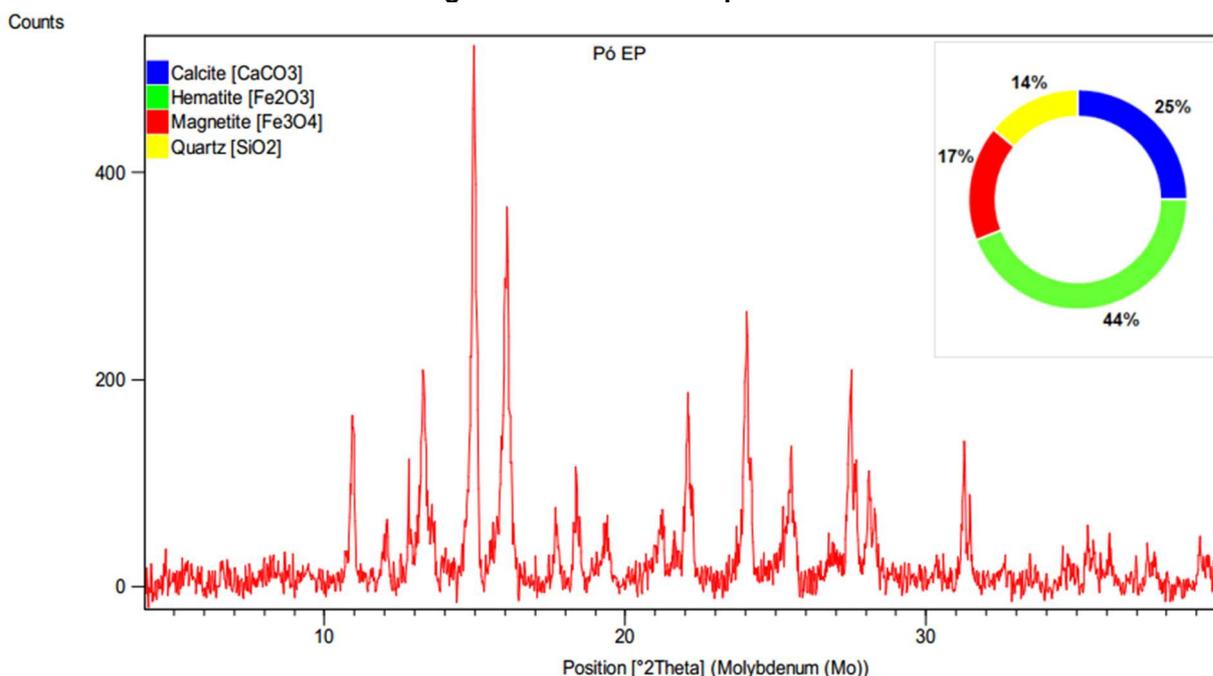
Fonte: Autor

Observou-se que o pó EP possui a massa específica superior aos demais fíleres analisados. Esse resultado era esperado uma vez que este material é originado da etapa de sinterização do minério de ferro durante a produção do aço, sendo rico em

Fe_2O_3 , composto com massa molar de 159,69 g/mol. Já a cal hidratada, rica em $\text{Ca}(\text{OH})_2$, composto com massa molar de 74,09 g/mol, possui a menor massa específica dentre os fíleres da pesquisa.

A composição mineralógica do pó EP é apresentada na Figura 33. Notou-se que dos minerais encontrados no DRX mais de 50% é constituído de hematita e magnetita, minerais com a presença do ferro, ratificando a massa específica elevada do material.

Figura 33 - DRX do filer pó EP



Fonte: Autor

A composição química dos fíleres melhoradores de adesividade podem ser vistas na Tabela 12 por meio dos resultados do ensaio de fluorescência de Raio-X. Verificou-se que o óxido de cálcio é o principal óxido encontrado na cal hidratada, no pó EP o óxido de ferro é encontrado em maior percentual, o óxido de silício prevalece no pó AN, e no pó EFRA registra-se um teor elevado de óxido de cálcio e óxido de silício.

Também foram realizados ensaios de granulometria a laser dos fíleres, e os resultados são apresentados na Figura 34. Percebeu-se que todos os fíleres utilizados possuem suas frações distribuídas em proporções similares, exceto a cal hidratada, que possui grãos mais finos. A presença de grão mais finos pode ter levado a cal hidratada a contribuir, além dos efeitos químicos, com maior ganho de rigidez associado ao efeito fíler promovido por este material observado em diversos parâmetros de fratura analisados nesta pesquisa. A semelhança nas curvas granulométricas dos demais fíleres permite eliminar a variável física das análises dos resultados da pesquisa entre

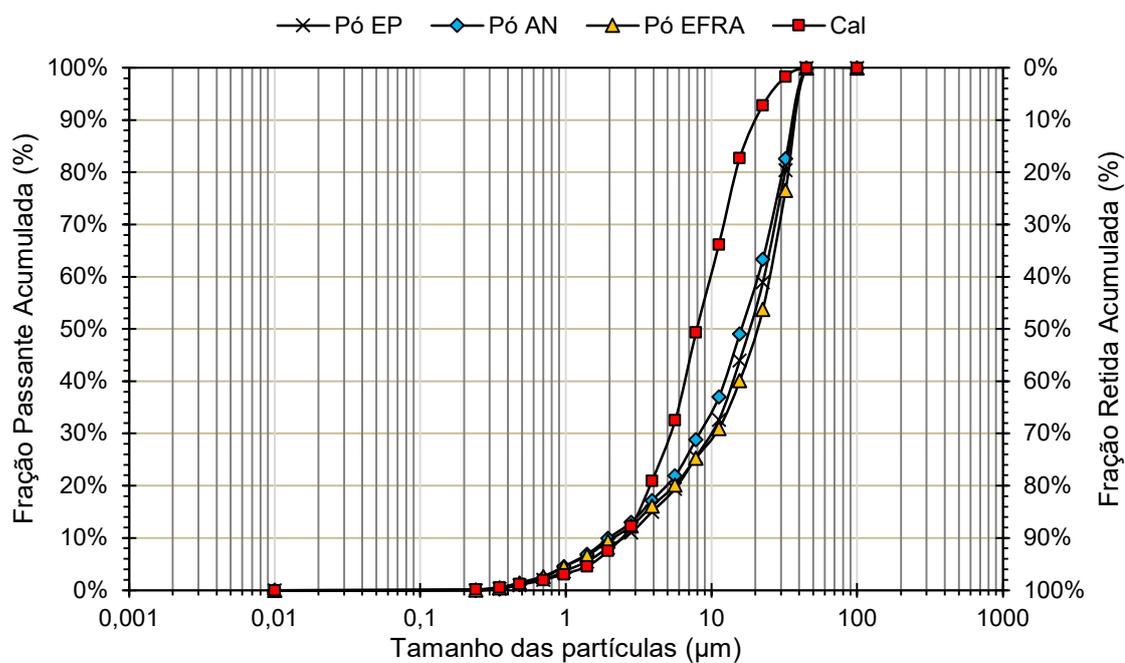
eles, fazendo com que apenas as variações químicas entre os materiais respondam pelas respostas encontradas.

Tabela 12 - Resultados do FRX dos fileres

ÓXIDOS	Fileres			
	Cal hidratada	Pó EP	AN	EFRA
Al ₂ O ₃	0,41	1,76	14,52	7,66
CaO	66,83	12,14	7,46	37,105
Cr ₂ O ₃	< 0,01	0,03	< 0,01	-
Fe ₂ O ₃	0,16	62,94	8,82	7,5
K ₂ O	0,19	0,33	3,56	0,19
MgO	1,35	1,95	2,61	4,87
MnO	< 0,01	0,53	0,12	0,525
Na ₂ O	< 0,1	< 0,1	2,86	-
P ₂ O ₅	0,17	0,08	2,35	0,085
SiO ₂	1,28	5,55	54,65	26,86
TiO ₂	0,02	0,15	1,63	0,36
ZrO ₂	< 0,01	-	0,13	-
SO ₃	-	1,11	-	4,185
ZnO	-	0,08	-	0,13

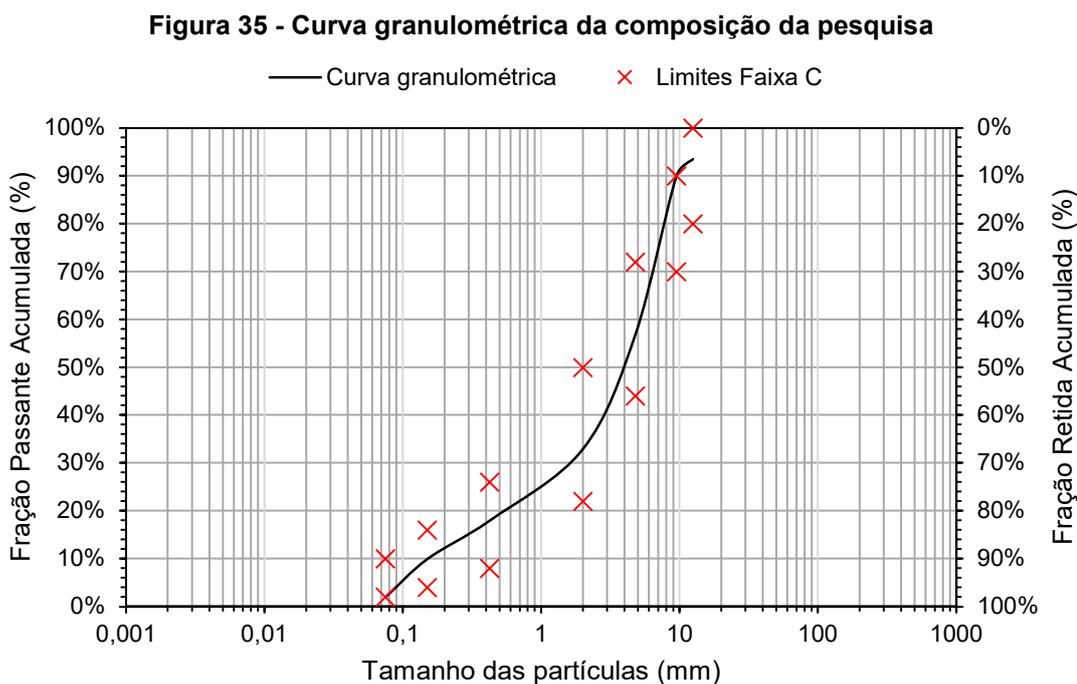
Fonte: Autor

Figura 34 - Granulometria a laser dos fileres



4.2. DOSAGEM DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

Para a preparação de uma mistura asfáltica é necessária a definição da faixa granulométrica dos agregados, que segundo a norma DNIT 031/2006-ES deve ser escolhida aquela cujo diâmetro máximo do agregado é inferior a $2/3$ da espessura da camada. Na Figura 35 é apresentada a curva granulométrica utilizada a pesquisa enquadrada na Faixa C do DNIT.



Fonte: Autor

As misturas asfálticas foram compactadas assumindo os teores ótimos de projeto baseado nas misturas de Izoton *et al.* (2021) e de Moura *et al.* (2020), sendo a mistura AN (100% AN) com o teor ótimo de projeto de 5,1% e a mistura EFRA (25% de substituição do AN por EFRA) com o teor ótimo de projeto de 5,84%.

Obtidos os parâmetros volumétricos com esses teores ótimos de projeto iniciais foram realizadas as devidas adaptações até que se cumprissem os requisitos de misturas asfálticas da norma DNIT 031/2006-ES mencionados na seção 3.4.3. Na Tabela 13 são apresentados os teores ótimos de projetos e os parâmetros volumétricos para cada mistura estudada nesta pesquisa.

Tabela 13 – Teores ótimos de projeto e parâmetros volumétricos das misturas

Propriedades	DNIT 031/2006- ES	Mistura AN	Mistura EFRA	Mistura EFRA+CAL	Mistura EFRA+EP	Mistura EFRA+EFRA
Pb (%)	-	5,10	6,20	5,95	5,95	5,95
Vv (%)	4,0 ± 1,0	4,4	4,1	4,0	4,5	4,1
RBV (%)	75 – 82	70,4	77,5	77,7	75,5	77,0
VAM (%)	≥ 16	15,2	18,4	17,7	18,3	17,9
DMT	-	2,587	2,535	2,536	2,561	2,547
Gmb	-	2,472	2,430	2,436	2,454	2,446

Fonte: Autor

Verificou-se que a mistura EFRA apresentou o teor ótimo de projeto mais elevado dentre as misturas estudadas. Isso era esperado uma vez que a absorção de água do agregado siderúrgico se mostrou aproximadamente seis vezes superior ao do agregado natural, e quanto maior é a absorção do agregado, mais ligante ele vai demandar (HAMEDI; NEJAD; OVEISI, 2015; CHEN *et al.*, 2014; ONOFRE *et al.*, 2011). A redução do teor ótimo de projeto nas misturas com adição de fíler melhorador de adesividade pode ser explicada devido ao preenchimento de parte dos poros do agregado pelos fíleres.

Ressalta-se também que apesar do aumento do teor ótimo de projeto na mistura EFRA, a densidade máxima teórica (DMT) e a densidade aparente das misturas (Gmb) foram inferiores aos das misturas com 100% de agregado natural. Essa redução era esperada já que o agregado siderúrgico possui uma massa específica inferior à do agregado natural granítico.

Foi verificado a influência da elevada massa específica do pó EP na mistura final, uma vez que a mistura EFRA+EP foi a que possuiu as maiores massas específicas (DMT e Gmb), e a mistura com adição de cal hidratada (EFRA+CAL) foi a que obteve os menores valores das massas específicas dentre as misturas com adição de fíler melhorador de adesividade.

4.3. PARÂMETROS VOLUMÉTRICOS DOS CPS PARA ENSAIOS MECÂNICOS

Realizadas as dosagens das misturas, foram moldados os corpos-de-prova cilíndricos tanto para o ensaio de dano por umidade induzida (DUI) quanto para base de preparação dos corpos-de-prova semicirculares do ensaio de fratura.

Para os corpos-de-prova do DUI foi respeitado o intervalo de volume de vazios estabelecido pela norma DNIT 180/2018-ME, sendo este de $7 \pm 1\%$. Os volumes de vazios para os corpos-de-prova do ensaio de fratura foram determinados tanto em formato cilíndrico quanto em semicircular, tendo como critério $4 \pm 0,5\%$ e $3,5 \pm 0,5\%$, respectivamente.

A redução do volume de vazio dos corpos-de-prova semicirculares em detrimento dos cilíndricos se deve à eliminação do efeito de borda realizado na produção dos corpos-de-prova semicirculares, uma vez que são nas extremidades dos corpos-de-prova que há a maior concentração de vazios, portanto, ao extraí-la, o corpo-de-prova reduz seu volume de vazios (LEANDRO, 2016).

Na Tabela 14 são mostrados os volumes de vazios dos corpos-de-prova de cada ensaio realizado nesta pesquisa.

Tabela 14 - Volume de vazios dos corpos-de-prova			
MISTURA	Ensaio de DUI	Ensaio de fratura	
	Vv (%)	Vv (%) Cilíndrico	Vv (%) SCB
AN_NC	6,9	4,5	3,0
AN_C	6,8	3,8	3,0
EFRA_NC	7,4	4,2	3,3
EFRA_C	7,2	4,2	3,1
EFRA+CAL_NC	6,3	4,0	3,5
EFRA+CAL_C	6,5	3,9	3,3
EFRA+EP_NC	7,4	4,8	4,0
EFRA+EP_C	6,8	4,2	3,6
EFRA+EFRA_NC	7,0	4,3	3,9
EFRA+EFRA_C	7,2	4,0	3,8

Fonte: Autor

4.4. ENSAIO DE DANO POR UMIDADE INDUZIDA (DUI) – DNIT 180/2018-ME

Os corpos-de-prova de DUI condicionados e não condicionados foram rompidos conforme norma DNIT 136/2018-ME e na Tabela 15 e Figura 36 encontram-se os resultados obtidos.

Tabela 15 – Resultados do ensaio DUI

Mistura	Não condicionado – NC				Condicionado – C				RRT (%)
	Vv (%)	RT (MPa)	RT média (MPa)	COV (%)	Vv (%)	RT (MPa)	RT média (MPa)	COV (%)	
AN	7,4	1,72	1,80	4,1	7,06	-	0,95	8,2	53%
	6,9	1,86			6,84	0,90			
	6,5	1,83			6,51	1,00			
EFRA	7,8	1,69	1,70	3,1	6,50	-	0,92	6,1	54%
	7,3	1,65			7,70	0,88			
	7	1,76			7,30	0,96			
EFRA+CAL	6,2	1,56	1,52	4,4	6,50	1,78	1,81	5,0	119%
	6,5	1,44			6,50	1,91			
	6,3	1,55			6,40	1,74			
EFRA+EP	7,3	1,34	1,39	4,0	6,80	1,03	0,97	5,9	69%
	7,6	1,39			6,90	0,95			
	7,4	1,45			6,80	0,92			
EFRA+EFRA	7	1,44	1,48	4,1	7,20	0,96	0,96	0,6	65%
	7	1,45			7,20	0,96			
	7	1,55			7,20	0,95			

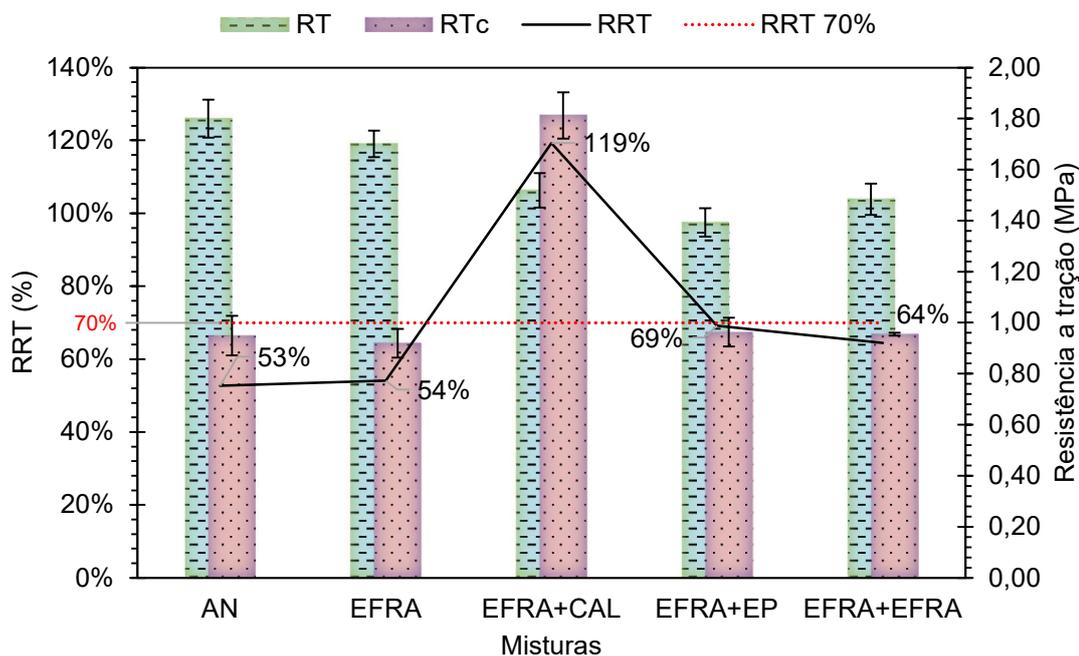
Fonte: Autor

Foram calculados todos os coeficientes de variação das resistências à tração dos corpos-de-prova não condicionados e condicionados, e percebeu-se que o coeficiente de variação (COV) mais elevado é o referente a mistura AN_C, com 8,2% de variação. Este valor apesar de se destacar em relação aos demais, é um valor que fornece confiabilidade aos resultados a serem analisados.

Observou-se que nas misturas AN_C e EFRA_C apenas dois resultados de RT foram considerados, o terceiro foi descartado pois os valores excederam o limite de variação de $\pm 10\%$ permitido pela norma DNIT 136/2018-ME.

Verificou-se que não houve alteração nos valores de RRT das misturas AN e EFRA, ficando ambas com 53% e 54%, respectivamente. Apesar de essas misturas não terem atingido o valor mínimo de 70%, constatou-se que a substituição de 25% de agregado natural por EFRA não causou danos por umidade além do já esperado por misturas com 100% de agregado natural de origem granítica (OLIVEIRA, 2020; HAMED; NEJAD; OVEISI, 2015; ZHANG *et al.*, 2015).

Figura 36 - Resultados do ensaio DUI



Fonte: Autor

Por meio da Figura 36 foi observado que a resistência à tração das misturas AN e EFRA condicionadas foram inferiores às não condicionadas. Esse comportamento era esperado já que a presença de água na mistura enfraquece as ligações adesivas ligante-agregado resultando em resistências inferiores (SAKANLOU; SHIRMOHAMMADI; HAMED, 2018; ABANDANSARI; MODARRES, 2017; HAMED; NEJAD; OVEISI, 2015).

Apesar do ensaio de adesividade do agregado ao ligante betuminoso realizado anteriormente ter indicado uma melhor adesividade do AN ao ligante em comparação à EFRA, no ensaio de DUI as misturas contendo os dois agregados se comportaram de forma similar. Este resultado pode ser atribuído aos efeitos da adesividade químicas e termodinâmicas que se sobressaíram no ensaio DUI em relação aos efeitos da adesividade mecânica inferido pela rugosidade. Com isso, percebeu-se que os efeitos da adesividade química e termodinâmica, tornaram-se mais evidentes quando a amostra foi submetida a um estado de tensão, o que não ocorre no ensaio de adesividade ao ligante betuminoso. Tais resultados corroboram com os de Moura *et al.* (2020) e evidencia a importância da realização do ensaio DUI em detrimento ao ensaio de adesividade ao ligante betuminoso para verificar o efeito que a umidade causa nas misturas asfálticas.

Diversos estudos comprovam os benefícios da adição da cal hidratada em misturas asfálticas para o melhoramento da adesividade, e conseqüentemente do dano causado pela umidade (MOURA *et al.*, 2020; XAVIER; FERREIRA; CASTELO BRANCO, 2020; PHAN *et al.*, 2017; KIM *et al.*, 2008). Visto isso, a presente pesquisa confirmou que houve uma melhora significativa na adesividade da mistura EFRA+CAL. As misturas com adição de cal, portanto, tiveram um incremento de 120% sobre a resistência à tração retida das misturas sem cal (EFRA), alcançando valores superiores a 100%, significando que a adição de cal tornou a mistura condicionada mais resistente à tração que a mistura não condicionada. Isso se deve ao fato de a cal hidratada interagir com ácidos carboxílicos presentes no ligante asfáltico, formando um produto insolúvel que resulta em uma ligação mais estável entre esses materiais, mesmo em presença de água (HUANG *et al.*, 2010).

Analisando a mistura EFRA+EP identificou-se que, apesar de não ser alcançado o valor de RRT mínimo de 70%, houve um crescimento de 28% em relação a mistura EFRA, aumentando de 54% para 69%. Esse acréscimo pode ser explicado pela forte presença de Fe_2O_3 na composição do material de adição, uma vez que estudos apontam uma boa correlação deste composto com a resistência ao dano por umidade (OLIVEIRA, 2020; MOURA *et al.*, 2020; CALA *et al.*, 2019; MOURA *et al.*, 2019; LUCAS JÚNIOR, 2018).

Percebeu-se que a mistura EFRA+EFRA obteve um RRT de 10% a mais que o da mistura EFRA. Essa mistura foi produzida com adição da combinação de pó de AN e EFRA respeitando suas proporções na mistura, ou seja, 75% do fíler adicionado era pó AN e 25% era pó EFRA. Isso se deu com a finalidade de eliminar a variável química da mistura, e avaliar os benefícios que a mistura teria apenas considerando os efeitos físicos de preenchimento das adições dos fíleres. Segundo Bardini, Klinsky e Fernandes (2009), a presença do fíler como preenchedor de vazios altera a resistência à umidade da mistura, com isso, é possível que o RRT da mistura EFRA+EFRA tenha superado ao da mistura EFRA simplesmente pelo aumento do teor de fíler na mistura.

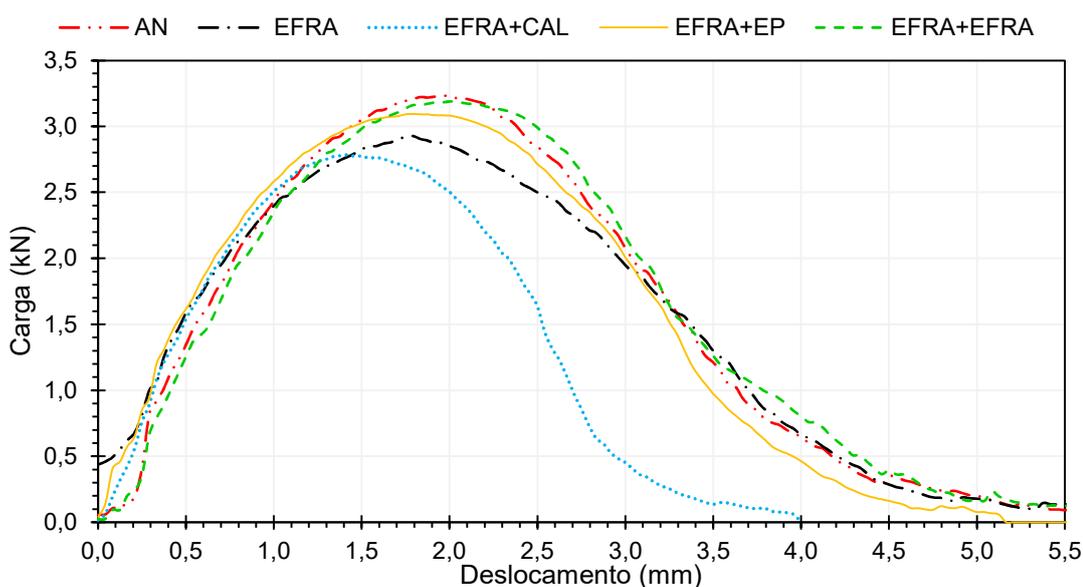
4.5. ENSAIO DE FRATURA COM GEOMETRIA SEMICIRCULAR (SCB)

Nesta seção são apresentados os resultados e as discussões dos parâmetros encontrados no ensaio de fratura com geometria semicircular (SCB). Primeiramente

são apresentados os resultados da carga máxima de ruptura, logo após a energia de fratura das misturas e por fim o índice de flexibilidade juntamente com os valores dos deslocamentos críticos de cada amostra estudada.

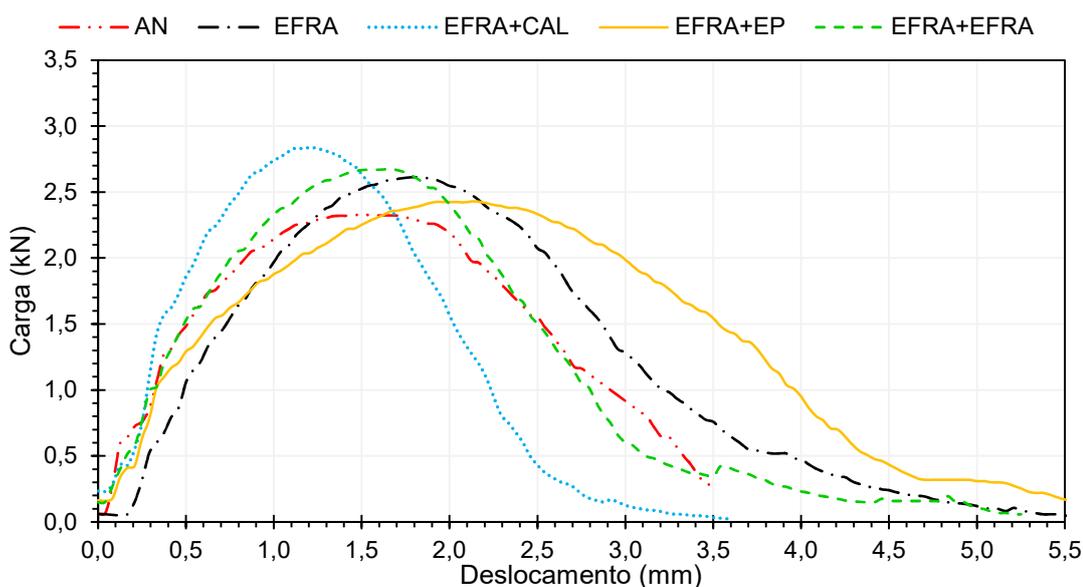
Antes da apresentação dos resultados dos parâmetros isoladamente, estão apresentadas na Figura 37 e na Figura 38 as curvas carga *versus* deslocamento das misturas no estado não condicionado e condicionado, respectivamente.

Figura 37 - Curva média carga x deslocamento das misturas não condicionadas



Fonte: Autor

Figura 38 - Curva média carga x deslocamento das misturas condicionadas



Fonte: Autor

Na Figura 37 percebeu-se que há uma similaridade na inclinação da curva pré-pico, ou seja, todas as misturas antes de serem condicionadas possuem rigidez similar até

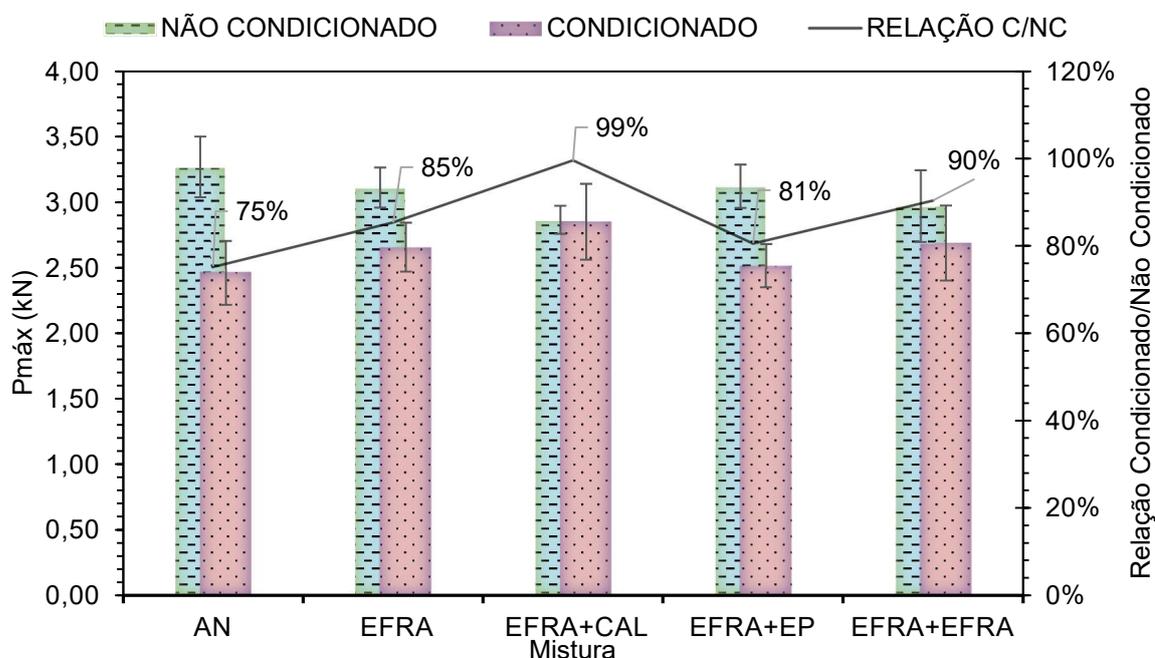
atingir a carga máxima de ruptura. Notou-se também que há uma diferença visível nas áreas sob as curvas, fato este que implica em diferentes capacidades de absorver energia pelas misturas. Esses comportamentos estão mais detalhados nas seções seguintes.

Na Figura 38 verificou-se que, após o condicionamento de umidade, a semelhança na inclinação da curva pré-pico é perdida, e cada mistura se apresenta de maneira individual e única, indicando tendências distintas de ductilidade. Isso mostra que as características distintas de cada mistura, seja por conter agregados diferenciados ou fíleres com diferentes composições químicas, que afetam a adesividade ligante-agregado são importantes quando o dano por umidade é induzido nas misturas.

4.5.1. Carga máxima de ruptura ($P_{máx}$)

Na Figura 39 são apresentados os resultados das cargas máximas de todas as amostras não condicionadas e condicionadas, assim como a relação entre os valores condicionados pelos não condicionados, apontando a sensibilidade da amostra ao condicionamento de umidade.

Figura 39 - Comparação dos $P_{máx}$ e Relação Condicionado/Não Condicionado das misturas



Fonte: Autor

Percebe-se que não houve variações significativas nas cargas máximas de ruptura entre as amostras não condicionadas, e como visto na Figura 37, notou-se que em

todas as misturas as inclinações das curvas antes do pico mantiveram-se similar entre as misturas. Com isso foi possível perceber que todas as misturas sem condicionamento de umidade tiveram o mesmo comportamento ao resistir a carga aplicada sobre elas até que atingissem sua máxima carga suportada.

A mistura AN não condicionada obteve o maior $P_{máx}$ dentre as demais misturas, isso pode ser explicado pela rugosidade do agregado natural ser maior que a do agregado EFRA (Tabela 9), o que faz com que haja uma maior aderência mecânica na mistura. Entretanto, na Figura 39, quando a mistura AN é condicionada, o efeito negativo relacionado a mineralogia do agregado natural se sobressai, devido à presença do grupo silanol, que, como explicado anteriormente, reage com a água e liberam íons de hidrogênio (H^+) o que os tornam carregados negativamente, gerando uma força de repulsão com o ligante asfáltico (DONG *et al.*, 2017; HARNISH, 2010; BAGAMPADDE; ISACSSON; KIGGUNDU, 2005). Como resultado, a mistura AN teve um decréscimo no $P_{máx}$ de 25%.

A mistura EFRA, apesar de ser composta por agregado EFRA que possui menor rugosidade e conseqüentemente menor adesividade mecânica, também apresentou valores de $P_{máx}$ elevados. A explicação pode estar relacionada às características químicas dos agregados de EFRA. Estes apresentam cerca de 37% de CaO em sua composição química, composto que melhora a adesividade ligante-agregado. Assim, a interação química leva a uma adesividade química que pode ter compensado a menor adesividade mecânica em comparação à mistura AN. Além disso, observa-se que mesmo com um teor de ligante superior ao da mistura com AN, o que poderia levar a uma redução de rigidez nas misturas contendo EFRA, ainda assim observou-se a manutenção deste parâmetro, o que pode novamente estar associado aos efeitos químicos da EFRA e dos fíleres adicionados.

Após o condicionamento de umidade houve uma tendência esperada de queda nas cargas máximas de ruptura, exceto nas misturas EFRA+CAL, que se mantiveram praticamente inalteradas, tendo uma redução de apenas 1%. Percebeu-se que o $P_{máx}$ condicionado da mistura AN obteve o menor resultado dentre as misturas, corroborando com o resultado de DUI.

A mistura EFRA+CAL obteve uma relação entre os valores de $P_{máx}$ de amostras condicionadas e não condicionadas de 99%, o que corrobora com o resultado da

mesma mistura no ensaio DUI apresentado na Figura 36. Esse comportamento era esperado uma vez que são conhecidas as boas interações físico-químicas da cal hidratada na adesividade ligante-agregado, sobretudo quando a mistura é submetida processo de condicionamento de umidade (MOURA *et al.*, 2020; XAVIER; FERREIRA; CASTELO BRANCO, 2020; PHAN *et al.*, 2017; KIM *et al.*, 2008).

A fim de ratificar as conclusões sobre a carga máxima de ruptura, foram realizadas análises de variância (ANOVA) para verificar o grau de significância da influência do tipo de agregado (natural e siderúrgico) e do estado de condicionamento das misturas (Tabela 16). Foram verificados os efeitos individuais e interativos das variáveis.

Tabela 16 - ANOVA - Influência dos agregados e do condicionamento no P_{máx}

Effect	SQ	GL	MQ	F	p	Probabilidade
Intercept	122,2539	1	122,2539	2887,268	0,000000	-
Agregado	0,0016	1	0,0016	0,038	0,849296	15,07%
Condicionamento	1,4694	1	1,4694	34,702	0,000104	99,99%
Agregado*Condicionamento	0,1142	1	0,1142	2,696	0,128850	87,11%
Erro	0,4658	11	0,0423	-	-	-

Fonte: Autor

Com os resultados apresentados na Tabela 16, percebeu-se que quando as variáveis são analisadas separadamente, o tipo de agregado é a que gera menos influência nos resultados da carga máxima de ruptura, enquanto o condicionamento das misturas tem uma influência significativa sobre esse parâmetro. Por outro lado, o efeito sinérgico do tipo de agregado e a existência ou não de condicionamento, mostra-se influente nos resultados de P_{máx}. Isto indica que o efeito do agregado só tem significância estatística quando este é submetido ao condicionamento.

Na Tabela 17 foi feita a análise da influência do tipo de fíler, do condicionamento das misturas e a interação entre variáveis nos resultados da carga máxima de ruptura. Foi verificado que não há influência significativa do tipo de fíler no valor de P_{máx}, porém quando analisado o efeito do condicionamento das amostras, a ANOVA mostrou uma probabilidade de 99,99% de influência nos resultados. Ao observar o efeito da interação entre as variáveis, percebeu-se que houve influência significativa nos resultados. Novamente, o efeito do fíler se torna mais significativo quando as amostras são submetidas ao dano por umidade induzida.

Tabela 17 - ANOVA - Influência dos fileres e do condicionamento no Pmáx

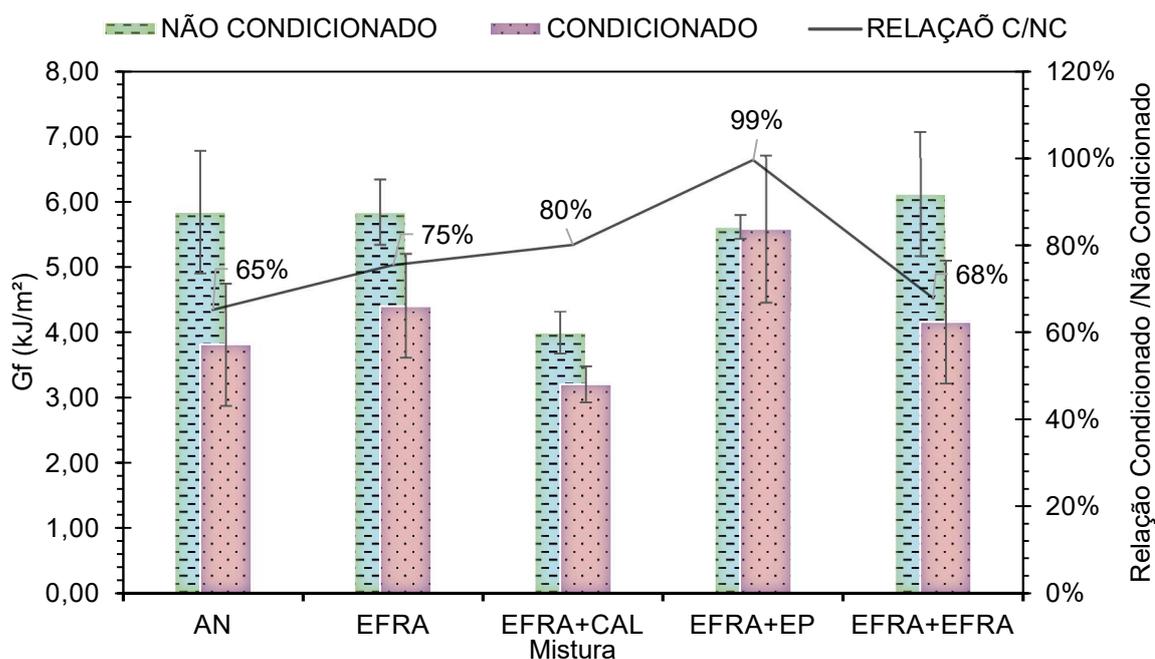
Effect	SQ	GL	MQ	F	p	Probabilidade
Intercept	260,1481	1	260,1481	5685,261	0,000000	-
Filer	0,0209	3	0,0070	0,153	0,926985	7,30%
Condicionamento	0,9248	1	0,9248	20,211	0,000150	99,99%
Filer*Condicionamento	0,3842	3	0,1281	2,799	0,061720	93,83%
Erro	1,0982	24	0,0458	-	-	-

Fonte: Autor

4.5.2. Energia de fratura (Gf)

Na Figura 40 são apresentados os resultados das energias de fratura de todas as amostras não condicionadas e condicionadas, assim como a relação entre os valores condicionados pelos não condicionados, apontando assim a sensibilidade da amostra ao condicionamento de umidade.

Figura 40 - Comparação das Gf e Relação Condicionado/Não Condicionado das misturas



Fonte: Autor

É possível notar que sem condicionamento, as energias de fratura das misturas são similares, exceto a mistura EFRA+CAL. Esse comportamento foi comprovado pelas cargas máximas de ruptura (Figura 39) e pela análise das curvas carga *versus* deslocamento (Figura 37), uma vez que a energia de fratura está diretamente ligada à área sob a curva deste gráfico.

A mistura EFRA+CAL, assim como ocorreu na análise do Pmáx, foi a mistura que se destacou entre as demais, com uma energia de fratura inferior. Pesquisas de

Rodrigues *et al.* (2019), Phan *et al.* (2017) e Little e Petersen (2005) apontam que a adição de cal hidratada na mistura asfáltica torna a matriz menos dúctil, o que ocasiona a ruptura em um menor tempo de aplicação da carga. Essa baixa ductilidade pode ser atribuída ao efeito físico de preenchimento de vazios, uma vez que a cal hidratada possui as menores partículas dentre os fíleres estudados, como visto no ensaio de granulometria a laser (Figura 34). O preenchimento de vazios gera um melhor empacotamento da mistura, resultando em um intertravamento mais eficiente, dificultando as deformações, fazendo com que as cargas aplicadas pelas amostras se dissipem mais facilmente na forma de trincas.

Observou-se que na relação das energias de fratura em estado condicionado pelo não condicionado há uma baixa variação entre as misturas AN e EFRA, 65% e 75% respectivamente, reafirmando a falta de afinidade dessas misturas com a água vista no ensaio de DUI (Figura 36). Verificou-se, do mesmo modo, uma reduzida relação na mistura EFRA+EFRA, de 68%. Esse resultado pode ser atribuído a falta de interação química entre os agregados e os pós adicionados nessa mistura, uma vez que eles possuem a mesma composição química.

Na mistura EFRA+EP foi observado uma variação de apenas 1% entre a energia de fratura condicionada e não condicionada, o que pode ser explicado pelo alto percentual de óxido de ferro na composição do fíler utilizado, pó EP. Estudos de Moura *et al.* (2020), Cala *et al.* (2019) e Porto *et al.* (2018) apontam que a presença de FeO nas misturas asfálticas melhoram a adesividade ligante-agregado, assim há uma redução em suas fraturas adesivas e por consequência minimiza os impactos do dano devido a umidade.

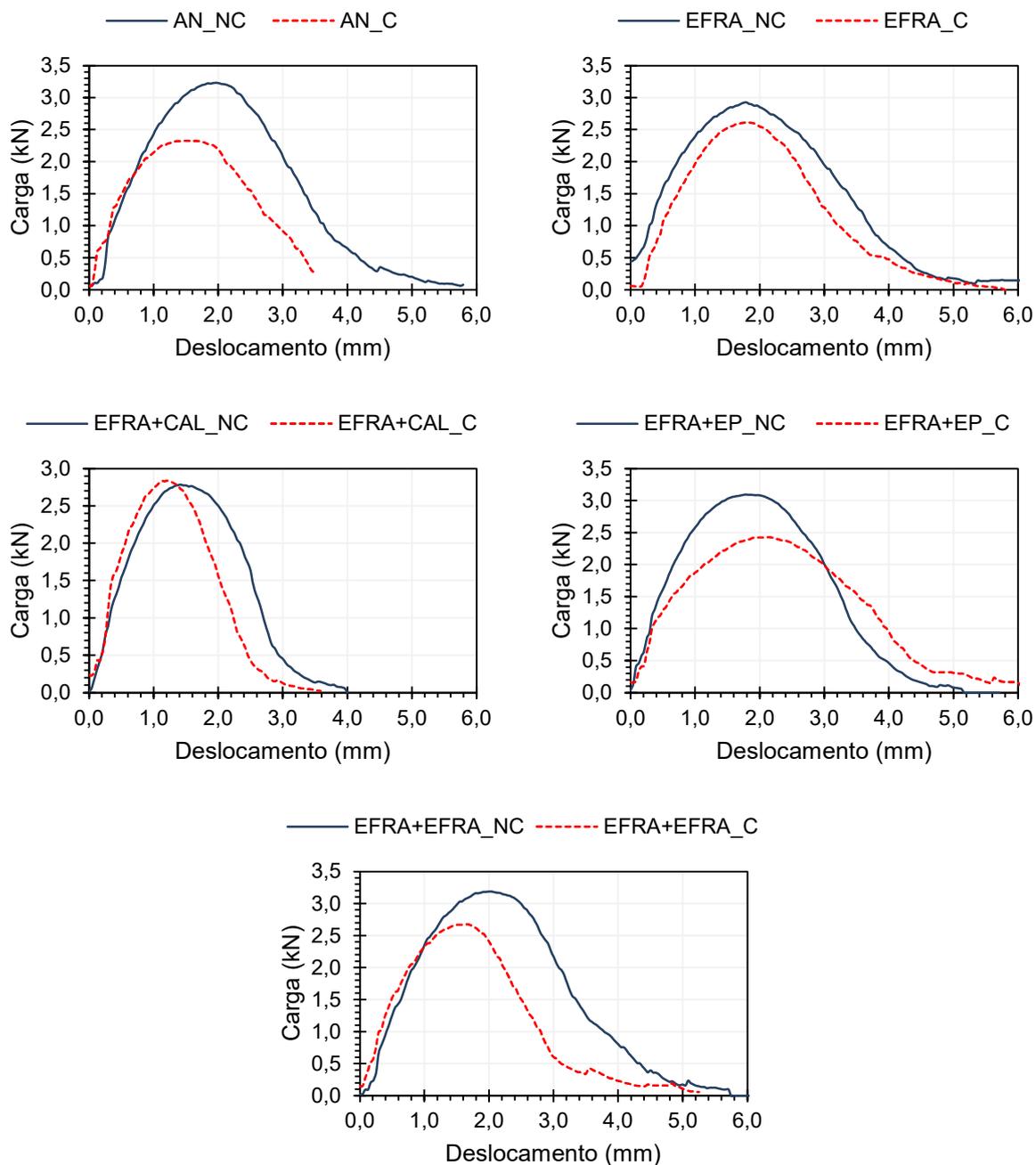
A mistura EFRA+CAL obteve uma relação de energia de fratura condicionada não condicionada de 80%. Apesar de ter tido um valor inferior ao da mistura com pó EP, ainda assim é uma relação satisfatória, levando em consideração que essa mesma relação para o ensaio DUI tem um limite mínimo de 70%. Pode-se atribuir esse bom resultado aos notórios efeitos químicos e termodinâmicos presentes na interação da cal com os agregados (MOURA *et al.*, 2020; ZAIDI *et al.*, 2019; KIM *et al.*, 2008).

Na Figura 41 são apresentadas as curvas carga *versus* deslocamento de cada mistura condicionada e não condicionada. Observou-se que em todas as misturas, exceto a EFRA+CAL o pico (P_{máx}) do estado condicionado se manteve abaixo do estado não

condicionado. Percebe-se também que em todas as misturas a energia de fratura do estado condicionado encontra-se inferior à do estado não condicionado, exceto na mistura EFRA+EP.

Pela Figura 40 a mistura EFRA+EP manteve-se com energia de fratura equivalente antes e depois do condicionamento, levando ao entendimento de que não houve alteração na ductilidade da mistura, porém ao analisar a curva carga *versus* deslocamento (Figura 41) notou-se que há um comportamento distintos das curvas, o que torna o parâmetro energia de fratura insuficiente para determinar a rigidez da mistura. Para isso, foram calculados os índices de flexibilidade das misturas.

Figura 41 - Curvas Carga x Deslocamento das misturas não condicionadas e condicionadas



Fonte: Autor

A fim de ratificar as conclusões sobre a energia de fratura, foram realizadas duas análises de variância (ANOVA). Uma verificando a influência do tipo de agregado (natural e siderúrgico) e do estado de condicionamento das misturas. Outra análise feita foi o estudo da influência do tipo de fíler (cal hidratada, pó EP e pó EFRA/AN) e do tipo de condicionamento das misturas. Foram analisados os efeitos individuais e sinérgicos das variáveis.

Tabela 18 - ANOVA - Influência dos agregados e do condicionamento no Gf

Effect	SQ	GL	MQ	F	p	Probabilidade
Intercept	365,9570	1	365,9570	570,3210	0,000000	-
Agregado	0,3217	1	0,3217	0,5013	0,493648	50,64%
Condicionamento	11,0883	1	11,0883	17,2804	0,001598	99,84%
Agregado*Condicionamento	0,3323	1	0,3323	0,5179	0,486743	51,33%
Erro	7,0584	11	0,6417	-	-	-

Fonte: Autor

Pela Tabela 18 verificou-se que quando as variáveis são analisadas de forma isoladas, o tipo de agregado foi a variável que gerou a menor influência nos resultados da energia de fratura, o que não ocorreu com a análise da variável condicionamento, ou seja, a depender de a amostra passar ou não pelo condicionamento, há uma influência significativa na energia de fratura. Uma terceira análise mostrou que há uma probabilidade de 51,33% do efeito interativo das variáveis influenciar nos valores de energia de fratura das misturas.

Na Tabela 19 foi feita a análise da influência tanto do tipo de fíler adicionado nas misturas, quanto do condicionamento realizado, e verificou-se que em ambos os casos houve uma influência significativa entre os resultados, ou seja, os valores de Gf se mostraram diferentes. Ao observar o efeito de segunda ordem, verificando a interação entre as variáveis, percebeu-se que apesar da probabilidade neste caso ser inferior à das variáveis isoladas, ainda assim foi verificada influência significativa nos resultados.

Tabela 19 - ANOVA - Influência dos fíleres e do condicionamento no Gf

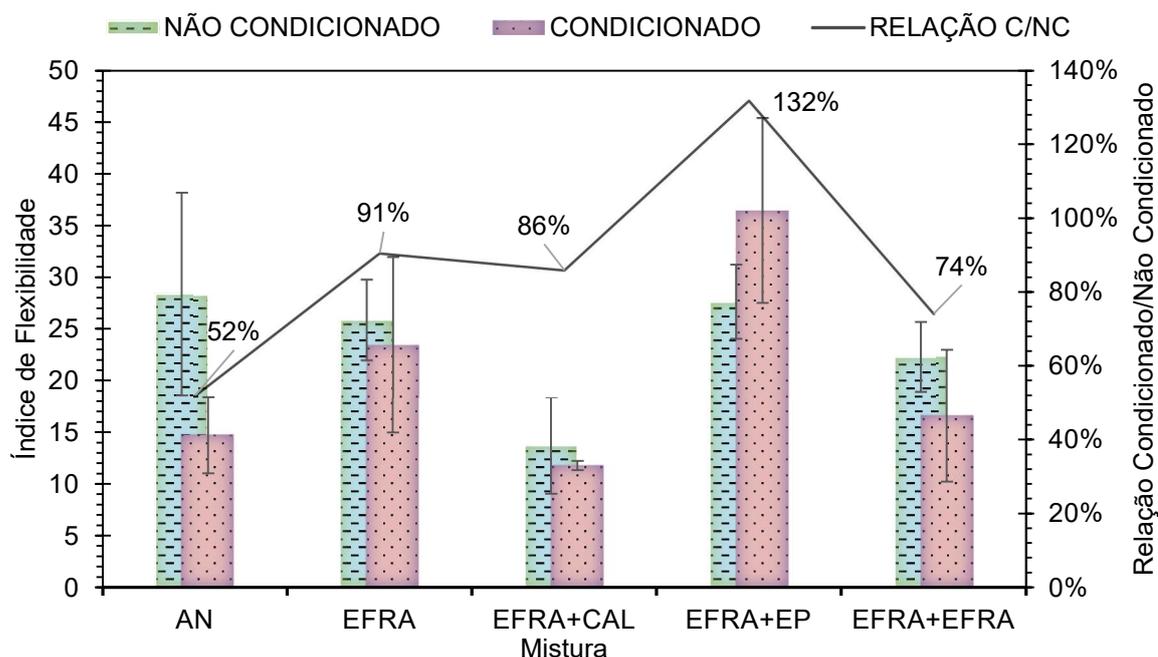
Effect	SQ	GL	MQ	F	p	Probabilidade
Intercept	758,1098	1	758,1098	1458,835	0,000000	-
Fíler	18,2846	3	6,0949	11,728	0,000063	99,99%
Condicionamento	8,9202	1	8,9202	17,165	0,000367	99,96%
Fíler*Condicionamento	4,1874	3	1,3958	2,686	0,069192	93,08%
Erro	12,4720	24	0,5197	-	-	-

Fonte: Autor

4.5.3. Índice de Flexibilidade (IF) e Deslocamento Crítico (δ crítico)

Na Figura 42 são apresentados os resultados dos índices de flexibilidade tanto para as amostras em estado não condicionado quanto em estado condicionado. Também são apresentadas as relações dos valores condicionados pelos não condicionados, revelando assim o grau de influência que o condicionamento causou nas amostras.

Figura 42 - Comparação dos IF e Relação Condicionado/Não Condicionado das misturas



Fonte: Autor

Observou-se, portanto, que nos resultados tanto dos índices de flexibilidade quanto dos deslocamentos críticos ocorreram desvios padrões mais elevados que nos dos demais parâmetros. Esse acontecimento pode ser explicado pelo fato de que o IF e o δ crítico estão associados a forma do segmento pós-pico da curva carga *versus* deslocamento, ou seja, à inclinação da curva pós-pico, com isso os parâmetros se mostram muito mais sensíveis às mudanças de densidade da amostra e a variabilidade do material durante a execução do ensaio (GODOI, 2017).

Pela Figura 42 constatou-se mais uma vez que a mistura EFRA+CAL foi a que obteve menor flexibilidade devido ao enrijecimento ocasionado pela adição da cal hidratada na mistura asfáltica. As demais misturas, sem condicionamento, mantiveram-se similares, sem grandes variações entre si.

Ao analisar os índices de flexibilidade das misturas pós condicionamento, notou-se que há uma inclinação das misturas de adquirirem rigidez, e isso pode ser atribuído pelo efeito sinérgico causado pela adição de fíler à mistura e a adesividade ligante-agregado.

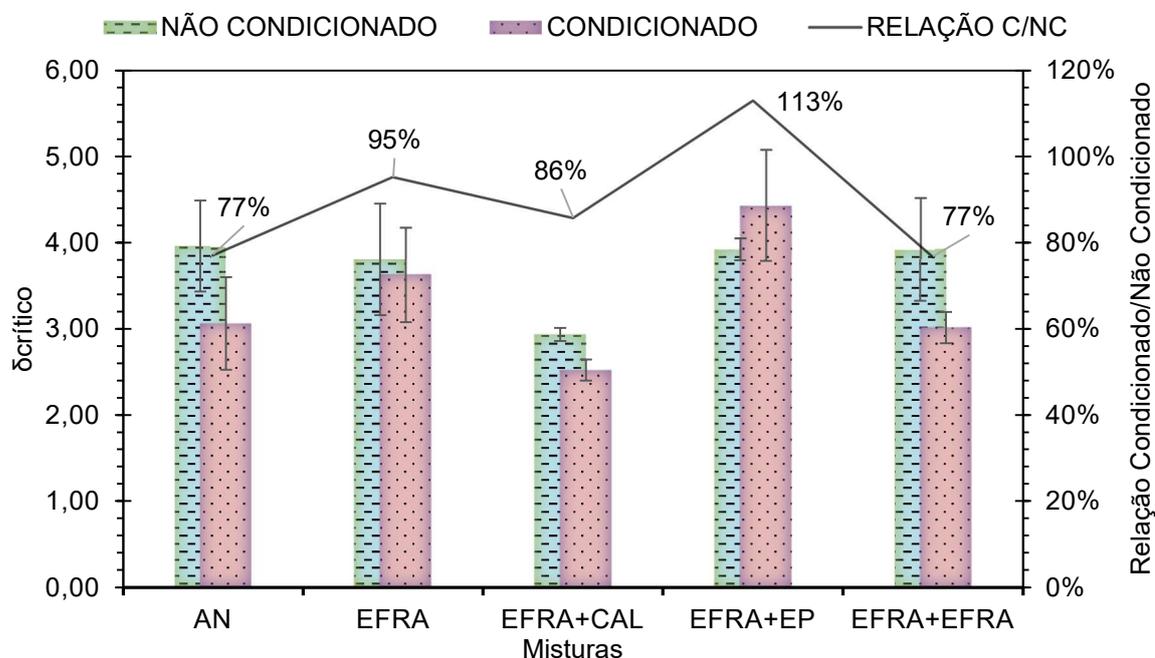
A mistura AN se destaca como a mistura que teve a maior variação pré/pós condicionamento. Esse comportamento se deve a baixa adesividade ligante-agregado quando em contato com umidade, ou seja, pela afinidade do agregado granítico à

água, resultando em fraturas adesivas, enfraquecendo a mistura, tornando-a susceptível a ruptura de maneira mais acelerada.

A mistura EFRA+EP, apesar de ter permanecido com a energia de fratura similar antes e após o condicionamento, com o índice de flexibilidade verificou-se que a mistura ganha ductilidade após o condicionamento de umidade. Esse comportamento pode ser explicado pela melhora na adesividade que o óxido de ferro presente do pó EP gera à mistura, acarretando uma redução das fraturas adesivas pós condicionamento, e conseqüentemente, fazendo-a resistir um maior carregamento antes de se romper.

Na Figura 43 verifica-se mais uma vez que todas as misturas, exceto a EFRA+CAL tiveram um comportamento similar quando não condicionadas. A mistura EFRA+CAL obteve um deslocamento crítico inferior, validando o aumento da rigidez das misturas asfálticas com adição de cal hidratada. Notou-se também que após o condicionamento, houve uma tendência de aumento da rigidez das amostras, exceto para as misturas EFRA+EP, assim como também observado nos índices de flexibilidade, apontando que a mistura, pós condicionamento, tornou-se mais dúctil.

Figura 43 - Comparação dos δ crítico e Relação Condicionado/Não Condicionado das misturas



Fonte: Autor

A fim de ratificar as conclusões sobre o índice de flexibilidade e do deslocamento crítico, foram realizadas duas análises de variância (ANOVA). A primeira foi o estudo da influência do tipo de agregado (natural e siderúrgico) e do estado de

condicionamento das misturas. A segunda análise feita foi o estudo da influência do tipo de fíler (cal hidratada, pó EP e pó EFRA/AN) e do tipo de condicionamento das misturas. Foram verificados os efeitos individuais e interativos das variáveis.

Tabela 20 - ANOVA - Influência dos agregados e do condicionamento no IF

Effect	SQ	GL	MQ	F	p	Probabilidade
Intercept	7920,008	1	7920,008	150,3920	0,000000	-
Agregado	36,715	1	36,715	0,6972	0,421502	57,85%
Condicionamento	238,133	1	238,133	4,5219	0,056927	94,31%
Agregado*Condicionamento	115,103	1	115,103	2,1857	0,167355	83,26%
Erro	579,287	11	52,662	-	-	-

Fonte: Autor

Com os resultados da Tabela 20, verificou-se que quando as variáveis são analisadas individualmente, o tipo de agregado foi a variável que menos gerou influência dos resultados do índice de flexibilidade. Portanto, ao analisar o condicionamento das misturas, percebeu-se que há influência significativa dessa nos valores do IF. A análise do efeito de segunda ordem mostrou que há uma probabilidade de 83,26% das variáveis combinadas causarem influência dos valores do índice de flexibilidade das misturas.

Na Tabela 21 foi feita a análise da influência tanto do tipo de fíler, do condicionamento das misturas e da interação entre as variáveis nos resultados do índice de flexibilidade. Foi verificado que não houve influência significativa do condicionamento nos valores de IF, porém, segundo a ANOVA, há uma probabilidade de 100% de que o tipo de fíler causa influência dos resultados do parâmetro analisado. Ao observar o efeito de segunda ordem, a interação entre o tipo de fíler e o condicionamento das misturas, verificou-se que há influência significativa nos resultados do índice de flexibilidade das misturas.

Tabela 21 - ANOVA - Influência dos fíleres e do condicionamento no IF

Effect	SQ	GL	MQ	F	p	Probabilidade
Intercept	15882,52	1	15882,52	500,5831	0,000000	-
Fíler	1608,09	3	536,03	16,8946	0,000004	100,00%
Condicionamento	0,93	1	0,93	0,0293	0,865626	13,44%
Fíler*Condicionamento	240,31	3	80,10	2,5247	0,081574	91,84%
Erro	761,47	24	31,73	-	-	-

Fonte: Autor

Na Tabela 22 verificou-se que quando as variáveis são analisadas de forma isoladas, o tipo de agregado foi a variável que gerou a menor influência nos resultados do deslocamento crítico, o que não ocorreu com a análise da variável condicionamento,

ou seja, a depender de a amostra passar ou não pelo condicionamento, há influência significativa no δ crítico das misturas. A terceira análise, referente ao efeito de segunda ordem, constatou que também há influência significativa quando levado em conta a interação das variáveis.

Tabela 22 - ANOVA - Influência dos agregados e do condicionamento no δ crítico

Effect	SQ	GL	MQ	F	p	Probabilidade
Intercept	193,2969	1	193,2969	587,6762	0,000000	-
Agregado	0,1622	1	0,1622	0,4931	0,497143	50,29%
Condicionamento	1,0750	1	1,0750	3,2683	0,098022	90,20%
Agregado*Condicionamento	0,4774	1	0,4774	1,4515	0,253572	74,64%
Erro	3,6181	11	0,3289	-	-	-

Fonte: Autor

Por fim, na Tabela 23 foi feita a análise da influência tanto do tipo de fíler adicionado nas misturas, quanto do condicionamento realizado, e verificou-se que o tipo de fíler foi a variável que trouxe maior influência aos resultados dos deslocamentos críticos analisados.

Tabela 23 - ANOVA - Influência dos fileres e do condicionamento no δ crítico

Effect	SQ	GL	MQ	F	p	Probabilidade
Intercept	397,8315	1	397,8315	2009,303	0,000000	-
Fíler	8,8377	3	2,9459	14,879	0,000011	100,00%
Condicionamento	0,4975	1	0,4975	2,513	0,126021	87,40%
Fíler*Condicionamento	2,0831	3	0,6944	3,507	0,030687	96,93%
Erro	4,7519	24	0,1980	-	-	-

Fonte: Autor

Os resultados dos parâmetros de cada corpo-de-prova com e sem condicionamento encontram-se tabelados no APÊNDICE A.

Encontram-se no APÊNDICE B as imagens antes e depois da realização do ensaio de fratura SCB de cada mistura condicionada e não condicionada. Foi possível notar por meio dessas imagens que houve uma forte tendência do trincamento acompanhar a superfície dos agregados, indicando a ocorrência de fraturas adesivas, quando a trinca acontece na interface agregado-ligante. A mistura EFRA+CAL destacou-se por ter um agregado fraturado durante a propagação da trinca. Como visto em todos os parâmetros de fratura analisados, a adição de cal hidratada eleva a rigidez da mistura, logo, a fratura do agregado pode ter ocorrido pelo fato da parte fina da mistura ter alcançado uma rigidez elevada, fazendo com que as tensões fossem concentradas nas bordas dos agregados e levado a sua consequente fratura.

5. CONCLUSÕES

Esta pesquisa teve como objetivo entender qual a influência que as características dos agregados respondem frente às propriedades de fratura quando as misturas asfálticas são submetidas ao dano por umidade. Também foi proposto perceber e compreender os efeitos da adição de fileres melhoradores de adesividade em alguns parâmetros de fratura quando as misturas eram submetidas ao condicionamento de umidade. Por meio dos resultados e discussões realizadas após a execução do ensaio de dano por umidade induzida e do ensaio de fratura com geometria semicircular, foi possível chegar às seguintes conclusões:

- A absorção dos agregados siderúrgicos é aproximadamente seis vezes superior à dos agregados naturais estudados. Como resultado, as misturas com a presença do agregado EFRA demandam um maior teor de ligante que as misturas com 100% de agregado natural;
- Os agregados naturais apresentam uma rugosidade superior à dos agregados siderúrgicos, fator esse que pode levar a uma melhor adesão mecânica;
- O estudo da composição química e mineralógica dos agregados desta pesquisa mostraram que a EFRA, apesar de possuir um elevado teor de óxido de cálcio em sua composição, também possui uma quantidade expressiva de óxido de silício, inibindo os benefícios do primeiro composto quanto a adesividade ao ligante;
- O estudo da composição química e mineralógica dos fileres melhoradores de adesividade utilizados nesta pesquisa mostraram-se relevantes quanto a análise da adesividade das misturas asfálticas. O óxido de cálcio presente na cal hidratada se destacou nos efeitos positivos da adesividade, seguido do óxido de ferro encontrado no pó EP. No entanto, estes efeitos só são perceptíveis no desempenho das misturas asfálticas quando estas são submetidas ao dano por umidade induzida;
- As misturas com agregado EFRA e adições de fileres melhoradores de adesividade tiveram um incremento em suas resistências ao dano por umidade, segundo o ensaio DUI. O efeito sinérgico das características química e física se mostraram evidentes em todas as misturas no estado condicionado. Com esse resultado percebeu-se que apenas considerando o efeito físico do fíler de

preenchimento de vazios não é suficiente para justificar as resistências ao DUI das misturas;

- A mistura com 100% de agregado natural obteve a menor relação condicionado/ não condicionado em todos os parâmetros de fratura analisados, corroborando com os resultados de baixa resistência ao dano por umidade visto no ensaio de DUI. O decréscimo que ocorre nos parâmetros pós condicionamento se deve ao alto teor de óxido de silício nos agregados naturais graníticos. A presença de SiO_2 nos agregados leva à formação do silanol, que por sua vez, faz com que os agregados possuam uma maior afinidade de ligação com a água do que com o ligante asfáltico, resultando em fraturas adesivas, tornando as misturas menos resistentes aos esforços aplicados sobre elas;
- O ensaio de dano por umidade induzida (DUI) mostrou-se mais eficaz para a avaliação dos efeitos das diferentes características de adesividade ligante-agregado avaliadas em relação ao ensaio de adesividade ao ligante betuminoso. Isso mostra a importância da realização do ensaio de DUI nas misturas asfálticas, principalmente para avaliar as interações agregado-ligante.
- Pelas curvas carga *versus* deslocamento verificou-se que dentre as misturas estudadas, a mistura com adição de cal hidratada é a mistura com maior rigidez, o que corrobora com a tendência esperada relatada pela literatura. Esse resultado foi confirmado em todos os parâmetros analisados ($P_{\text{máx}}$, G_f , IF e $\delta_{\text{crítico}}$). Além dessa característica relevante, a mistura EFRA+CAL, pós condicionamento de umidade, foi a que teve menor influência quanto à carga máxima de ruptura, ratificando o resultado do ensaio de DUI;
- A mistura EFRA+EP obteve um bom desempenho quanto a energia de fratura antes e depois do condicionamento de umidade, e pelo índice de flexibilidade e deslocamento crítico percebeu-se um ganho de ductilidade após as amostras passarem pelo condicionamento de umidade. É possível que esses resultados sejam reflexos da alta presença de óxido de ferro na composição do pó EP. A presença de óxido de ferro na mistura aumenta a capacidade adesiva entre o ligante e agregado garantindo uma ligação mais eficiente entre esses constituintes, e isso permite uma maior absorção de energia;

- O efeito do condicionamento de umidade das misturas, assim como o efeito combinado do condicionamento e do tipo de agregado utilizado na pesquisa tiveram influência significativa nos resultados de todos os parâmetros de fratura analisados. Já o tipo de agregado, isoladamente, não trouxe influência significativa aos resultados;
- O tipo de fíler adicionado nas misturas tiveram influência significativa em todos os parâmetros de fratura analisados, exceto na carga máxima de ruptura. As misturas EFRA, EFRA+CAL, EFRA+EP e EFRA+EFRA tiveram uma influência significativa do condicionamento de umidade ter ocorrido ou não em todos os parâmetros, exceto no índice de flexibilidade. Por fim, o efeito sinérgico do tipo de fíler e do condicionamento das misturas causaram uma forte influência nos resultados dos parâmetros de fratura, sem exceção.

De maneira geral, percebeu-se que a utilização do agregado EFRA nas misturas asfálticas sem adição de fíler melhorador de adesividade não afetou o desempenho das misturas em relação às misturas com 100% de agregado natural granítico existente. Apesar da baixa adesividade entre o ligante e o agregado EFRA, constatou-se que ao adicionar cal hidratada como fíler melhorador de adesividade, a mistura com EFRA torna-se apta para o uso na pavimentação asfáltica, atendendo a todos os critérios da norma DNIT 031/2006-ES. Verificou-se também que a utilização de pó EP como alternativa de fíler melhorador de adesividade se mostrou promissora, porém ainda carece de uma investigação mais profunda a fim de se conseguir o atendimento de todos os requisitos da norma.

5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Diante do avaliado nas conclusões, sugerem-se as seguintes pesquisas futuras:

- Avaliar a influência dos fíleres nas propriedades viscoelásticas de matrizes de agregados finos (MAFs), verificando os efeitos destas adições nas escalas menores de análise e correlacionando-as com os resultados desta pesquisa;
- Avaliar os efeitos dos fíleres nas características químicas e reológicas de diferentes ligantes asfálticos;

- Analisar a microestrutura dos fíleres a fim de verificar a influência de suas formas com as propriedades de fratura das misturas asfálticas;
- Verificar a influência da adesividade ligante-agregado na resistência ao trincamento por fadiga através de ensaios de fratura SCB dinâmico e ensaios de fadiga em corpos de prova cilíndricos;
- Verificar a influência da adesividade ligante-agregado na resistência à deformação permanente através da realização de ensaios de módulo de resiliência, de módulo dinâmico e de flow number;
- Analisar os impactos nos custos da pavimentação realizada com misturas asfálticas substituindo 25% de AN por agregado EFRA, e com menores substituições.

REFERÊNCIAS

- ABANDANSARI, H. F.; MODARRES, A. Investigating effects of using nanomaterial on moisture susceptibility of hot-mix asphalt using mechanical and thermodynamic methods. **Construction and Building Materials**, v. 131, p. 667–675, 2017.
- ABUAWAD, I. M. A.; AL-QADI, I. L.; TREPANIER, J. S. Mitigation of moisture damage in asphalt concrete: Testing techniques and additives/modifiers effectiveness. **Construction and Building Materials**, v. 84, p. 437–443, 2015.
- AGUIAR-MOYA, J. P.; BALDI-SEVILLA, A.; SALAZAR-DELGADO, J.; PACHECO-FALLAS, J. F.; LORIA-SALAZAR, L.; REYES-LIZCANO, F.; CELY-LEAL, N. Adhesive properties of asphalts and aggregates in tropical climates. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 19, n. 8, p. 738–747, 2018.
- AIREY, G. D.; COLLOP, A. C.; ZOOROB, S. E.; ELLIOTT, R. C. The influence of aggregate, filler and bitumen on asphalt mixture moisture damage. **Construction and Building Materials**, v. 22, n. 9, p. 2015–2024, set. 2008.
- AKBARNEJAD, S.; HOUBEN, L. J. M.; MOLENAAR, A. A. A. Application of aging methods to evaluate the long-term performance of road bases containing blast furnace slag materials. **Road Materials and Pavement Design**, v. 15, n. 3, p. 488–506, 2014.
- AL-QADI, I., OZER, H., LAMBROS, J., LIPPERT, D., EL KHATIB, A., SINGHVI, P., KHAN, T., RIVERA-PEREZ, J. J., DOLL, B. Testing Protocols to Ensure Mix Performance w/ High RAP and RAS. **Illinois Center for Transportation**, n. 1, p. 209, 2015.
- AL ROUSAN, T. M. **Characterization of aggregate shape properties using a computer automated system**. 2004. 229f. Tese de Doutorado em Engenharia Civil. Texas A&M University. Texas, 2004.
- ALMEIDA, J. D. A. C. DE; DALL'AGNOL, R.; OLIVEIRA, D. C. DE. Geologia, Petrografia E Geoquímica Do Granito Anorogênico Bannach, Terreno Granito-Greenstone De Rio Maria, Pará. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 36, n. 2, p. 282–295, 2006.
- ALVAREZ, A. E.; OVALLES, E.; CARO, S. Assessment of the effect of mineral filler on asphalt-aggregate interfaces based on thermodynamic properties. **Construction and Building Materials**, v. 28, n. 1, p. 599–606, 2012.
- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO TP 105-20: Standard method of test for Determining the Fracture Energy of Asphalt Mixture Using the Semicircular Bend Geometry (SCB)**. Washington, DC, p. 14. 2020.
- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO TP 124-16: Standard method of test for Determining the Fracture Potential of Asphalt Mixtures Using Semicircular Bend Geometry (SCB) at Intermediate Temperature**. Washington, DC, p. 12. 2016.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO T 283-14: Standard method of test for resistance of compacted hot mix asphalt (HMA) to moisture-induced damage**. Washington, DC, p. 9. 2018.

ANDERSON, D. A.; GOETZ, W. H. Mechanical behavior and reinforcement of mineral filler-asphalt mixtures. **Joint Highway Research Project**. n. 5, 1973.

ANEPAC – ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS ENTIDADES DE PRODUTORES DE AGREGADOS PARA CONSTRUÇÃO CIVIL. Panorama e perspectivas para o setor de agregados para construção. São Paulo, ANEPAC, 2015.

ARAGÃO, F. T. S.; HARTMANN, D. A.; KIM, Y. R.; DA MOTTA, L. M. G.; HAFT-JAVAHERIAN, M. Numerical-experimental approach to characterize fracture properties of asphalt mixtures at low temperatures. **Transportation Research Record**, v. 2447, p. 42–50, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 51: Agregado graúdo: Ensaio de abrasão “Los Angeles”**. Rio de Janeiro, p. 6. 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52: Agregado graúdo: Determinação da massa específica e massa específica aparente**. Rio de Janeiro, p. 6. 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53: Agregado graúdo: Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água**. Rio de Janeiro, p. 8. 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12052: Solo ou agregado miúdo: Determinação do equivalente de areia – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, p. 10. 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12583: Agregado graúdo: Determinação da adesividade ao ligante betuminoso**. Rio de Janeiro, p. 2. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248: Agregados: Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, p. 6. 2003.

AYATOLLAHI, M. R.; ALIHA, M. R. M.; HASSANI, M. M. Mixed mode brittle fracture in PMMA - An experimental study using SCB specimens. **Materials Science and Engineering A**, v. 417, n. 1–2, p. 348–356, 2006.

BAGAMPADDE, U.; ISACSSON, U.; KIGGUNDU, B. M. Influence of aggregate chemical and mineralogical composition on stripping in bituminous mixtures. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 6, n. 4, p. 229–239, 2005.

BARDINI, V. S. S.; KLINSKY, L. M. G.; FERNANDES, J. L. A importância do fíler para o bom desempenho de misturas asfálticas. TPC PESQUISA E TECNOLOGIA MINERVA. Departamento de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos, USP. **Minerva**, v. 7, n. 1, p. 71–78, 2009.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G. DA; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. Rio de Janeiro: ABEDA, 2008.

BRAHAM, A.; MUDFORD, C. Development of Fracture Resistance Curves for Asphalt Concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 25, n. 11, p. 1631–1637, 2013.

BRASIL. DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Diretrizes básicas para execução de misturas asfálticas mornas com o uso de aditivos surfactantes** – Rio de Janeiro, 2018a.

BRASIL. DNPM - DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. **Cadastro Nacional de Produtores de Brita** – Brasília, 2018b.

BRASIL. MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÃO E COMUNICAÇÕES, ONU MEIO AMBIENTE. **Modelagem setorial de opções de baixo carbono para o setor de ferro-gusa e aço** - Brasília, 2017.

BRASIL. DNPM – DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. **Anuário Mineral Brasileiro** – Brasília, 2010.

CALA, A.; CARO, S.; LLERAS, M.; ROJAS-AGRAMONTE, Y. Impact of the chemical composition of aggregates on the adhesion quality and durability of asphalt-aggregate systems. **Construction and Building Materials**, v. 216, p. 661–672, ago. 2019.

CARO, S.; MASAD, E.; BHASIN, A.; LITTLE, D. N. Moisture susceptibility of asphalt mixtures, Part 1: Mechanisms. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 9, n. 2, p. 81–98, 2008.

CHEN, Z.; XIE, J.; XIAO, Y.; CHEN, J.; WU, S. Characteristics of bonding behavior between basic oxygen furnace slag and asphalt binder. **Construction and Building Materials**, v. 64, p. 60–66, 2014.

CHEN, Z.; JIAO, Y.; WU, S.; TU, F. Moisture-induced damage resistance of asphalt mixture entirely composed of gneiss and steel slag. **Construction and Building Materials**, v. 177, p. 332–341, 2018.

CHONG, K. P.; KURUPPU, M. D. New specimen for fracture toughness determination for rock and other materials. **International Journal of Fracture**, v. 26, n. 2, p. 59–62, 1984.

CNT – CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Boletins Técnicos: Pesquisa CNT de Rodovias – 2019** – Brasília: CNT, 2020.

CNT – CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Pesquisa CNT de Rodovias 2018: Principais Dados** – Brasília: CNT, 2018.

COUTINHO, R. P. **Utilização da parte fina de misturas asfálticas para avaliação do dano por fadiga**. 2012. 109f. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Transportes. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes. Universidade Federal do Ceará (UFC). Fortaleza. CE, 2012.

CUI, S.; BLACKMAN, B. R. K.; KINLOCH, A. J.; TAYLOR, A. C. Durability of asphalt mixtures: Effect of aggregate type and adhesion promoters. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 54, p. 100–111, 2014.

DAS, B.; PRAKASH, S.; REDDY, P. S. R.; MISRA, V. N. An overview of utilization of slag and sludge from steel industries. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 50, n. 1, p. 40–57, 2007.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGENS. **DNER-ME 089: Agregados: Avaliação da durabilidade pelo emprego de solução de sulfato de sódio ou de magnésio**. Rio de Janeiro, p. 6. 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGENS. **DNER-EM 367: Material de enchimento para misturas betuminosas**. Rio de Janeiro, p. 3. 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGENS. **DNER-EM 260: Escória de alto-forno para pavimentos rodoviários**. Rio de Janeiro, p.4. 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 005/2003-TER: Defeitos nos Pavimentos Flexíveis e Semi-Rígidos - Terminologia**. Rio de Janeiro, p.12. 2003.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 031/2006-ES: Pavimentos Flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de serviço**. Rio de Janeiro, p.14. 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 136/2018-ME: Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, p.9. 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 178/2018-PRO: Pavimentação asfáltica – Preparação de corpos de prova para ensaios mecânicos usando o compactador giratório *Superpave* ou o Marshall – Procedimento**. Rio de Janeiro, p.19. 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 180/2018-ME: Pavimentação – Misturas asfálticas – Determinação do dano por umidade induzida – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, p.9. 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 432/2020-ME: Agregados – Determinação das propriedades de forma por meio do processamento Digital de Imagens (PDI) – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, p.14. 2020.

DIÓGENES, L. M. **Avaliação das relações entre propriedades de agregados minerais com base nas características do processo de britagem e da rocha de origem**. 2018. 146f. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Transportes. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes. Universidade Federal do Ceará (UFC). Fortaleza. CE, 2018.

DONG, Z.; LIU, Z.; WANG, P.; GONG, X. Nanostructure characterization of asphalt-

aggregate interface through molecular dynamics simulation and atomic force microscopy. **Fuel**, v. 189, p. 155–163, 2017.

FONSECA, J. F.; TEIXEIRA, J. E. S. L.; CASTELO BRANCO, V. T. F.; KIM, Y.R. Evaluation of Effects of Filler By-Products on Fine Aggregate Matrix Viscoelasticity and Fatigue-Fracture Characteristics. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 31, n. 10, p. 04019240, 2019.

FONTES, L.; TRICHÊS, G.; PEREIRA, P.; PAIS, J. IV Simpósio Internacional de Avaliação de Pavimentos e Projetos de Reforço. **Planta**, n. 21, 2009.

GODOI, L. C. **Aplicação do ensaio de flexão em amostra semicircular para avaliação de trincamento de misturas asfálticas**. 2017. 143f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Porto Alegre. RS, 2017.

GODOI, L. C.; BRITO, L. A. T.; MENSCH, N. G.; CERATTI, J. A. P. Utilização do ensaio de flexão sobre amostra semicircular para avaliação da propagação do trincamento em misturas com diferentes ligantes. **Transportes**, v. 27, n. 4, p. 159–171, 2019.

GORKEM, C.; SENGOZ, B. Predicting stripping and moisture induced damage of asphalt concrete prepared with polymer modified bitumen and hydrated lime. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 6, p. 2227–2236, 2009.

GUO, M.; BHASIN, A.; TAN, Y. Effect of mineral fillers adsorption on rheological and chemical properties of asphalt binder. **Construction and Building Materials**, v. 141, p. 152–159, 2017.

HAMEDI, G. H.; NEJAD, F. M.; OVEISI, K. Investigating the effects of using nanomaterials on moisture damage of HMA. **Road Materials and Pavement Design**, v. 16, n. 3, p. 536–552, 2015.

HAMZAH, M. O.; KAKAR, M. R.; HAININ, M. R. An overview of moisture damage in asphalt mixtures. **Jurnal Teknologi**, v. 73, n. 4, p. 125–131, 2015.

HARNISH, I. C. **Liquid Anti-Strip Technology & Best Practices**. Technical Manager Asphalt Additives. ArrMaz Custom Chemicals, Overland Park, USA, 2010.

HUANG, B.; SHU, X.; DONG, Q.; SHEN, J. Laboratory evaluation of moisture susceptibility of hot-mix asphalt containing cementitious fillers. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 22, n. 7, p. 667–673, 2010.

IABr – INSTITUTO AÇO BRASIL. **Relatório de sustentabilidade 2018** – Rio de Janeiro, 2019.

IBIAPINA, D. S. **Proposição de Um Sistema de Classificação das Propriedades de Forma de Agregados Caracterizados com o Uso do Processamento Digital de Imagens para a Seleção de Materiais Brasileiros**. 2018. 176f. Tese de Doutorado em Engenharia de Transportes. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes. Universidade Federal do Ceará (UFC). Fortaleza. CE, 2018.

INCAPER - INSTITUTO CAPIXABA DE PESQUISA, ASSISTÊNCIA TÉCNICA E EXTENSÃO RURAL. **Dados comparativos com a média da série histórica da estação meteorológica localizada no município de Vitória/ES** – Vitória, 2019. Disponível em: <<https://meteorologia.incaper.es.gov.br/graficos-da-serie-historica-vitoria>>. Acesso em: 19 mar. 2021.

IZOTON, S. **Avaliação dos efeitos da expansão de agregados contendo escória de aciaria LD no desempenho mecânico de misturas asfálticas envelhecidas**. 2020. 115f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). Vitória. ES, 2020.

IZOTON, S. TEIXEIRA, J. E. S. L.; PIRES, P. J. M.; SCHUMACHER, A. G. Evaluation of ld slag expansion effects on the mechanical behavior of asphalt mixtures subject to aging and moisture damage. **Transportes**, 2021. (in press)

JAVALI, S.; CHANDRASHEKAR, A. R.; NAGANNA, S. R.; MANU, D. S.; HIREMATH, P.; PREETHI, H. G.; VINOD KUMAR, N. Eco-concrete for sustainability: utilizing aluminium dross and iron slag as partial replacement materials. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 19, n. 9, p. 2291–2304, 2017.

JOAQUIM, D. O. **Proposta de desenvolvimento de peças pré-moldadas de concreto asfáltico e sua avaliação de desempenho quanto às tensões cisalhantes**. 2019. 115f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). Vitória. ES, 2019.

KAKAR, M. R.; HAMZAH, M. O.; VALENTIN, J. A review on moisture damages of hot and warm mix asphalt and related investigations. **Journal of Cleaner Production**, v. 99, p. 39–58, 2015.

KIM, Y. R.; LUTIF, J. S.; BHASIN, A.; LITTLE, D. N. Evaluation of moisture damage mechanisms and effects of hydrated lime in asphalt mixtures through measurements of mixture component properties and performance testing. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 20, n. 10, p. 659–667, 2008.

KIM, Y. R.; PINTO, I.; PARK, S. W. Experimental evaluation of anti-stripping additives in bituminous mixtures through multiple scale laboratory test results. **Construction and Building Materials**, v. 29, p. 386–393, 2012.

KUDO, A. M. Igneous rock. In: Encyclopædia Britannica. Disponível em: <<https://www.britannica.com/science/igneous-rock>>. Acesso em: 19 mar. 2021.

LEANDRO, R. P. **Avaliação do comportamento mecânico de corpos de prova de misturas asfálticas a quente resultantes de diferentes métodos de compactação**. 2016. 289f. Tese de Doutorado em Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (Poli-USP). São Paulo. SP, 2016.

LI, X. J.; MARASTEANU, M. O. Using Semi Circular Bending Test to Evaluate Low Temperature Fracture Resistance for Asphalt Concrete. **Experimental Mechanics**, v. 50, n. 7, p. 867–876, 2010.

LING, C.; HANZ, A.; BAHIA, H. Measuring moisture susceptibility of Cold Mix Asphalt with a modified boiling test based on digital imaging. **Construction and Building Materials**, v. 105, p. 391–399, 2016.

LITTLE, D. N.; PETERSEN, J. C. Unique Effects of Hydrated Lime Filler on the Performance-Related Properties of Asphalt Cements: Physical and Chemical Interactions Revisited. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 17, n. 2, p. 207–218, 2005.

LU, D. X.; SALEH, M.; NGUYEN, N. H. T. Evaluation of Fracture and Fatigue Cracking Characterization Ability of Nonstandardized Semicircular-Bending Test for Asphalt Concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 32, n. 8, p. 04020215, 2020.

LUCAS JÚNIOR, J. L. O. **Influência da Adesividade Agregado-ligante no Trincamento por Fadiga de Misturas Asfálticas**. 2018. 134f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes. Universidade Federal do Ceará (UFC). Fortaleza. CE, 2018.

LUCAS JÚNIOR, J. L. O.; BABADOPULOS, L. F. A. L.; SOARES, J. B. Moisture-induced damage resistance, stiffness and fatigue life of asphalt mixtures with different aggregate-binder adhesion properties. **Construction and Building Materials**, v. 216, p. 166–175, 2019.

LUTIF, J. E. S. **Computational micromechanics modeling of damage dependent bituminous composites based on two-way coupled multiscale approach**. 2011. 156 f. Tese de Doutorado em Engenharia Civil – The Graduate College at the University of Nebraska, University of Nebraska, Lincoln, 2011.

MANRIQUE-SANCHEZ, L.; CARO, S.; KIM, Y. R. Coupled effects of ageing and moisture on the fracture properties of Permeable Friction Courses (PFC). **International Journal of Pavement Engineering**, v. 0, n. 0, p. 1–13, 2020.

MARTINHO, F. C. G.; PICADO-SANTOS, L. G.; CAPITÃO, S. D. Influence of recycled concrete and steel slag aggregates on warm-mix asphalt properties. **Construction and Building Materials**, v. 185, p. 684–696, 2018.

MASAD, E.; ARAMBULA, E.; KETCHAM, R. A.; ABBAS, A. R.; MARTIN, A. E. Nondestructive measurements of moisture. **Journal of the association of asphalt paving technologists**, v. 46, p. 1–33, 2007.

MEHRARA, A.; KHODAIL, A. Moisture damage evaluation using energy based responses. **Journal of Civil Engineering and Management**, v. 23, n. 1, p. 47–58, 2017.

MINHAJUDDIN, M.; SAHA, G.; BILIGIRI, K. P. Crack Propagation Parametric Assessment of Modified Asphalt Mixtures Using Linear Elastic Fracture Mechanics Approach. **Journal of Testing and Evaluation**, v. 44, n. 1, p. 20140510, 2016.

MOGHADAS NEJAD, F.; HAMED, G. H.; AZARHOOSH, A. R. Use of surface free energy method to evaluate effect of hydrate lime on moisture damage in hot-mix asphalt. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 25, n. 8, p. 1119–1126, 2013.

MOURA, B. L. R. **Avaliação da adesividade ligante-escória sob aspectos físicos, químicos e termodinâmicos e correlação com desempenho mecânico de misturas asfálticas contendo diferentes fileres melhoradores de adesividade.** 2020. 152f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). Vitória. ES, 2020.

MOURA, B. L. R.; TEIXEIRA, J. E. S. L.; PIRES, P. J. M.; SIMÃO, R. A.; KHEDMATI, M.; KIM, Y.R. **Avaliação da adesividade ligante-escória de alto forno resfriada ao ar (EFRA) e de aciaria (LD) usando técnicas de análise de superfícies.** 2019. In: ANPET, Balneário Camburiú. SC, 2019.

MOURA, B. L. R. DE; TEIXEIRA, J. E. S. L.; SIMÃO, R. A.; KHEDMATI, M.; KIM, Y. R.; PIRES, P. J. M. Adhesion between steel slag aggregates and bituminous binder based on surface characteristics and mixture moisture resistance. **Construction and Building Materials**, v. 264, 2020.

NEPOMUCENO, D. V. **Avaliação em campo de estrutura de pavimento incorporando solo estabilizado com coproduto de aciaria KR sujeita à carregamento com simulador HVS e comparação com previsões de desempenho segundo o novo método brasileiro de dimensionamento MEDINA.** 2019. 188f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). Vitória. ES, 2019.

OLIVEIRA, I. C. S. **Utilização do rejeito de minério de ferro em substituição ao agregado mineral fino em misturas asfálticas.** 2020. 111f. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Transportes. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo (EESC/USP). São Carlos. SP, 2020.

ONOFRE, F. C.; BESSA, I. S.; CASTELO BRANCO, V. T. F.; SOARES, J. B. Correlação entre variáveis de densificação do compactador giratório e resistência à deformação permanente de misturas asfálticas convencionais e com resíduos. **Transportes**, v. 19, p. 13–22, 2011.

PACKHAM, D. E. Surface energy, surface topography and adhesion. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 23, n. 6, p. 437–448, 2003.

PHAN, C. V.; DI BENEDETTO, H.; SAUZÉAT, C.; LESUEUR, D.; POUGET, S.; OLARD, F.; DUPRIET, S. Complex modulus and fatigue resistance of bituminous mixtures containing hydrated lime. **Construction and Building Materials**, v. 139, p. 24–33, 2017.

PINTO, S.; PINTO, I. E. **Pavimentação Asfáltica: Conceitos Fundamentais sobre Materiais e Revestimentos Asfálticos.** 1ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2019.

PORTO, T. R.; LUCENA, A. E. DE F. L.; PORTO, T. M. R.; SILVA, R. L. DA; ZIEGLER, C. R. **Avaliação Das Propriedades Mecânicas De Misturas Asfálticas Com Adição De Óxido De Ferro.** 2018. In: ANPET, Gramado. RS, 2018.

PRADO, T. G. DO; NASCIMENTO, M. DOS S. DO; GENARO, C. F. Análise

comparativa de recobrimento de agregado granítico com diferentes aditivos orgânicos melhoradores de adesividade. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, n. April, 2018.

RIVERA-PÉREZ, J.; OZER, O.; LAMBROS, J.; AL-QADI, I. L. et al. Illinois Flexibility Index Test: Effect of Specimen Geometry and Test Configuration on the Asphalt Concrete Damage Zone. **Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements**, v. 147, n. 1, p. 04020085, 2021.

RODRIGUES, J. A.; TEIXEIRA, J. E. S. L.; KIM, Y. R.; LITTLE, D. N.; SOUZA, F. V. Crack modeling of bituminous materials using extrinsic nonlinear viscoelastic cohesive zone (NVCZ) model. **Construction and Building Materials**, v. 204, p. 520–529, 2019.

RONDÓN-QUINTANA, H. A.; RUGE-CÁRDENAS, J. C.; PATINÑO-SÁNCHEZ, D. F.; VACCA-GAMEZ, H. A.; REYES-LIZCANO, F. A.; DE FARIAS, M. M. Blast furnace slag as a substitute for the fine fraction of aggregates in an asphalt mixture. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 30, n. 10, p. 1–11, 2018.

RONDÓN-QUINTANA, H. A.; RUGE-CÁRDENAS, J. C.; DE FARIAS, M. M. Behavior of hot-mix asphalt containing blast furnace slag as aggregate: Evaluation by mass and volume substitution. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 31, n. 2, 2019.

SAHA, G.; BILIGIRI, K. P. Fracture damage evaluation of asphalt mixtures using Semi-Circular Bending test based on fracture energy approach. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 142, p. 154–169, 2015.

SAHA, G.; BILIGIRI, K. P. Fracture properties of asphalt mixtures using semi-circular bending test: A state-of-the-art review and future research. **Construction and Building Materials**, v. 105, p. 103–112, 2016.

SAKANLOU, F.; SHIRMOHAMMADI, H.; HAMED, G. H. Investigating the effect of filler types on thermodynamic parameters and their relationship with moisture sensitivity of asphalt mixes. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 51, n. 2, p. 1–16, 2018.

SCHUMACHER, A. G. **Avaliação dos efeitos da expansão de agregados siderúrgicos nas características do material e no desempenho de misturas asfálticas**. 2018. 94f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). Vitória. ES, 2018.

SILVA, L. C.; COSTA, D.F.; FIALHO, P. F. Produção de concreto sem função estrutural através da incorporação de escória dry-pit e resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 10, n. 3, p.156-170, 2018.

SILVA, M. G; BATTAGIN, A. F.; GOMES, V. Cimentos Portland com adições minerais. In: ISAIA, G. C.. **Materiais de Construção Civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. 3ª edição. São Paulo: Ibracon, 2017. Cap. 25, p. 791-823.

SOUZA, P.; KASSEM, E.; MASAD, E.; LITTLE D. New design method of fine aggregates mixtures and automated method for analysis of dynamic mechanical characterization data. **Construction and Building Materials**, v. 41, p. 216–223, 2013.

USER GUIDELINES FOR WASTE AND BYPRODUCT MATERIALS IN PAVEMENT CONSTRUCTION. **Federal Highway Administration, US Department of Transportation**, 2021. Disponível em: <<https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/97148/bfs1.cfm>>. Acesso em: 19 mar. 2021.

VARGAS, G. A. B.; OLIVEIRA, A. D.; ARAGÃO, F. T. S. Influência do modo de aplicação de carga nas propriedades de fratura de uma mistura asfáltica de agregados finos. **Transportes**, v. 26, n. 3, p. 39–50, 2018.

VIEIRA, C. M. F.; SOARES, T. M.; MONTEIRO, S. N. Utilização de Granito em Massa Cerâmica para Telhas. **Cerâmica Industrial**, v. 9, n. 1, p. 28–32, 2004.

WANG, G. C. **Slag use in asphalt paving**. In: *The Utilization of Slag in Civil Infrastructure Construction*, 2016.

WANG, H., AL-QADI, I. L., FAHEEM, A. F., BAHIA, H. U., YANG, S. H., & REINKE, G. H. Effect of mineral filler characteristics on asphalt mastic and mixture rutting potential. **Transportation Research Record**, n. 2208, p. 33–39, 2011.

XAVIER, M. D. F.; FERREIRA, W. L. G.; CASTELO BRANCO, V. T. F. Avaliação do uso de cinzas de carvão mineral como melhorador de adesividade em misturas asfálticas Evaluation of coal ash use as an adhesion improver in asphalt mixtures. **Revista Materia**, v. 25, n. 1, 2020.

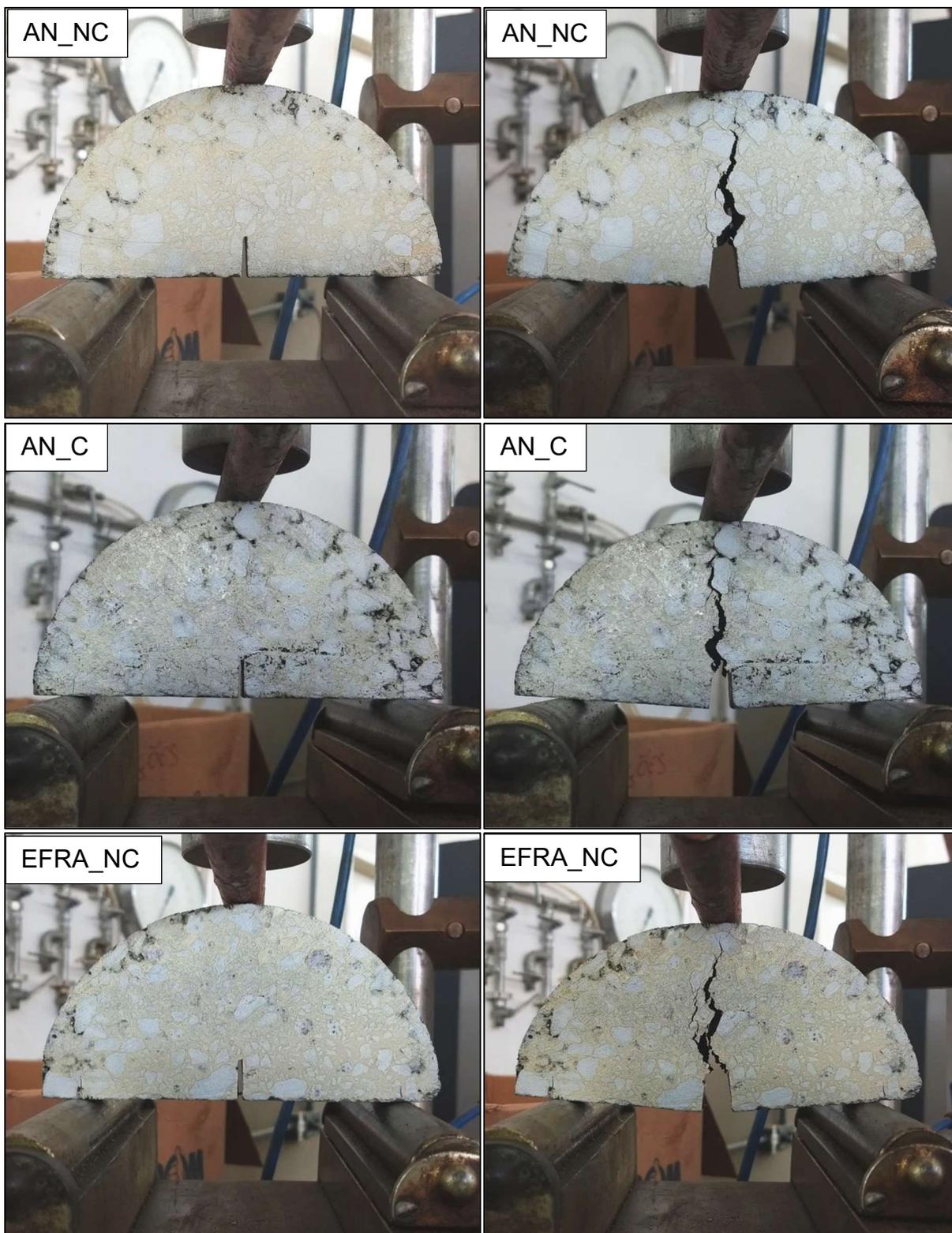
ZAIDI, S. B. A.; AIREY, G. D.; GRENFELL, J.; ALFAQAWI, R. M.; AHMED, I.; AHMAD, N.; HAYNES, M. Moisture susceptibility of hydrated lime modified mastics using adhesion test methods and surface free energy techniques. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 0, n. 0, p. 1–13, 2019.

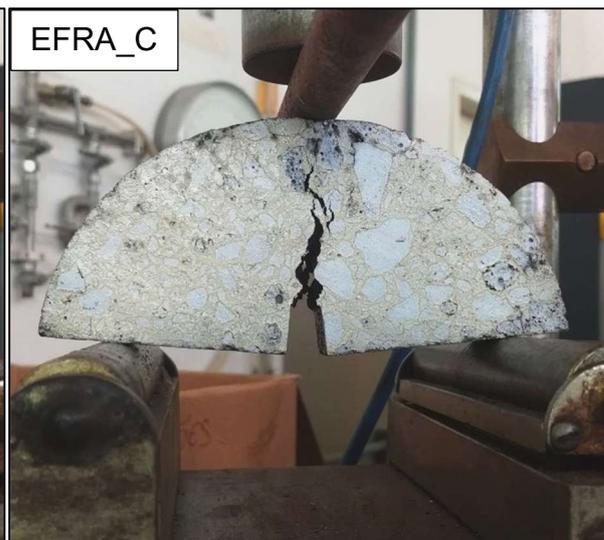
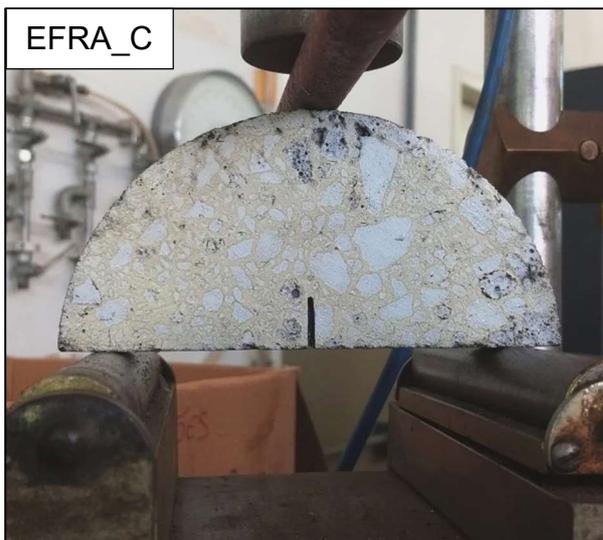
ZHANG, J.; APEAGYEI, A. K.; AIREY, G. D.; GRENFELL, J. R. A. Influence of aggregate mineralogical composition on water resistance of aggregate-bitumen adhesion. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 62, p. 45–54, 2015.

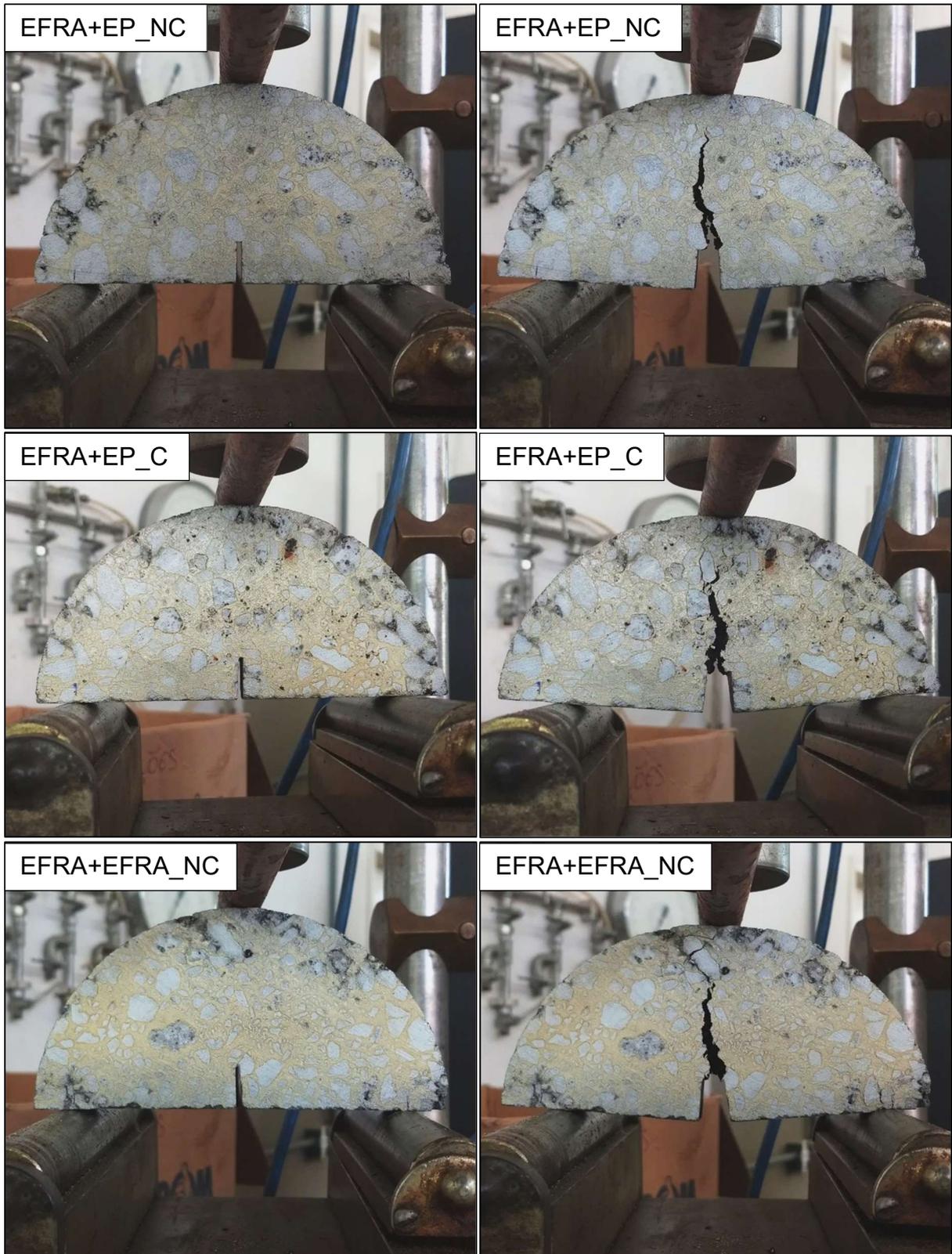
ZHANG, J.; LI, X.; LIU, G.; PEI, J. Effects of material characteristics on asphalt and filler interaction ability. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 20, n. 8, p. 928–937, 2017.

ZHANG, J.; FAN, Z.; HU, D.; HU, Z.; PEI, J.; KONG, W. Evaluation of asphalt–aggregate interaction based on the rheological properties. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 19, n. 7, p. 586–592, 2018.

APÊNDICE A – Imagens dos corpos-de-prova antes e depois do ensaio de fratura SCB









APÊNDICE B – Tabelas de resultados dos parâmetros de fratura por
corpo-de-prova

Tabela 24 - Resultados do P_{máx} por corpo-de-prova

MISTURA	Não condicionado - NC				Condicionado - C				Relação C/NC
	CP	Vv (%)	P _{máx} (kN)	P _{máx} média (kN)	CP	Vv (%)	P _{máx} (kN)	P _{máx} média (kN)	
AN	6	3	3,53	3,27	1	3	2,28	2,46	75%
	7		3,22		2		2,36		
	9		3,35		11		2,75		
	10		2,98		-		-		
EFRA	1	3,3	3,24	3,12	3	3,1	2,47	2,66	85%
	2		3,16		4		2,78		
	7		3,17		9		2,53		
	11		2,89		10		2,86		
EFRA+CAL	1	3,5	2,79	2,87	3	3,3	2,49	2,86	99%
	7		2,95		4		2,96		
	10		2,77		5		2,8		
	12		2,97		9		3,17		
EFRA+EP	2	4	3,3	3,12	1	3,6	2,73	2,52	81%
	3		3,21		6		2,39		
	5		3,07		9		2,37		
	8		2,92		11		2,59		
EFRA+EFRA	2	3,9	3,17	2,98	1	3,8	2,97	2,69	90%
	4		3,13		3		2,79		
	6		2,58		5		2,71		
	12		3,02		7		2,29		

Tabela 25 - Resultados do Gf por corpo-de-prova

MISTURA	Não condicionado - NC				Condicionado - C				Relação C/NC
	CP	Vv (%)	Gf (kJ/m ²)	Gf média (kJ/m ²)	CP	Vv (%)	Gf (kJ/m ²)	Gf média (kJ/m ²)	
AN	6	3,0	6,30566	5,85	1	3,0	2,73770	3,81	65%
	7		5,19926		4,24507				
	9		6,94055		4,45841				
	10		4,94123		-				
EFRA	1	3,3	5,14352	5,84	3	3,1	4,70975	4,41	75%
	2		5,92022		3,37454				
	7		5,97927		4,28692				
	11		6,32432		5,26440				
EFRA+CAL	1	3,5	4,24077	4	3	3,3	2,81355	3,2	80%
	7		3,88295		3,20192				
	10		3,59443		3,42014				
	12		4,27599		3,37677				
EFRA+EP	2	4,0	5,39685	5,62	1	3,6	5,93370	5,59	99%
	3		5,64683		4,29400				
	5		5,83756		5,18034				
	8		5,58562		6,94295				
EFRA+EFRA	2	3,9	5,01075	6,12	1	3,8	5,12537	4,16	68%
	4		5,76493		3,58497				
	6		6,49329		4,77202				
	12		7,22761		3,14841				

Tabela 26 - Resultados do IF por corpo-de-prova

MISTURA	Não condicionado - NC				Condicionado - C				Relação C/NC
	CP	Vv (%)	IF (%)	IF média (%)	CP	Vv (%)	IF (%)	IF média (%)	
AN	6	3,0	30,91	28,39	1	3,0	10,69	14,77	52%
	7		19,11		17,99				
	9		41,07		15,64				
	10		22,46		-				
EFRA	1	3,3	22,36	25,96	3	3,1	26,46	23,51	91%
	2		24,57		10,85				
	7		25,44		27,48				
	11		31,46		29,25				
EFRA+CAL	1	3,5	17,45	13,73	3	3,3	12,39	11,8	86%
	7		9,33		11,44				
	10		18,06		11,88				
	12		10,08		11,49				
EFRA+EP	2	4,0	27,53	27,72	1	3,6	31,07	36,52	132%
	3		26,64		28,63				
	5		32,61		37,81				
	8		24,08		48,55				
EFRA+EFRA	2	3,9	19,65	22,39	1	3,8	12,38	16,61	74%
	4		21,84		14,4				
	6		20,81		26,08				
	12		27,27		13,57				

Tabela 27 - Resultados do δ crítico por corpo-de-prova

MISTURA	Não condicionado - NC				Condicionado - C				Relação C/NC
	CP	Vv (%)	δ crítico (mm)	δ crítico média (mm)	CP	Vv (%)	δ crítico (mm)	δ crítico média (mm)	
AN	6		4,32		1		2,49		77%
	7	3,0	3,67	3,96	2	3,0	3,55	3,06	
	9		4,49		11		3,15		
	10		3,37		-		-		
EFRA	1		2,94		3		3,89		95%
	2	3,3	4,18	3,81	4	3,1	2,87	3,63	
	7		3,71		9		3,61		
	11		4,42		10		4,16		
EFRA+CAL	1		3,01		3		2,53		86%
	7	3,5	2,87	2,94	4	3,3	2,35	2,52	
	10		2,87		5		2,59		
	12		3		9		2,62		
EFRA+EP	2		3,9		1		4,41		113%
	3	4,0	3,86	3,93	6	3,6	3,56	4,44	
	5		4,12		9		4,69		
	8		3,83		11		5,08		
EFRA+EFRA	2		3,53		1		3,13		77%
	4	3,9	3,8	3,93	3	3,8	2,84	3,02	
	6		3,56		5		3,21		
	12		4,81		7		2,88		