

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

MIGUEL FAÉ LINHARES

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DAS PROPRIEDADES DOS AGREGADOS
SOBRE O COMPORTAMENTO À FADIGA E AUTORREGENERAÇÃO
DE MATRIZES DE AGREGADOS FINOS**

VITÓRIA
2022

MIGUEL FAÉ LINHARES

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DAS PROPRIEDADES DOS AGREGADOS
SOBRE O COMPORTAMENTO À FADIGA E AUTORREGENERAÇÃO
DE MATRIZES DE AGREGADOS FINOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito 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

Coorientadora: Prof.^a Ph.D. Verônica
Teixeira Franco Castelo Branco

VITÓRIA

2022

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

L735e Linhares, Miguel Faé, 1995-
Estudo da influência das propriedades dos agregados sobre
o comportamento à fadiga e autorregeneração de matrizes de
agregados finos / Miguel Faé Linhares. - 2022.
130 f. : il.

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

1. Agregados (Materiais de construção). 2. Asfalto. I. Teixeira,
Jamilla Emi Sudo Lutif. II. Castelo Branco, Verônica Teixeira
Franco. III. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro
Tecnológico. IV. Título.

CDU: 624

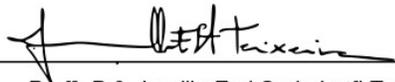
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DAS PROPRIEDADES DOS AGREGADOS SOBRE O
COMPORTAMENTO À FADIGA E AUTORREGENERAÇÃO DE MATRIZES DE
AGREGADOS FINOS

Miguel Faé Linhares

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Civil do 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 Construção Civil.

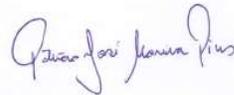
Aprovada no dia **29 de novembro de 2022** por:



Prof.ª. Dr.ª. Jamilla Emi Sudo Lutfi Teixeira
Doutora em Engenharia Civil
Orientadora - UFES



Prof.ª. Dr.ª. Verônica Teixeira Franco Castelo Branco
Doutora em Engenharia Civil
Coorientadora - UFC



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



Prof. Dr. Adalberto Leandro Faxina
Doutor em Engenharia de Transportes
Examinador Externo - EESC-USP

Vitória – ES, novembro de 2022

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus pela saúde que tive no decorrer de momentos tão sombrios pelo qual passamos durante esses últimos anos. Foram as oportunidades que o Senhor colocou em meu caminho que me mantiveram dispostos, com corpo e mente trabalhando, levarei todo aprendizado comigo até que o corpo não se aquece e a mente falhe.

Obrigado ao amor da minha vida, Taynara, que esteve ao meu lado todos os dias durante essa jornada de altos e baixos, e em nenhum momento deixou de me motivar, você foi e é meu alicerce. Eu te amo.

Aos meus pais, Jeane e Jocemilton e minha irmã Julia, que estiveram ao meu lado e deram todo suporte para que eu pudesse seguir com meus objetivos. Vocês me dão ânimo para seguir em frente.

À minha orientadora e eterna professora, Jamilla. Obrigado por acreditar em mim, até mesmo quando eu estava descrente, e me guiar quando parecia não haver mais soluções. Admiro o amor que você coloca naquilo que faz, você é uma inspiração. Não falo apenas por mim, mas, por muitos alunos que conheci na UFES e que possuem o mesmo sentimento.

À professora Verônica Castelo Branco, minha coorientadora, que tem contribuído em meus estudos, e me recebeu de braços abertos na UFC em um momento de dificuldade do meu trabalho. Assim como ao Professor Adalberto Faxina que também me recebeu na USP. Sem a ajuda dos dois professores eu não conseguiria prosseguir com o andamento deste trabalho.

À futura mestre Marcelly, que me acompanhou do início ao fim desta jornada. A professora Jamilla não conseguiria escolher pessoa mais dedicada e organizada para ser minha parceira de pesquisa.

Ao mestre Rodolpho que me ajudou no início desta caminhada.

À Carolina, Sidneidy e ao Delduquer, os três me auxiliaram nos ensaios no laboratório de geotecnia e pavimentação da UFES, e fizeram companhia durante os exaustivos dias de compactação.

Aos professores do Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da UFES, que fizeram parte da minha formação como mestre. Em especial ao professor Patrício, contribuiu com o desenvolvimento deste trabalho de forma muito solícita.

À aluna de doutorado da UFC Raphaelle que me ajudou nos ensaios de caracterização dos agregados.

Ao Wesley, técnico do laboratório que me apresentou e me auxiliou no laboratório de asfalto da UFC.

À Andrise, que me ensinou muito durante visita ao laboratório da USP.

Aos pesquisadores do grupo SAM, pelas ricas discussões que foram promovidas durante nossas reuniões.

Também agradeço todos os laboratórios que contribuíram para os ensaios apresentados nessa pesquisa: laboratórios de Nanometria Fotônica do Centro Tecnológico da UFES; Laboratório de Sedimentologia da UFES; Laboratório de materiais de construção da UFES; Laboratório Multiusuário de Microscopia de Alta Resolução da UFG; Laboratório de Microscopia Eletrônica do Departamento de Geologia da UFC;

Aos professores Ana Christina Wigneron Gimenes e Luiz Machado Filho, do departamento de Geografia da UFES, pelo auxílio nas análises mineralógicas

À quem forneceu os materiais utilizados nesta pesquisa: Vila Betume; pedreira Brasitália; pedreira Basalto Campo Redondo; e a professora Lilian Rezende da UFG.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Espírito Santo - FAPES pelo financiamento do projeto de pesquisa.

Enfim, gostaria de agradecer a todos que contribuíram para a conclusão desta etapa.

Muito Obrigado.

RESUMO

Trincamento por fadiga é um dos tipos mais comuns de desgaste em pavimentos asfálticos. As características e interações de cada constituinte do concreto asfáltico são relevantes para identificar sua resistência ao dano por fadiga. Além disso, na seleção de materiais, é essencial considerar não apenas a capacidade do material de resistir à fadiga, mas também sua característica de autorregeneração, que pode prolongar a vida útil do pavimento de concreto asfáltico. A maioria dos estudos sobre autoregeneração de materiais asfálticos é realizada na escala de ligantes. No entanto, esta característica pode ser dependente de interações ligante-agregado.. Assim, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a resistência ao trincamento por fadiga e capacidade de autorregeneração de quatro Matrizes de Agregados Finos (MAFs). O mesmo ligante foi utilizado em todas as MAFs, e cada mistura utilizou um agregado natural diferente, dentre eles, dois graníticos, um basáltico e outro micaxístico. A metodologia consiste em: (i) dosagens de MAFs com uso de diferentes agregados; (ii) verificação das variáveis existentes entre as MAFs e seus materiais constituintes; (iii) verificação da influência dos agregados na rigidez e elasticidade de MAFs produzidas com diferentes agregados, através da determinação experimental das propriedades viscoelásticas das mesmas; (iv) verificação da influência do agregado sobre a característica de autorregeneração das MAFs, através da determinação experimental da integridade recuperada, por meio de ensaios reológicos de varredura de tempo com inserção de períodos de repouso. Dentre a caracterização dos agregados foram identificadas diferenças na química e mineralogia de todos os agregados, além do agregado basáltico apresentar maior teor de finos devido à sua britagem. Essas variáveis foram confrontadas com os resultados de autorregeneração e fadiga, concluindo que há uma relação complexa das propriedades dos agregados nestas características. A MAF composta por agregado micaxístico apresentou a maior rigidez e sua vida de fadiga caiu mais expressivamente com o aumento da tensão aplicada. Quanto a autorregeneração, acredita-se que a química de cada agregado pode ter influenciado na relação entre trincas adesivas e coesivas, além de permitir ou não, uma maior movimentação do ligante.

PALAVRAS-CHAVE: agregados; misturas asfálticas; MAF; fadiga; autorregeneração.

ABSTRACT

Fatigue cracking is one of the most common types of distress in asphalt pavements. Each asphalt concrete constituent's characteristics and interactions are relevant to identifying its resistance to fatigue cracking. Also, for the selection of materials, it is essential to consider not only the capacity of the material to resist fatigue but also its ability to heal. Materials that exhibit self-healing capacity can prolong the overall asphalt concrete fatigue life. Most studies on the self-healing of bituminous materials are performed in the binder scale. However, this characteristic can be dependent on binder-aggregate interactions. Thus, the present work aims to evaluate the fatigue cracking strength and self-healing capacity of four Fine Aggregate Matrices (FAMs). The same binder was used in all FAMs, and each mixture used a different natural aggregate, among them, two granitic, one basaltic and the other micaxistic. The methodology consists of: (i) dosages of FAMs using different natural aggregates; (ii) verification of the variables existing between the FAMs and their constituent materials; (iii) verification of the influence of aggregates on the stiffness and elasticity of FAMs produced with different aggregates, through the experimental determination of their viscoelastic properties; (iv) verification of the influence of the aggregate on the self-healing characteristic of the FAMs, by the experimental determination of the recovered integrity, using time-scan rheological tests with insertion of rest periods. Among the characterization of the aggregates, differences in the chemistry and mineralogy of all the aggregates were identified, in addition to the basaltic aggregate presenting a higher content of fines due to its crushing process. These variables were confronted with the results of self-healing and fatigue, concluding that there is a complex relationship of the properties of the aggregates in these characteristics. The FAM composed of micaxistic aggregate presented the highest rigidity, and its fatigue life drops more significantly with the increase of applied stress. As for self-regeneration, it is believed that the chemistry of each aggregate may have influenced the relationship between adhesive and cohesive cracks, impacting on binder movement.

KEYWORDS: aggregates; asphalt mixtures; MAF; fatigue; self-healing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diferentes escalas da mistura asfáltica. (a) MAC; (b) MAF; (c) mastique.	2
Figura 2 - Representação das diferentes escalas	6
Figura 3 - Propriedades reológicas: Ângulo de fase(a); Módulo complexo (b).....	7
Figura 4 - Tipos de rochas encontradas no território brasileiro	9
Figura 5 – Comportamento do agregado ácido em contato com a água e o ligante	10
Figura 6 - Etapas da autorregeneração de fissuras	11
Figura 7 - Procedimento para realização de teste de autorregeneração utilizando BBS teste	14
Figura 8 - Resultados de autorregeneração obtidos por Kazemi <i>et al.</i> (2021)	14
Figura 9 - Rigidez à flexão <i>versus</i> número de ciclos de carregamento com e sem período de repouso	15
Figura 10 - Cálculo da porcentagem de autorregeneração	19
Figura 11 - Curvas C vs S típicas de ensaios sem e com diferentes períodos de repouso	20
Figura 12 - Peso molecular de diferentes ligantes, tipos e tempos de envelhecimento	26
Figura 13 - Resultados de fracionamento SARA.....	26
Figura 14 – Taxa de regeneração (<i>HR</i>) em diferentes condições de envelhecimento	27
Figura 15 - Relações entre a taxa de regeneração (<i>HR</i>) e as frações de: (a) saturados, (b) aromáticos, (c) resinas e (d) asfaltenos.	28
Figura 16 - Efeito da granulometria do agregado e da duração do tempo de repouso à 60°C no prolongamento da vida de fadiga de misturas asfálticas.....	29
Figura 17 - Autorregeneração de diferentes misturas asfálticas contendo diferentes volumes de vazios, para diferentes temperaturas.....	30
Figura 18 - Processo de autorregeneração do ligante asfáltico com adição de microcápsulas	31
Figura 19 - Porcentagem de autorregeneração de acordo com o nível de dano e período de repouso para (a) 10°C e (b) 20°C	32

Figura 20 - Autorregeneração quando aplicados diferentes períodos de repouso para diferentes níveis de dano	33
Figura 21 - Evolução do módulo complexo (G^*) durante teste de varredura de tempo	34
Figura 22 - Variação da integridade de um ligante asfáltico em relação ao número de ciclos, com diferentes períodos de repouso aplicados.....	35
Figura 23 - Autorregeneração de ligantes em função do período de repouso e níveis de dano	35
Figura 24 - Imagem de tomografia computadorizada de regeneração de um ligante PG 64-22 a 25°C e em banho-maria.....	36
Figura 25 - Imagem de tomografia computadorizada de regeneração de um ligante PG 64-22 a 25°C e em condição seca	37
Figura 26 – Programa Experimental	38
Figura 27 – Agregados: a) G ES; b) G RJ; c) BA; d) MX.....	41
Figura 28 – Localização das pedreiras.....	41
Figura 29 - Equipamento AIMS do Laboratório de Microscopia Eletrônica da UFC. 44	
Figura 30 - Variação de: (a) angularidade e (b) forma 2D a partir de imagens geradas pelo AIMS.....	45
Figura 31 – Esquema de pesos considerados para cada tipo de fragmento observado	48
Figura 32 - Inspeção visual de fragmentos através da lupa de mão.	49
Figura 33 – Curva Granulométrica do agregado constituinte da MAC, MAF e limites da faixa C do DNIT.....	52
Figura 34 – Procedimento de mistura	55
Figura 35 – Molde para compactação de MAF	55
Figura 36 – Procedimento de compactação de MAFs	57
Figura 37 – Corpo-de-prova de MAF e “holders”	59
Figura 38 - CP de MAF acoplado ao reômetro.....	59
Figura 39 – Ensaio de varredura de frequência para obtenção de m	60
Figura 40 – Deslocamento da curva C vs Tempo e obtenção de $C'f$	63
Figura 41 – Obtenção de $S'f$	63
Figura 42 – Curvas de distribuição granulométrica dos fileres (<0,075mm)	66
Figura 43 – Angularidade obtida por PDI e limites de classificação segundo Ibiapina (2018).....	67

Figura 44 – Forma 2D obtida por PDI e limites de classificação segundo Ibiapina (2018).....	67
Figura 45 – Imagens do agregado G ES obtidas por MEV	68
Figura 46 – Imagens do agregado G RJ obtidas por MEV.....	69
Figura 47 – Imagens do agregado BA obtidas por MEV	69
Figura 48 – Imagens do agregado MX obtidas por MEV.....	70
Figura 49 – Imagem do agregado G RJ obtida por MEV/EDS.....	71
Figura 50 – Imagem do agregado BA obtida por MEV/EDS	71
Figura 51 – Imagem do agregado MX obtida por MEV/EDS.....	72
Figura 52 – Difratoograma do agregado G ES.....	76
Figura 53 – Difratoograma do agregado G RJ	76
Figura 54 – Difratoograma do agregado BA.....	77
Figura 55 – Difratoograma do agregado MX.....	77
Figura 56 – Fragmento de basalto 1	80
Figura 57 – Fragmento de basalto 2	81
Figura 58 – Fragmento de basalto 3	81
Figura 59 – Fragmento de basalto 4	81
Figura 60 – Fragmento de micaxisto 1	82
Figura 61 – Fragmento de micaxisto 2.....	82
Figura 62 – Fragmento de micaxisto 3.....	82
Figura 63 – Variação do módulo complexo $ G^* $ das MAFs durante ensaio de “ <i>Fingerprint</i> ”.....	86
Figura 64 – Curva característica de dano da MAF_G_ES	87
Figura 65: – Curva característica de dano da MAF_G_RJ.....	87
Figura 66 – Curva característica de dano da MAF_BA	88
Figura 67 – Curva característica de dano da MAF_MX.....	88
Figura 68 – DMR médio das MAFs analisadas	90
Figura 69 – Curvas características de dano das MAFs analisadas.....	91
Figura 70 – Curvas de Fadiga.....	92
Figura 71 – Número de ciclos até a ruptura das MAFs segundo modelo de fadiga com deformação controlada de 1% frente ao teor de silício	93
Figura 72 – Número de ciclos até a ruptura das MAFs segundo modelo de fadiga com deformação controlada de 10% frente ao teor de silício	94
Figura 73 – Autorregeneração média das MAFs.....	95

Figura 74 – Teor de quartzo frente à autorregeneração média das MAFs.....	97
Figura 75 – Taxa de evolução de dano frente a autorregeneração de cada amostra	98
Figura 76 – C11 frente a autorregeneração de cada amostra.....	99
Figura 77 – C12 frente a autorregeneração de cada amostra.....	99

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classificação de Basicidade de Rochas	9
Quadro 2 - Métodos de caracterização de autorregeneração em materiais asfálticos	12
Quadro 3 - Compilado de parâmetros utilizados em ensaios de fadiga	22
Quadro 4 - Pesquisas que consideraram a autorregeneração e quais fatores foram estudados.....	24
Quadro 5 – Características da amostra de CAP 30/45 empregado neste estudo....	39
Quadro 6 - Ensaio de caracterização dos agregados.....	42
Quadro 7 - Classificação morfológica proposta por Ibiapina (2018).....	46
Quadro 8 – Parâmetros utilizados na dosagem da MAF_G_ES	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Massa dos componentes das MAFs	54
Tabela 2 - Resultados de massa específica real e absorção	64
Tabela 3 – Composição química dos agregados pela técnica de MEV/EDS em massa dos óxidos (%)	73
Tabela 4 – Relação de elementos que favorecem a adesividade pelo teor de silício em massa.....	74
Tabela 5 – Proporção dos minerais determinada a partir da realização de inspeção visual.....	75
Tabela 6 – Quantitativo aproximado dos minerais presentes nos agregados a partir da análise realizada com o uso dos difratômetros	78
Tabela 7 – Composição química aproximada dos agregados obtida pela análise com o uso do DRX.....	78
Tabela 8 – Diferenças na composição química dos agregados encontradas através dos resultados dos ensaios MEV/EDS e DRX	79
Tabela 9 – Parâmetros volumétricos das MAFs.....	84
Tabela 10 – Parâmetros extraídos do “ <i>Fingerprint</i> ” para aplicação do modelo S-VECD	86
Tabela 11 – Fator de forma das curvas características de dano.....	89
Tabela 12 – Parâmetros da “Power Law” das MAFs.....	91
Tabela 13 – Parâmetros do modelo de fadiga das MAFs	91
Tabela 14 – Parâmetros da correlação de Pearson.....	97

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Considerações iniciais	1
1.2	Objetivos	4
1.2.1	Objetivo Geral.....	4
1.2.2	Objetivos Específicos	4
1.3	Estrutura da Dissertação.....	5
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	6
2.1	Processo de Fratura em Misturas Asfálticas.....	6
2.2	Influência dos Agregados na Resistência à Fratura de Misturas Asfálticas ..	8
2.3	Autorregeneração de materiais asfálticos	11
2.3.1	Metodologias utilizadas para avaliar as características de autorregeneração.....	11
2.3.1.1	Avaliação da Fadiga e da Autorregeneração de Misturas Asfálticas aplicando a Teoria S-VECD	15
2.3.2	Fatores que Afetam a Autoregeneração.....	25
2.3.2.1	Fatores Internos	25
2.3.2.2	Fatores externos	31
3	MATERIAIS E MÉTODOS	38
3.1	Ligante Asfáltico.....	39
3.2	Agregados.....	40
3.2.1	Ensaio de caracterização física	43
3.2.1.1	Massa específica real e absorção do agregado miúdo	43
3.2.1.2	Massa específica dos fíleres	43
3.2.1.3	Granulometria dos fíleres	43
3.2.2	Ensaio de caracterização morfológica	44
3.2.2.1	Morfologia por Processamento Digital de Imagem (PDI)	44

3.2.2.2	Morfologia por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	46
3.2.3	Ensaio de caracterização química	46
3.2.3.1	Composição química através de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) acoplada à Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS)	46
3.2.4	Ensaio de caracterização mineralógica	47
3.2.4.1	Análise mineralógica com lupa de mão	47
3.2.4.2	Mineralogia através de análise microscópica com lâminas delgadas	49
3.2.4.3	Composição Mineralógica através de Difração de Raios X (DRX)	50
3.3	Procedimento de Dosagem e Compactação das MAFs	51
3.3.1	Dosagem das MAFs	52
3.3.2	Compactação das MAFs	55
3.3.3	Determinação do Volume de vazios das MAFs	57
3.4	Ensaio Oscilatórios	58
3.4.1	Ensaio de Varredura de Frequência (<i>Fingerprint</i>)	59
3.4.2	Ensaio de Varredura de Tempo	60
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	64
4.1	Ensaio de Caracterização dos Agregados	64
4.1.1	Resultados de Ensaio de Caracterização Física	64
4.1.2	Resultados de Ensaio de Caracterização Morfológica	66
4.1.3	Resultados de Ensaio de Caracterização Química	72
4.1.4	Ensaio de Caracterização Mineralógica	74
4.2	Dosagem e Compactação das MAFs	83
4.3	Ensaio oscilatórios	85
4.4	Autorregeneração	95
5	CONCLUSÕES	100
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	102
6	REFERÊNCIAS	104

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

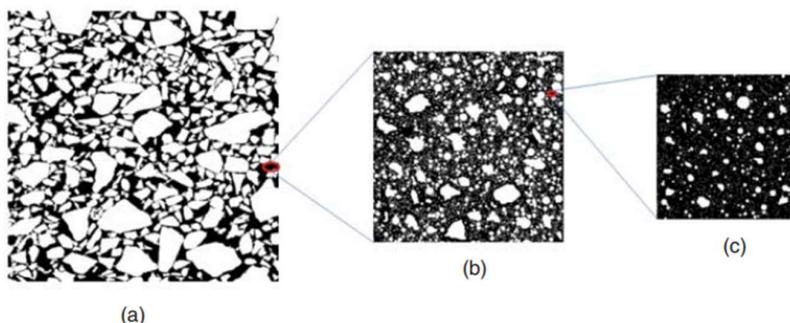
No Brasil, o transporte rodoviário é um dos principais meios utilizados tanto para o transporte de produtos e matérias primas quanto para o transporte de pessoas. Devido a isto, espera-se que as rodovias apresentem condições estruturais e funcionais para atender ao grande número de solicitações impostas. Porém, apesar da alta extensão da malha rodoviária, i.e., cerca de 1.720.909 km, apenas 213.500 km (12,4%) são pavimentados. Destas, cerca de 99% das rodovias pavimentadas possuem mistura asfáltica em sua camada de rolamento, ou seja, os pavimentos flexíveis são predominantes no Brasil (CNT, 2021).

Mais da metade das rodovias nacionais apresentam algum tipo de manifestação patológica. Em 2021, a Confederação Nacional do Transporte (CNT), realizou uma pesquisa sobre a condição dos pavimentos em rodovias brasileiras, foram analisados aproximadamente 110 mil quilômetros de rodovias pavimentadas, e apenas 15,0% destas, foram classificadas como em perfeito estado. Entre os restantes, 46,9% estavam desgastadas, 31,9% apresentaram trincas em malhas ou remendos, em 5,7% foram observadas patologias mais severas como afundamentos ou buracos. Em 0,5% o pavimento foi classificado como destruído.

Como visto, uma das manifestações patológicas mais recorrentes no pavimento são as trincas em malhas. Compõe esse grupo as trincas por fadiga, que surgem por conta do carregamento repetitivo aplicado pelo tráfego no pavimento, visto que este é submetido a carregamentos dinâmicos. O trincamento por fadiga, visível a olho nu com sob aspecto “couro de jacaré”, inicia em escalas menores da mistura que colaboram para a diminuição da integridade do revestimento. Em larga escala, esses defeitos podem gerar microfissuras (COUTINHO, 2012). Além dos esforços resultantes do carregamento repetitivo de veículos, outros fatores podem contribuir para o surgimento de trincas prematuras no pavimento, pois, sua resistência à fadiga está relacionada tanto às características estruturais do pavimento quanto aos materiais que o constituem (BOEIRA, 2018). A interação entre os constituintes das misturas asfálticas é relevante para entender como o material asfáltico se comportará em relação à resistência ao trincamento por fadiga.

Sobre a origem do trincamento em pavimentos flexíveis, pesquisas apontam que este se inicia na parte fina do concreto asfáltico (KIM *et al.*, 2003; COUTINHO, 2012). Portanto, recentemente, autores vêm utilizando essa escala intermediária das misturas asfálticas para avaliar o comportamento por fadiga do material. Além da justificativa do trincamento se iniciar nas escalas menores, as amostras potencialmente também apresentam estrutura interna mais uniforme, diminuindo, assim, a variabilidade dos resultados de ensaios experimentais, quando comparadas às escalas maiores. Além de possibilitar a economia de material pois, em geral, as amostras utilizadas possuem menores dimensões àquelas requeridas para misturas asfálticas completas (SADEQ *et al.*, 2016). A escala intermediária é denominada Matriz de Agregados Finos (MAF) e é composta por todos os materiais constituintes de uma Mistura Asfáltica Completa (MAC), excluindo o agregado graúdo. Na Figura 1 é possível observar três escalas de estudo de misturas asfálticas: (a) MAC, (b) MAF, e (c) mastique. Este último definido como a mistura entre ligante asfáltico e fíler (material predominantemente passante na peneira com abertura da malha de 75 µm) (COUTINHO, 2012; FONSECA, 2016; FREIRE *et al.*, 2017; OLIVEIRA, 2019).

Figura 1 – Diferentes escalas da mistura asfáltica. (a) MAC; (b) MAF; (c) mastique.



Fonte: Arshadi & Bahia (2015)

Diversos estudos são desenvolvidos com a finalidade de prolongar a vida de fadiga das misturas asfálticas, entre esses estudos, estão presentes aqueles que avaliam a extensão da vida de fadiga através da autorregeneração. A autorregeneração é uma das características de materiais asfálticos relacionada à presença do ligante betuminoso (KIM *et al.*, 2003; SHEN *et al.*, 2010; TAN *et al.*, 2012; SANTAGATA *et al.*, 2013; KARKI, 2014; KARKI *et al.*, 2016; SUN *et al.*, 2017; XIE *et al.*, 2017).

A capacidade de autorregeneração (*self-healing*, em inglês) é uma característica de materiais viscoelásticos que pode levar ao prolongamento da vida de fadiga desses

materiais através da recuperação de parte de sua integridade após o repouso. Em outras palavras, quando a sollicitação sobre o material se torna nula, após a aplicação de cargas repetidas, este tem a capacidade de se regenerar parcialmente do dano por fadiga sofrido pelos esforços aos quais foi submetido (WOOL, 2007; QIU, 2012; SUN *et al.*, 2018; KHIAMI *et al.*, 2021).

Como mencionado, os materiais asfálticos possuem capacidade de autorregeneração, porém, no projeto de pavimentos, esta não é levada em consideração. Caso essa propriedade seja melhor compreendida e explorada, pode haver uma contribuição na escolha de materiais durante as etapas de projeto de forma a prolongar a vida dos pavimentos. Em virtude disso, diversos trabalhos foram realizados a fim de entender quais fatores contribuem para a autorregeneração (WOOL, 2007; SURESHA & NINGAPPA, 2018).

As propriedades químicas do ligante asfáltico têm relação com o desempenho deste, incluindo sua capacidade de autorregeneração. Pesquisas demonstraram que há uma correlação diretamente proporcional entre a melhoria desta propriedade e a proporção de aromáticos e saturados na composição do ligante asfáltico. Isso é justificado pelo tamanho desses compostos, pois os compostos aromáticos e saturados são moléculas pequenas e leves, contribuindo para a difusão e o movimento molecular, diferente dos asfaltenos e das resinas (WANG *et al.*, 2018). Um parâmetro que interfere negativamente na autorregeneração de ligantes é o envelhecimento do mesmo, pois na oxidação há um aumento das frações moleculares pesadas, como os asfaltenos (WANG *et al.*, 2019).

A maior parte das pesquisas no tema autorregeneração tem sido desenvolvida com a finalidade de estabelecer metodologias ou quantificar as características de autorregeneração do ligante apenas, como pode ser observado nos trabalhos de Tan *et al.* (2012), Canestrari *et al.* (2015), Ayar *et al.* (2016), Wang *et al.* (2018), Asadi e Tabatabaee (2020), entre outros. No entanto, sabe-se que os constituintes das misturas asfálticas interagem, o que afeta as propriedades da mistura como um todo. Portanto, acredita-se que o tipo de agregado utilizado na produção de misturas asfálticas, pode afetar as características de autorregeneração do ligante asfáltico (através de interações entre os materiais que podem alterar as características químicas e reológicas do ligante asfáltico).

Devido à ampla gama de rochas encontradas no território nacional, o presente estudo busca trabalhar com uma grande variedade de agregados utilizados na infraestrutura de transportes. Dessa forma, busca-se verificar a influência dos agregados na resistência à fadiga e capacidade de autorregeneração de MAFs. Considerando que ainda são incipientes os estudos que utilizam a escala MAF e o efeito dos agregados na autorregeneração, acredita-se que este trabalho contribuirá para o estado da arte e, de forma prática, para a seleção de agregados visando o desenvolvimento de misturas asfálticas mais duráveis.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo geral avaliar a influência das propriedades dos agregados na resistência ao trincamento por fadiga e nas características de autorregeneração de Misturas Asfálticas Finas (MAFs).

1.2.2 Objetivos Específicos

- Avaliar, por meio do uso de diferentes procedimentos, as principais diferenças com relação à composição física, química, mineralógica e morfológica de alguns agregados disponíveis no Brasil e, comumente, utilizados na pavimentação;
- Verificar a influência do tipo de agregado nas características de MAFs produzidas com diferentes agregados através da determinação experimental da propriedade viscoelástica denominada módulo dinâmico ($|G^*|$);
- Correlacionar as diferenças entre os agregados com a diferença entre o comportamento à fadiga das misturas asfálticas;
- Determinar quais características das MAFs e de seus agregados constituintes contribuíram de forma mais significativa na capacidade de autorregeneração.

1.3 Estrutura da Dissertação

A dissertação está estruturada em 5 (cinco) capítulos.

O Capítulo 1 contém a introdução na qual constam a justificativa da escolha do tema, os objetivos e a estrutura da dissertação.

O Capítulo 2 apresenta uma revisão de literatura referente a tópicos importantes para o entendimento de conceitos de pavimentos flexíveis, dano por fadiga, autorregeneração, métodos e parâmetros utilizados em diversos estudos tanto no âmbito nacional quanto internacional, para esclarecer quais variáveis já foram estudadas com a finalidade de caracterização da autorregeneração, sendo base para a definição de lacunas de pesquisa e determinação dos procedimentos adotados na metodologia empregada no presente estudo.

O Capítulo 3 apresenta os materiais e métodos utilizados nesta pesquisa, desde a coleta de amostras e caracterização dos materiais utilizados, dos processos de dosagem e confecção dos corpos-de-prova de MAFs, bem como dos procedimentos experimentais necessários para obtenção do comportamento à fadiga e da autorregeneração das amostras.

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

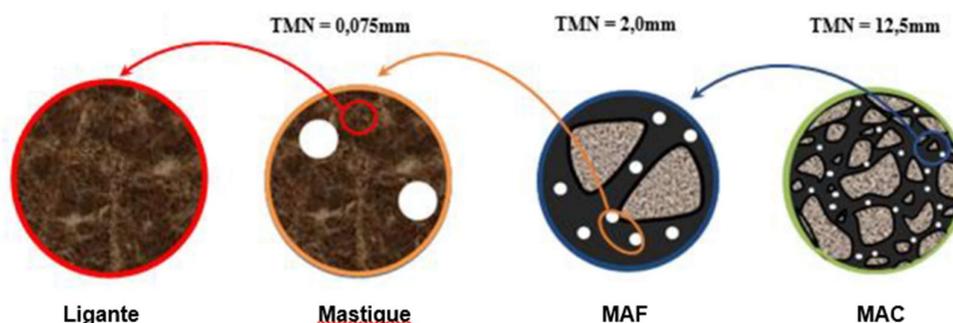
No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões e algumas recomendações para a continuidade da pesquisa em trabalhos futuros.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Processo de Fratura em Misturas Asfálticas

Sabe-se que a maior parte dos revestimentos de pavimentos no Brasil é constituída de materiais asfálticos, i.e., mistura de agregados com ligante asfáltico. As características dos materiais asfálticos são essenciais para identificar o comportamento do concreto asfáltico resultante. Alguns comportamentos são mais evidentes em escalas maiores de análise, pois têm grande influência dos agregados graúdos (como a resistência à deformação permanente). Outros são imperceptíveis a olho nu (como trincamento, autorregeneração, interações químicas entre constituintes, etc). Assim, a depender do foco do estudo, diferentes escalas de análise da mistura asfáltica podem ser avaliadas. Em geral, no âmbito de laboratório, pode-se dividir em quatro escalas, i.e., ligante, mastique, MAF e MAC, como ilustrado na Figura 2. Uma das diferenças entre as escalas é o Tamanho Máximo Nominal (TMN) dos agregados que as compõem.

Figura 2 - Representação das diferentes escalas



Fonte: Oliveira (2019)

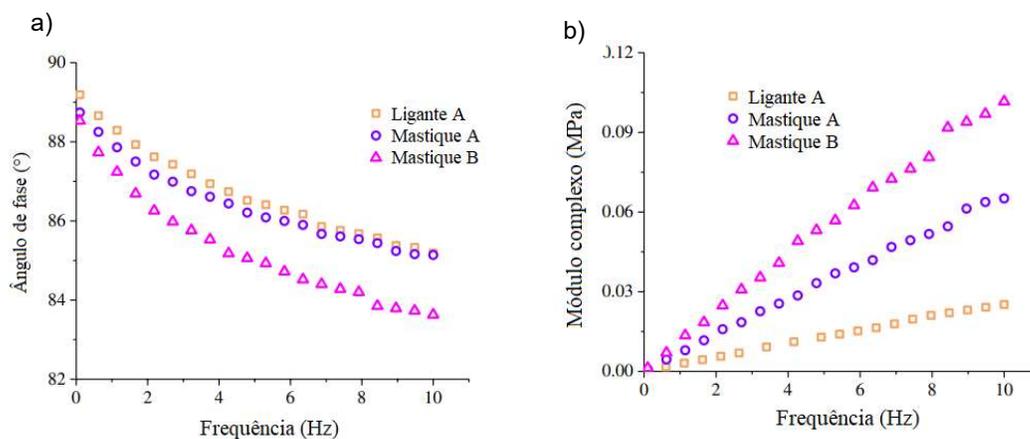
A caracterização de MAFs pode ser utilizada como passo intermediário para a previsão do comportamento de MACs pois a fratura se inicia na parte fina da mistura asfáltica devido à menor rigidez das MAFs em comparação as fases maiores (agregados graúdos). Também, devido à ausência de frações graúdas, a estrutura interna das MAFs é mais uniforme o que resulta em menor variabilidade nos resultados experimentais quando esse tipo de amostra é utilizado (COUTINHO, 2012).

Como já foi mencionado, com relação as características de autorregeneração das misturas, a escala do ligante é a mais utilizada nos estudos (TAN *et al.*, 2012; CANESTRARI *et al.*, 2015; AYAR *et al.*, 2016; WANG *et al.*, 2018; ASADI & TABATABAEE, 2020). No entanto, tanto as características do ligante quanto dos agregados podem afetar o comportamento das misturas asfálticas com relação ao processo de trincamento. As fraturas que ocorrem podem ser coesivas (na interface ligante-ligante) ou adesivas (ligante-agregado).

Acredita-se, neste estudo, que a adesividade ligante-agregado pode interferir tanto no processo de fratura (VASCONCELOS *et al.*, 2008; HOU *et al.*, 2018; LUCAS JUNIOR *et al.* 2019) como também no processo de autorregeneração das MAFs. Pois, pode haver uma diferença no número de trincas coesivas e adesivas a depender da adesividade, além de dificultarem a movimentação do ligante.

Já se sabe que diferentes agregados podem modificar as propriedades químicas e reológicas do ligante. Por exemplo, as Figuras 3 (a) e (b) apresentam resultados obtidos por Zhang *et al.* (2018), eles verificaram a variação do ângulo de fase e do módulo complexo de dois diferentes mastiques (Mastique A e Mastique B) compostos pelo mesmo ligante (Ligante A). A diferença entre os dois mastiques era o tipo de fíler utilizado. No mastique A, foi utilizado material basáltico, enquanto no B material calcário, ou seja, foram utilizadas diferentes rochas para a composição de misturas asfálticas na escala do mastique. Assim, espera-se que diferentes agregados na composição de misturas asfálticas, também resultem em mudanças na autorregeneração.

Figura 3 - Propriedades reológicas: Ângulo de fase(a); Módulo complexo (b)



Fonte: Adaptado de Zhang *et al.* (2018)

A adesividade ligante-agregado está diretamente relacionada a composição química e mineralógica dos materiais componentes da mistura asfáltica. Predominantemente, o ligante asfáltico, quando em contato com a água, tem sua superfície carregada de forma eletronegativa, por conta da reação entre a água com os grupos de ácidos carboxílicos que compõe o ligante (PELTONEN, 1992; BERNUCCI, *et al.*, 2008; FONSECA, 2016). Desta forma, caso o agregado também possua carga eletronegativa em sua superfície, ocorrerá deficiências na adesividade entre ligante asfáltico e agregado. Muitas rochas, quando em contato com a água, apresentam suas superfícies carregadas eletro negativamente. Entre os minerais mais comuns em rochas que possuem essa característica, destaca-se o quartzo, muito presente no arenito, quartzito e granito. Outros componentes constituídos por cálcio, magnésio, alumínio ou ferro também podem contribuir, porém de forma positiva, para melhoria na adesividade ligante-agregado. De modo geral, quanto maior o teor de sílica em uma rocha, menor será a adesividade da mesma ao ligante. Por conta desta relação é comum que rochas utilizadas em serviços de pavimentação sejam classificadas como ácidas ou básicas, referindo-se ao teor de sílica na composição dos agregados. Rochas ácidas possuem alta concentração de silício ou quartzo, tendo pior adesividade do que rochas básicas que possuem ausência de quartzo e baixa concentração de silício na composição química, dando espaço para elementos que contribuem para a adesividade. A má adesividade pode resultar em misturas com baixo desempenho a fratura. Portanto, é necessário entender essa característica para futuras análises (BERNUCCI *et al.*, 2008; ZHANG *et al.*, 2015).

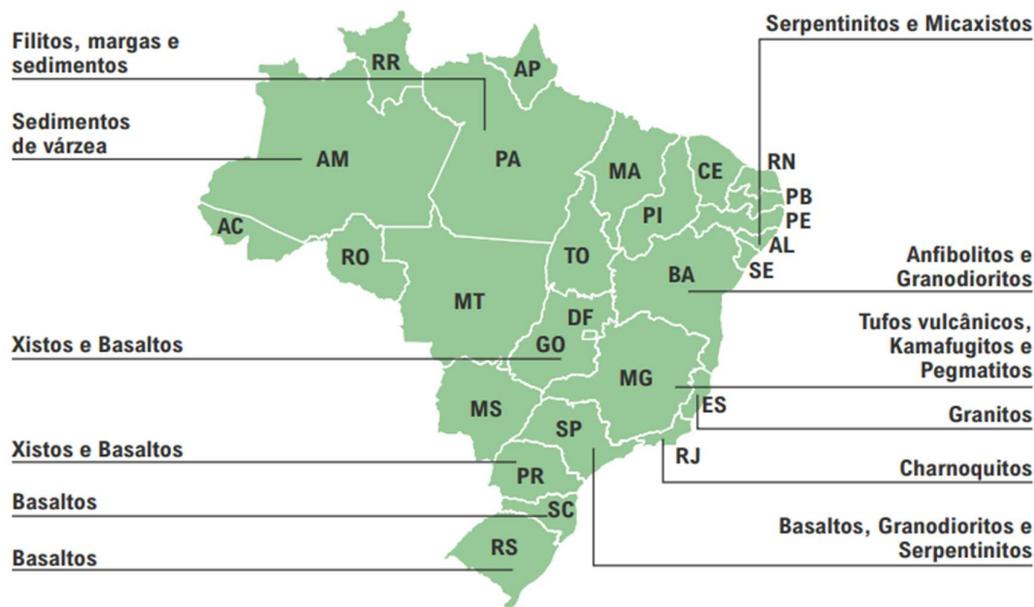
2.2 Influência dos Agregados na Resistência à Fratura de Misturas Asfálticas

A brita é o produto da britagem de rochas, processo este amplamente utilizado na construção de pavimentos para obtenção de agregados. A princípio, qualquer rocha pode ser utilizada para a produção de britas. Entre as rochas mais utilizadas na construção civil no Brasil estão: granito, gnaisse, basalto, diabásio, calcário e dolomito. No Brasil, cerca de 85% da brita produzida vem de granito/gnaisse, 10% de calcário/dolomito e 5% de basalto/diabásio (QUARESMA, 2009).

A distribuição dessas rochas no território brasileiro não é uniforme. Portanto, em certas regiões, apenas são encontradas algumas ou nenhuma das rochas descritas

anteriormente. A Figura 4 apresenta a distribuição de rochas predominantes em cada região do país.

Figura 4 - Tipos de rochas encontradas no território brasileiro



Fonte: Theodoro (2020)

As composições químicas e mineralógicas das britas variam de acordo com a rocha que as originou, podendo afetar o desempenho do produto para qual elas foram destinadas. Em misturas asfálticas, a atenção sob o requisito de adesividade é de extrema importância. É consenso na comunidade científica que uma das principais características dos agregados que interferem na adesividade ligante-agregado é a sua acidez. Esta é definida pelo teor de sílica presente na composição química dos agregados, conforme pode ser observado na classificação de rochas apresentada no Quadro 1. Vale destacar que a presença de mineral quartzo, constituído basicamente de sílica, também serve de parâmetro para esta classificação.

Quadro 1 - Classificação de Basicidade de Rochas

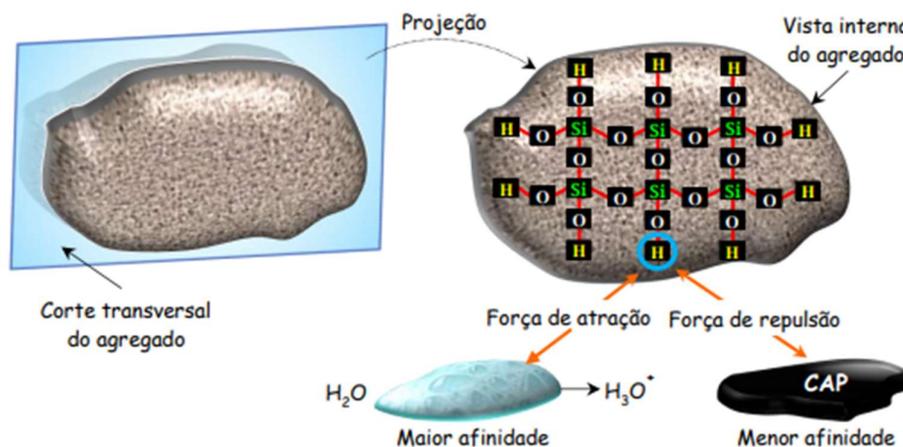
Classificação	% sílica (SiO ₂)	Quartzo	Exemplo
Ácida	> 65	Presente	Granito, Riolito, Quartzito
Neutra	52 a 65	Pouco ou Inexistente	Sienito, Diorito
Básica	45 a 52	Raríssimo	Basalto. Gabro

Ultrabásica	< 45	Inexistente, Feldspato Escasso	Piroxênio
--------------------	------	--------------------------------	-----------

Fonte: **BERNUCCI et al., 2008**

A presença de sílica é utilizada na definição da basicidade das rochas pois, de modo geral, o comportamento de baixa adesividade entre ligante e agregado ocorre quando há a presença de grupos silanol (Si-OH) polares na superfície do agregado, que ao reagirem com a água, liberam cátion hidrogênio (H⁺). Conseqüentemente, a superfície do agregado fica carregada negativamente. Da mesma forma, o ligante asfáltico, quando em contato com a água, libera um cátion de hidrogênio (H⁺) presente nos grupos de ácidos carboxílicos (-COOH) que o constituem, sendo assim sua superfície também se torna eletronegativa. Conseqüentemente, como os agregados e o ligante são carregados com forças eletronegativas, são geradas forças de repulsão que dificultam a adesividade destes dois materiais. A Figura 5 ilustra um agregado com alto teor de sílica e como é a sua afinidade com o ligante asfáltico e com a água.

Figura 5 – Comportamento do agregado ácido em contato com a água e o ligante



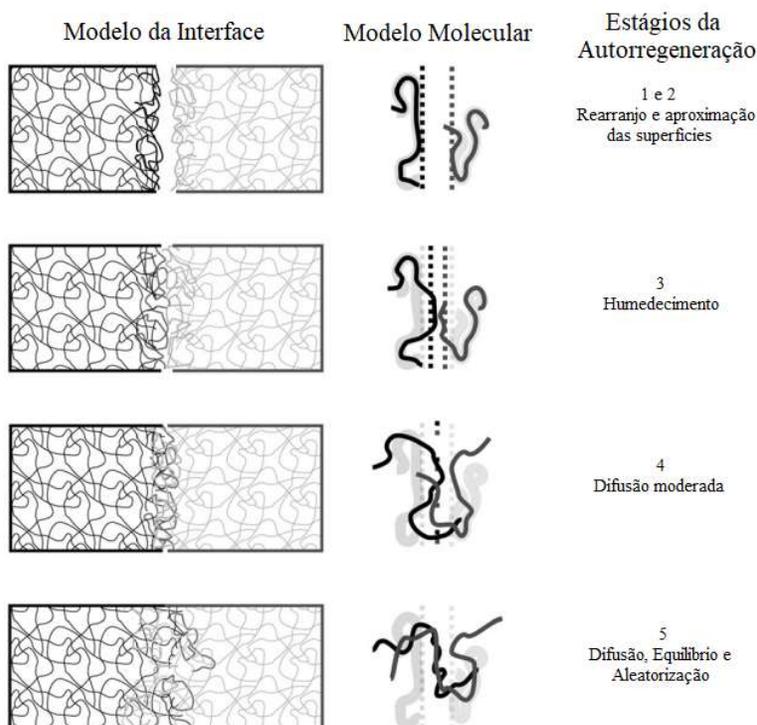
Fonte: **Lucas Junior, 2018**

2.3 Autorregeneração de materiais asfálticos

2.3.1 Metodologias utilizadas para avaliar as características de autorregeneração

A autorregeneração consiste na capacidade do material asfáltico reestabelecer rigidez através do fechamento de suas trincas de forma natural, quando o material não estiver sendo solicitado. O fechamento dessas trincas ocorre por difusão das cadeias moleculares. A difusão é uma das últimas etapas que compõem a autorregeneração. Esse processo acontece, inicialmente, a partir da aproximação das faces geradas pela fratura. Esta etapa é essencial, uma vez que a autorregeneração apenas ocorre entre superfícies em contato. A partir da aproximação, ambas as superfícies se aderem devido a energia superficial das faces, a estrutura então é reestabelecida por difusão molecular das cadeias que se organizam, aleatoriamente, restituindo parte da integridade perdida (WOOL, 2007). A Figura 6 representa esses estágios do processo de autorregeneração.

Figura 6 - Etapas da autorregeneração de fissuras



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

Uma vez entendido o fenômeno, cabe identificá-lo e quantificá-lo. Qiu (2012) lista diferentes métodos para caracterizar a autorregeneração, dependendo de cada escala do material asfáltico, essa lista é adaptada no Quadro 2. Adiante serão apresentadas algumas metodologias e resultados obtidos em estudos recentes.

Quadro 1 - Métodos de caracterização de autorregeneração em materiais asfálticos

Mecanismo de Autorregeneração		Ensaio em Diferentes Escalas de Análise		
		Ligante, mastique ou MAF	MAC	Pavimento asfáltico
Autorregeneração relacionada à fadiga	Autorregeneração relacionada à fadiga com carga intermitente	Ensaio de fadiga em reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR)	Flexão em dois, três ou quatro pontos; Ensaio uniaxial de tração-compressão;	
	Autorregeneração relacionada à fadiga com períodos de repouso	Ensaio de fadiga em reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR)	Flexão em dois, três ou quatro pontos; Tração indireta	
Autorregeneração relacionada à fratura		Ensaio de fadiga em reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR)	Tensão uniaxial; Flexão em dois, três ou quatro pontos	
Outros métodos		Microscopia Eletrônica de Varredura (SEM); Energia Livre de Superfície		
Testes de autorregeneração utilizados em campo				"Falling Weight Deflectometer" (FWD); "Stress wave"

Fonte: Adaptado de Qiu (2012)

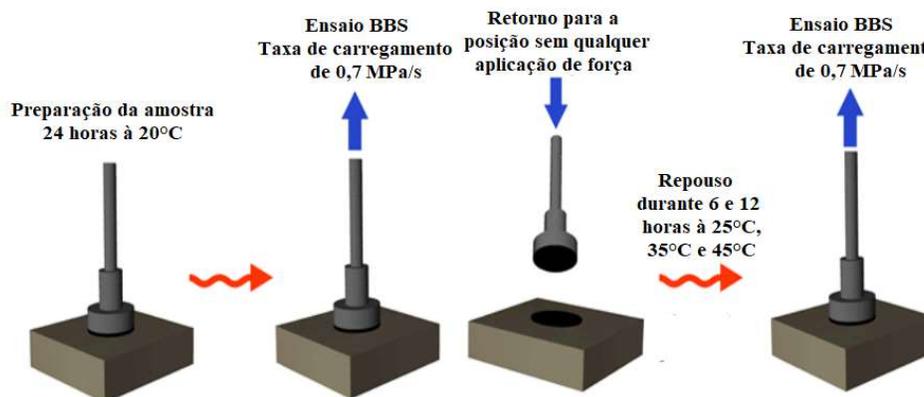
Em trabalhos com misturas asfálticas, ensaios de flexão são comumente utilizados para avaliação da autorregeneração. García (2011), Norambuena-Contreras e García (2016), Sun *et al.* (2017), Al-Mansoori *et al.* (2018) são alguns dos autores que utilizaram este tipo de ensaio para caracterizar este fenômeno. Entretanto, mesmo que todos tenham utilizado o ensaio de flexão em três pontos, há diferenças entre as metodologias utilizadas. Por exemplo, para a realização do ensaio, Norambuena-Contreras e García (2016) utilizaram amostras semi-circulares, enquanto os demais autores utilizaram amostras retangulares. Outra diferença entre estes estudos está no material que foi investigado para promover a autorregeneração. García (2011)

utilizou fibras condutoras na mistura asfáltica e investigou a autorregeneração em temperaturas que variaram de 15°C até 110°C. Assim como García (2011), Sun *et al.* (2017) utilizaram fibras metálicas, entretanto, os citados autores também utilizaram como alternativa escórias e investigaram sua capacidade de favorecer a autorregeneração durante o aquecimento. Como outra alternativa, Al-Mansoori *et al.* (2018) utilizaram microcápsulas de óleo para regenerar as trincas e, assim como os demais autores, investigaram o fenômeno para diversos períodos de repouso e temperaturas. Mesmo com diferenças entre os estudos, todos calcularam a autorregeneração de mesma forma, através da relação entre as forças aplicadas antes e após a aplicação do período de repouso.

Outros autores quantificaram a capacidade de autorregeneração de ligantes através do ensaio *pull-off*, também conhecido como *bitumen bond strength* (BBS), cuja premissa é quantificar o reestabelecimento da coesão molecular do material asfáltico. Em resumo, o ensaio promove a ruptura de uma amostra por esforços de tração. Após a ruptura, as interfaces são aproximadas afim de promover a autorregeneração. Após um período de repouso pré-estabelecido, a amostra é novamente sujeita à esforços de tração até sua ruptura. Através da divisão dos valores de força exercida pelo equipamento antes e após a regeneração, é possível definir um valor para a autorregeneração (HI, do inglês *healing index*) em porcentagem (ZHANG *et al.*, 2019). Kazemi *et al.* (2021) utilizaram essa metodologia para identificar a influência de diversos fatores sobre a autorregeneração. A Figura 7 apresenta um esquema do procedimento utilizado, enquanto a Figura 8 demonstra resultados obtidos na mesma pesquisa. Nota-se a influência na autorregeneração de diferentes temperaturas durante o repouso (25, 35 e 45°C). O aumento da temperatura aumenta também a mobilidade do ligante e acelera as ligações das cadeias. Deste modo, quanto mais elevada foi a temperatura, maiores foram os valores de autorregeneração encontrados. Também foram utilizados diferentes tempos de repouso (6 e 24 horas). O tempo de repouso mais longo favoreceu a autorregeneração, pois, possibilita que a difusão do ligante aconteça, entretanto o impacto do período de repouso diminuiu com o acréscimo da temperatura, demonstrando que há um limite máximo para a autorregeneração. Por fim, o estudo também avaliou quatro tipos de ligantes, um ligante puro de PG 58-22 identificado como B, e outros três, PUMB-3, PUMB-6 e PUMB-9, modificados respectivamente com 3%, 6% e 9% de poliuretano. Neste caso,

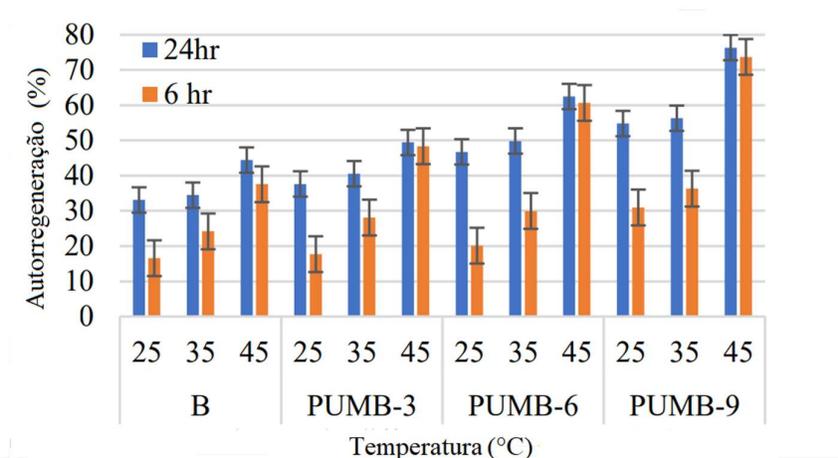
quanto maior foi a quantidade de polímero adicionado, maior foi a autorregeneração obtida.

Figura 7 - Procedimento para realização de teste de autorregeneração utilizando BBS teste



Fonte: Adaptado de Kazemi *et al.* (2021)

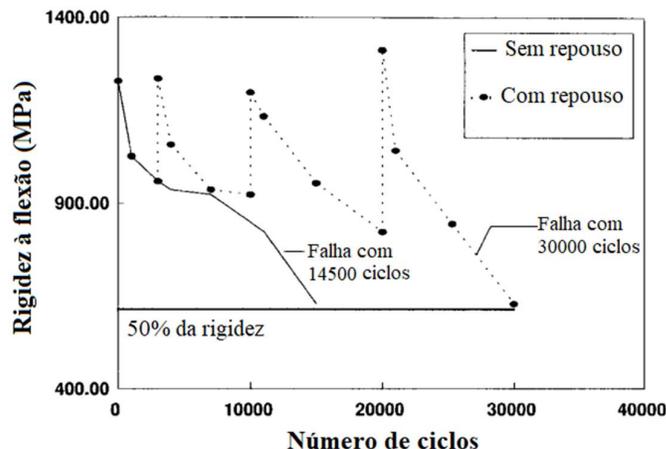
Figura 8 - Resultados de autorregeneração obtidos por Kazemi *et al.* (2021)



Fonte: Adaptado de Kazemi *et al.* (2021)

O método de ressonância de impacto, utilizado por Daniel e Kim (2001) foi utilizado para analisar a capacidade de autorregeneração. O procedimento é descrito pela norma ASTM C 215, sendo um ensaio cíclico, levando a amostra a ruptura por fadiga. Com este ensaio, é possível identificar a variação do módulo dinâmico do material. A Figura 9 apresenta um dos resultados obtidos por Daniel e Kim (2001), que demonstra o comportamento de uma amostra de concreto asfáltico, com e sem a inserção de períodos de repouso. Percebe-se que os repouso restauraram parte da rigidez da amostra, além de aumentar o número de ciclos necessários até a ruptura do material.

Figura 9 - Rigidez à flexão versus número de ciclos de carregamento com e sem período de repouso



Fonte: Adaptado de Daniel & Kim (2001)

2.3.1.1 Avaliação da Fadiga e da Autorregeneração de Misturas Asfálticas aplicando a Teoria S-VECD

Alguns métodos quantificam a capacidade de autorregeneração de materiais asfálticos através da verificação das alterações das propriedades reológicas do material, quando submetido à carregamentos cíclicos. Entre os estudos encontrados, o método mais utilizado para a avaliação da resistência à fadiga e à autogerreneração, simultaneamente, utiliza princípios reológicos, submetendo amostras cilíndricas à ensaios de cisalhamento até a ruptura da amostra utilizando o DSR (*Dynamic Shear Rheometer*). Os dados obtidos podem ser modelados através do uso do modelo de dano contínuo viscoelástico, conhecido como modelo VECD (*Visco-Elastic Continuum Damage*), inicialmente desenvolvido por Daniel e Kim (2002). Neste modelo, as trincas são consideradas homogêneas e por podem ser representadas por variáveis internas.

O princípio físico do citado modelo considera que uma amostra, ao ser submetida a um carregamento cíclico com uma taxa de carregamento relativamente alta (acima do regime viscoelástico linear da amostra), irá desenvolver microfissuras originadas pela exposição do corpo-de-prova a múltiplas torções de baixa amplitude, gerando forças de cisalhamento. A medida em que esforços repetitivos de torção são aplicados, a amostra tende a ter sua integridade diminuída, representada pela queda

de sua rigidez, resultado do desenvolvimento de microtrincas devido ao dano por fadiga.

Posteriormente, Underwood *et al.* (2012) propuseram uma simplificação do modelo VECD, passando a denominá-lo de S-VECD (*Simplified Viscoelastic Continuum Damage*). A simplificação utiliza o princípio da correspondência elástica-viscoelástica proposto inicialmente por Schapery (1982). Esta é uma ferramenta matemática teórica que transforma o comportamento viscoelástico do material em um comportamento linear elástico através do uso de pseudo-variáveis, como pseudo-rigidez (C) e pseudo-deformação (tensão viscoelástica linear dividida por um módulo de referência). A utilização do princípio tem como objetivo separar o comportamento viscoelástico do material dos efeitos gerados pelo dano durante os esforços de fadiga.

Além do princípio da correspondência elástico-viscoelástico, a formulação do modelo S-VECD também parte da teoria do trabalho potencial e do princípio da superposição tempo-temperatura. Resumidamente, a teoria do trabalho potencial determina que quanto maior for o dano que um material sofre, maior será a redução de sua integridade. Essa relação é descrita pela denominada curva característica de dano, ou curva C vs S, onde C é a pseudo-rigidez ou integridade e S é o dano acumulado. Por fim, o princípio da superposição tempo-temperatura possibilita a previsão do comportamento do material em diferentes temperaturas, com base na frequência de carregamento. De forma simplificada, o comportamento do material em baixas frequências é relacionado a temperaturas elevadas, e altas frequências de carregamento à baixas temperaturas (FONSECA, 2016; BABADOPULOS *et al.*, 2016; KUTAY & LANOTTE, 2018; PIVETTA *et al.*, 2018).

O cálculo para a obtenção da pseudo-rigidez, $C(S)$, é realizado para cada ciclo de carregamento, e é expresso pela relação entre a tensão entre os picos para cada ciclo (τ_{pp}) e a pseudo-deformação do material naquele ciclo, (γ_{pp}^R). Esta relação é apresentada pela Equação 1. Nota-se também, na Equação 1, a presença de um fator de correção (*DMR*, do inglês *Dynamic Modulus Ratio*), que tem por objetivo diminuir as variações entre amostras. Este fator é obtido pela relação do módulo dinâmico obtido no ensaio de fadiga ($G^*_{Inicial}$) pelo módulo dinâmico obtido no ensaio de “*fingerprint*” ($G^*_{Fingerprint}$), como consta na Equação 2.

$$C(S) = \frac{\tau_{pp}}{\gamma_{pp}^R \times DMR} \quad (1)$$

$$DMR = \frac{|G^*|_{Inicial}}{|G^*|_{Fingerprint}} \quad (2)$$

Por sua vez, a pseudo-deformação (γ^R) trata da relação entre a tensão viscoelástica linear de um determinado ciclo (τ^R), pelo módulo de referência (G_R). Como o módulo dinâmico é dado pela Equação 3, a pseudo deformação entre picos pode ser calculada através da equação 4.

$$|G^*| = \frac{\tau^R}{\gamma^R} \quad (3)$$

$$\gamma_{pp}^R = \frac{1}{G_R} (\gamma_{pp} \times |G^*|_{fingerprint}) \quad (4)$$

O módulo dinâmico obtido na região viscoelástica linear ($G^*_{Fingerprint}$) pode ser calculado de duas formas. A primeira utiliza coeficientes da série de *Prony* com dados oriundos de ensaios experimentais assim como apresentado na Equação 5, onde G_∞ , G_m e ρ_m são parâmetros da série de *Prony*, n é o número de elementos da série e ω_R é a frequência angular reduzida, que é obtida pela relação entre a frequência angular (ω) e o fator de deslocamento tempo-temperatura (α_T), conforme Equação 6. A segunda maneira de se calcular esse módulo é através da realização de um ensaio de cisalhamento senoidal com deformação baixa o suficiente para garantir que a amostra não saia da região viscoelástica linear. O ensaio também deve ser realizado na temperatura e na frequência do ensaio de fadiga. Deste modo, pode-se aplicar a Equação 3 utilizando os valores de amplitudes de tensão e de deformação computadas pelo ensaio.

$$|G^*|_{Fingerprint} = \sqrt{\left[G_\infty + \sum_{m=1}^n \frac{G_m \omega_R^2 \rho_m^2}{\omega_R^2 \rho_m^2 + 1} \right]^2 + \left[\sum_{m=1}^{Nn} \frac{G_m \omega_R \rho_m}{\omega_R^2 \rho_m^2 + 1} \right]^2} \quad (5)$$

$$\omega_R = \omega \times \alpha_T \quad (6)$$

O cálculo do dano acumulado (S) até o ciclo N é dado pela somatória do dano gerado em cada ciclo de carregamento (i), assim como apresentado na Equação 7. Entre as variáveis presentes nesta equação, ainda não foram apresentadas o tempo de início do ciclo (t_i), o tempo final do ciclo (t_{i-1}) e o expoente alfa ou taxa de evolução de

dano (α) que pode ser obtido pela Equação 8, através da inclinação da curva mestre do módulo de relaxação do material (m_α).

$$S = \sum_{i=1}^N \left[\frac{DMR}{2} (\gamma_{pp}^R)^2 (C_{1-i}^* - C_i^*) \right]^{\frac{\alpha}{1+\alpha}} \times [t_i - t_{i-1}]^{\frac{1}{1+\alpha}} \quad (7)$$

$$\alpha = \frac{1}{m_\alpha} \quad (8)$$

Após a obtenção dos parâmetros C e S, obtém-se as curvas características de dano, C vs S. Essas curvas podem ser representadas através de uma função denominada “*Power Law*”, apresentada pela Equação 9, onde C_{11} e C_{12} são os coeficientes para melhor representação de determinada curva.

$$C(S) = 1 - C_{11}S^{C_{12}} \quad (9)$$

Uma das vantagens de se utilizar o modelo S-VECD para entender o comportamento do material à fadiga é que as curvas características de dano resultantes são inerentes ao material, ou seja, são independentes das condições de carregamento como a tensão ou deformação aplicada, da frequência de carregamento ou da temperatura de ensaio.

Os coeficientes C_{11} e C_{12} podem ser utilizados em modelos para a previsão da vida de fadiga. Kim e Little (2005) propuseram um modelo mecanicista adaptado do estudo de Lee *et al.* (2000). O modelo utiliza os mesmos conceitos da teoria VECD, portanto os mesmos resultados do ensaio de fadiga no DSR. O modelo de vida de fadiga é apresentado pela Equação 10.

$$N_f = A \times (\varepsilon^R)^{-B} \quad (10)$$

Onde, ε^R é a amplitude de deformação e A e B são parâmetros obtidos pelas Equações 11 e 12, respectivamente.

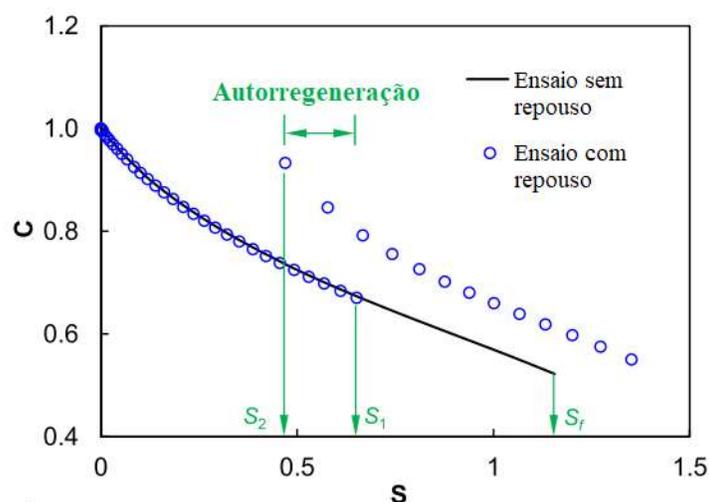
$$A = f \times \frac{\left(\frac{C_{11}C_{12}}{2}\right)^{-\alpha} S_f^{[1+\alpha(1-C_{12})]}}{[1 + \alpha(1 - C_{12})]} \quad (11)$$

$$B = 2\alpha \quad (12)$$

Onde, f é a frequência do ensaio de fadiga, C_{11} e C_{12} os coeficientes da função “*power law*” e S_f é o dano para o critério de ruptura por fadiga.

Para avaliar a capacidade de autorregeneração, se faz necessário interromper o ensaio de fadiga e aplicar um período sem carregamento sobre a amostra. Na Figura 10 é possível observar uma curva característica de dano com e sem aplicação de período de repouso. Ao se aplicar períodos de repouso, i.e., sem carga, é possível observar os efeitos da autorregeneração, pelas diferenças entre o dano gerado no material antes e depois do período de repouso (KARKI *et al.*, 2015; XIE *et al.*, 2017; BAGLIERI *et al.*, 2018; WANG *et al.*, 2018; WANG *et al.*, 2019; LI *et al.*, 2020). Essa diferença é determinante para quantificar a autorregeneração. Conforme observado na Figura 10, têm-se duas curvas C vs S, onde a linha preta contínua apresenta o ensaio sem repouso. Nela pode-se observar como a integridade (C) diminui com o acúmulo de dano, até a ruptura (S_f). Já a outra curva representada por círculos azuis demonstra os resultados do ensaio com um tempo de repouso aplicado após o material ter sofrido certa quantidade de dano (S_1). Observa-se que o material apresenta uma nova integridade e, conseqüentemente, o dano acumulado tende a diminuir, resultando em um novo valor de dano (S_2).

Figura 10 - Cálculo da porcentagem de autorregeneração



Fonte: Adaptado de Wang *et al.* (2019)

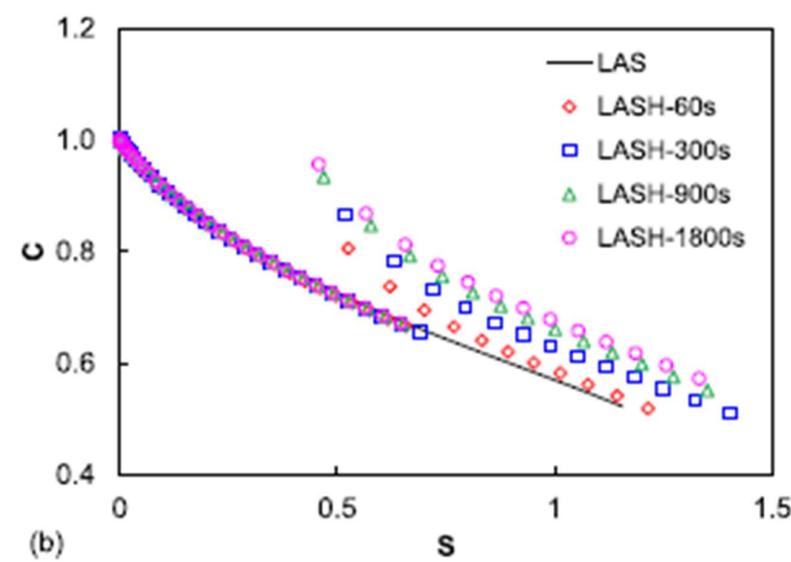
Estudos já demonstraram que as curvas características de dano com repouso podem ser utilizadas para gerar as curvas características de dano como se não houvesse tido nenhum repouso durante o ensaio, inclusive a metodologia para calcular a autorregeneração com o modelo S-VECD se utiliza desta ferramenta (KARKI *et al.*, 2015; LI *et al.*, 2020). A autorregeneração ($\%H$) é calculada pela Equação 13, onde

Si é o dano no momento em que o ensaio de fadiga foi interrompido e S'_f é o dano reduzido no primeiro momento em que o ensaio retorna.

$$\%H = \frac{S_i - S'_f}{S_i} \times 100 \quad (13)$$

Diversas pesquisas utilizam diferentes períodos de repouso afim de analisar qual a influência do tempo sobre a autorregeneração. Pesquisas já concluíram que quanto maior for o período de repouso, maior deve ser também a eficiência quanto a autorregeneração. Além disso, grande parte da recuperação da integridade do material se dá logo no início deste período (ASHOURI, 2014; KARKI *et al*, 2015; LV *et al.*, 2017; LI *et al.*, 2020; ASHOURI *et al.* 2021). A Figura 11 apresenta resultados de Wang *et al.* (2019), no trabalho, o mesmo ligante foi submetido a quatro períodos de repouso (60, 300, 900 e 1.800 segundos). Percebe-se que quanto maior foi o período de repouso, maior também foi a restituição da integridade do material, e mais dano o material suportou até a fadiga.

Figura 11 - Curvas C vs S típicas de ensaios sem e com diferentes períodos de repouso



Fonte: Wang *et al.* (2019)

O incremento repentino dos valores de rigidez do material, nos primeiros minutos de repouso, está relacionado à fenômenos reversíveis que são originados em ensaios que caracterizam o dano através da análise de variação da rigidez do material. Entre os fenômenos reversíveis estão o auto-aquecimento, a não linearidade e a tixotropia. Estes fenômenos são completamente reversíveis durante o repouso, diferente do

dano sofrido pelo material, que é classificado como irreversível (BABADOPULOS *et al.*, 2019). Cada um dos fenômenos reversíveis é definido nos tópicos a seguir:

- Auto-aquecimento: durante o carregamento, parte da energia mecânica é dissipada em forma de calor, que produz um aumento na temperatura do material asfáltico, devido a sua termo sensibilidade. Esse aumento de temperatura pode reduzir a rigidez do material. Porém, se o material resfriar até a temperatura inicial, a rigidez retorna ao valor original, confirmando a reversibilidade do fenômeno;
- Não linearidade: este fenômeno instantâneo, representa o comportamento da rigidez quando há alterações nas condições de carregamento, por exemplo: amplitudes em carregamentos senoidais. Ou seja, se ocorrem variações na amplitude de deformação, ocorrerão mudanças no comportamento da rigidez;
- Tixotropia: fenômeno característico de alguns fluidos, assim como os materiais asfálticos. Estes, quando submetidos à carregamentos contínuos, há uma queda na viscosidade do material. A viscosidade decai até que seja alcançada uma viscosidade de equilíbrio. Quando o carregamento é interrompido, a viscosidade é recuperada, resultando em ganho de rigidez, que pode ser confundida com a autorregeneração.

Para que toda a recuperação da rigidez não seja promovida por esses fenômenos acima citados, estudos recentes têm feito ressalvas quanto ao uso de períodos muito curtos de descanso. A difusão é um processo lento. Portanto, para que esta ocorra, são necessário períodos longos. Os estudos apontam que esses fenômenos podem ocasionar uma alteração momentânea na integridade do material (SUN *et al.*, 2018; BABADOPULOS *et al.*, 2019).

O Quadro 3 apresenta um compilado de parâmetros adotados em diversas pesquisas que desenvolveram ensaios de fadiga com utilização de períodos de repouso afim de analisar a autorregeneração. Entre os parâmetros listados estão: temperatura utilizada nos ensaios, frequência de carregamento, período de repouso, critérios para a aplicação do repouso e escalas de amostras estudadas.

Quadro 3 - Compilado de parâmetros utilizados em ensaios de fadiga

Referência	T (°C)	Frequência (Hz)	Tempo de Repouso, TR	Critério para aplicação do momento de repouso	Escala
DANIEL & KIM, 2001	20 e 60	2	240 e 360 (min)	Ao completar 3.000, 10.000 e 20.000 ciclos	MAC
PALVADI <i>et al.</i> , 2012	25	10	5, 10, 20 e 40 (min)	Integridade (C) atingir 80%, 70% e 60%	MAF
TAN <i>et al.</i> , 2012	25	10	1, 6, 12, 24 e 48 (horas)	Ao atingir 20%, 40% e 60% G* 0	Ligante
SHAN <i>et al.</i> , 2013	25	10	1, 6, 12, 24 e 48 (horas)	Ao atingir 20%, 40% e 60% G* 0	Ligante e Mastique
CANESTRARI <i>et al.</i> , 2015	19,5 a 29	10	30 (min)	Ao atingir 60% G* 0	Ligante
KARKI <i>et al.</i> , 2015	25	10 e 5	5, 10, 20, 40 (min)	Integridade (C) atingir 80%, 70% e 60%	MAF
MAZZONI <i>et al.</i> , 2016	19,5 a 29	10	30 (min)	Ao atingir 65% de G* 0	Ligante e Mastique
XIE <i>et al.</i> , 2017	20	10	1, 5, 10, 15, 30 (min)	Ao atingir 25% Sf, 50% Sf, 75% f e 125% Sf	Ligante
AYER <i>et al.</i> , 2018	20	5	1, 5, 10 (min)	Ao completar 100, 400 e 800 ciclos	Mistura completa
BAGLIERI <i>et al.</i> , 2018	20	10	360 (min)	Integridade (C) atingir 75%, 50% e 10%	Ligante
WANG <i>et al.</i> , 2018	20	10	1, 5, 15, 30 (min)	Ao atingir 25% Sf, 50% Sf, 75% Sf e 125% Sf	Ligante
WANG <i>et al.</i> , 2019	20	10	1, 5, 15, 30 (min)	Ao atingir 25% Sf, 50% Sf, 75% Sf e 125% Sf	Ligante
ASADI & TABATABAEE, 2020	25	10	1, 15, 30, 90 (min)	Ao atingir 20% Sf, 50% Sf, 100% Sf	Ligante
LI <i>et al.</i> , 2020	25	5	5, 10, 20, 40 (min)	Integridade (C) atingir 80%, 70% e 60%	MAF
MULLAPUDI <i>et al.</i> , 2020	25	10	1, 3, 6 (seg)	Ao completar 100 ciclos	Ligante
ASHOURI <i>et al.</i> , 2021	10, 20 e 30	10	10, 30, 90 e 270 (seg)	Toda vez que a integridade (C) cair 10%	Mistura completa
YUE, <i>et al.</i> , 2021	25	10	30 (min)	Ao atingir 50% de Sf	Ligante

Fonte: Autor

Entre as misturas apresentadas no Quadro 3, três foram avaliadas na escala da MAF, sendo que todas utilizaram o calcário como agregado, variando apenas o tipo de ligante na composição destas (PALVADI *et al.*, 2012; KARKI *et al.*, 2015; LI *et al.*, 2020). Desta forma, a influência do agregado não foi analisada nos artigos apresentados.

Em relação aos ligantes, foi verificado nas pesquisas apresentadas diferentes tipos de materiais, sendo ligantes convencionais, modificados com ligantes e ligantes naturais rochosos. A relação entre os ligantes convencionais e a autorregeneração está atrelada à viscosidade do ligante, a sua composição química e a presença de moléculas maiores que dificultam a mobilidade durante a difusão. Nos primeiros momentos de repouso ocorre o umedecimento das superfícies da trinca. Nesse processo as trincas podem ser entendidas como capilares, e a partir desse processo correrá a aproximação das superfícies. Esse processo é ditado pelas propriedades mecânicas do material e da energia livre de superfície, portanto essas propriedades podem ditar a velocidade do processo inicial de difusão, e conseqüentemente de autorregeneração (WOOL, 2008; LV et al. 2016; SUN et al. 2017)

Os ligantes asfálticos naturais rochosos apresentaram melhores resultados de autorregeneração se comparados aos ligantes convencionais. Acredita-se que isso se deve à mobilidade molecular destes ligantes ou à interação físico-química dos componentes destes materiais. Em ligantes modificados os estudos demonstraram diferentes conclusões quando ao benefício dos modificadores à autorregeneração, devido às proporções utilizadas, ao tipo de modificador, e as condições do ensaio (temperatura, tempo de repouso, momento de aplicação de repouso, umidade), que podem ou não ser propícias para o uso de determinado modificador (PALVADI *et al.*, 2012; XIE *et al.*, 2017; BAGLIERI *et al.*, 2018; WANG *et al.*, 2019; LI *et al.*, 2020; YUE *et al.*, 2021).

Os fatores que afetam a autorregeneração podem ser divididos entre internos e externos (AYAR *et al.*, 2016). As características do ligante, da mistura e a adição de modificadores compõem o grupo dos fatores internos, ou seja, características do material. Os fatores externos são relativos ao meio, tais como temperatura, condições de carregamento, período de repouso e umidade. Um resumo desses fatores é apresentado no Quadro 4. Percebe-se que a maior parte dos estudos abordaram a influência dos períodos de repouso, do carregamento e das características do ligante na autorregeneração.

Quadro 4 - Pesquisas que consideraram a autorregeneração e quais fatores foram estudados

Referências	Fatores internos			Fatores externos			
	Caract. do ligante	Caract. da mistura	Modificadores	Temperatura	Carregamento	Período de repouso	Umidade
DANIEL & KIM, 2001	X			X	X		
PAVALDI <i>et al.</i> , 2012	X				X	X	
TAN <i>et al.</i> , 2012					X	X	
SHAN <i>et al.</i> , 2013		X			X	X	
ASHOURI, 2014				X	X	X	
CANESTRARI <i>et al.</i> , 2015	X		X				
KARKI <i>et al.</i> , 2015					X	X	
HUANG <i>et al.</i> , 2016			X				
MAZZONI <i>et al.</i> , 2016	X	X					
ISAILOVIĆ <i>et al.</i> , 2017	X	X				X	
LV <i>et al.</i> , 2017	X		X	X		X	X
LV <i>et al.</i> , 2017	X		X				
XIE <i>et al.</i> , 2017	X		X		X	X	
AYER <i>et al.</i> , 2018					X	X	
BAGLIERI <i>et al.</i> , 2018	X		X		X		
PIVETTA <i>et al.</i> , 2018				X	X	X	
WANG <i>et al.</i> , 2018	X		X		X		
WANG <i>et al.</i> , 2019	X		X		X	X	
ZHANG <i>et al.</i> , 2019		X					X
ASADI & TABATABAEE, 2020	X		X		X	X	
LI <i>et al.</i> , 2020	X					X	
MULLAPUDI <i>et al.</i> , 2020	X					X	
ASHOURI <i>et al.</i> , 2021				X	X	X	
KAZEMI <i>et al.</i> , 2021			X	X		X	

Fonte: Autor

2.3.2 Fatores que Afetam a Autoregeneração

2.3.2.1 Fatores Internos

a) Características do ligante asfáltico

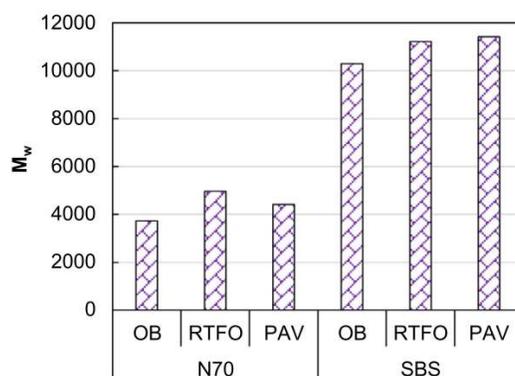
O ligante asfáltico e suas características são um dos fatores mais estudados até então, pois, a capacidade de autorregeneração da mistura asfáltica tem relação direta com as propriedades do mesmo. Como o ligante asfáltico é o material que confere às misturas asfálticas a capacidade de se autorregenerar, a maioria dos pesquisadores têm focado em avaliar a autorregeneração na escala do ligante asfáltico, assim como pode ser verificado na Quadro 4.

A partir dos relatos encontrados na literatura, já se sabe que a penetração e a viscosidade do ligante possuem relação com a capacidade de autorregeneração do mesmo. Resultados apontam que quanto maior for a penetração, menos viscoso é o ligante e maior será a sua capacidade de autorregeneração (SUN *et al.*, 2017; LV *et al.*, 2017; WANG *et al.*, 2018; WANG, *et al.*, 2019). Sabe-se que essas características estão diretamente relacionadas à composição química do ligante. Para obter a composição química do ligante, um dos métodos que pode ser utilizado é conhecido como SARA, este divide o ligante asfáltico entre seus constituintes (Saturados, Aromáticos, Resinas e Asfaltenos) (BERNUCCI *et al.*, 2008). Um maior teor de asfaltenos e saturados no ligante contribui para a autorregeneração.

O envelhecimento do ligante é outra característica estudada, de modo geral, alguns autores afirmam que este pode influenciar negativamente na capacidade de autorregeneração, aumentando a proporção de resinas e asfaltenos (que contém moléculas pesadas), dificultando a difusão do material e, conseqüentemente, impactando na capacidade de regeneração (LV *et al.*, 2017; WANG *et al.*, 2019). O envelhecimento do ligante promove menor resistência à fadiga, desta forma, o material possui menor capacidade de acúmulo de dano antes de sua fratura (BABADOPULOS *et al.*, 2016). Porém, alguns ligantes modificados com polímeros não apresentam sua capacidade de autorregeneração alterada com o envelhecimento, mesmo que sua resistência à fadiga tenha sido alterada. Os autores relatam interação positiva entre as cadeias poliméricas curtas do ligante envelhecido e as cadeias longas do polímero virgem (CANESTRARI *et al.*, 2015).

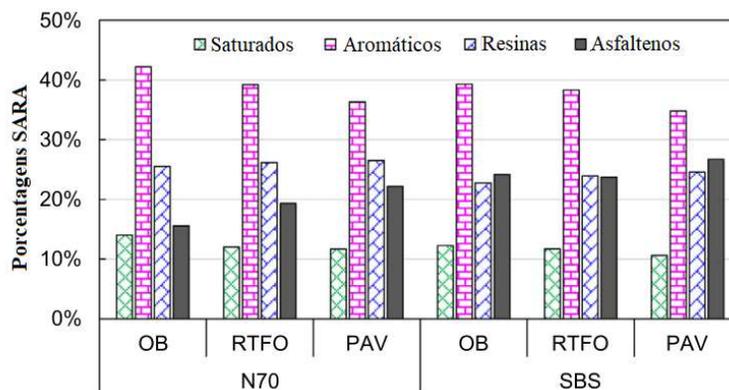
Para exemplificar como o envelhecimento do ligante afeta a autorregeneração, são apresentados resultados obtidos por Wang *et al.* (2019). A Figura 12 representa o peso molecular (M_w) de dois ligantes, um puro (N70) e outro modificado com polímero (SBS), após seu envelhecimento frente a diferentes métodos, sendo OB o ligante sem envelhecimento, RTFO, uma simulação de envelhecimento a curto prazo e PAV a longo prazo. Nota-se que o peso molecular (M_w) aumenta com o envelhecimento, por conta do surgimento de frações mais pesadas, como os asfaltenos. Esse crescimento do frações mais pesadas é apresentado na Figura 13, onde pode ser observado o teor de cada fração presente no ligante em cada idade.

Figura 12 - Peso molecular de diferentes ligantes, tipos e tempos de envelhecimento



Fonte: Wang *et al.* (2019)

Figura 13 - Resultados de fracionamento SARA

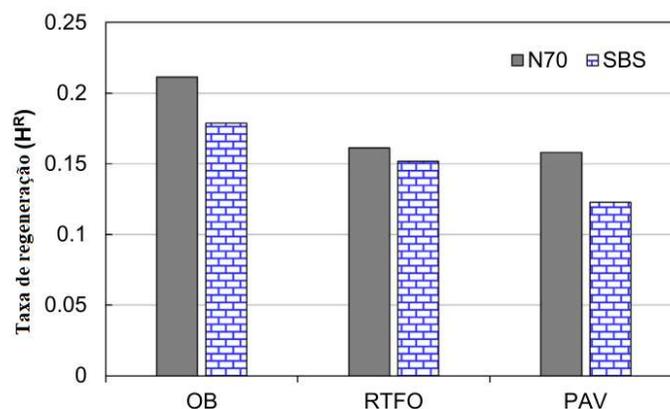


Fonte: Adaptado de Wang *et al.* (2019)

Os autores realizaram os ensaios de fadiga através da varredura de amplitude em DSR e da aplicação do modelo S-VECD, e então encontraram teores de autorregeneração com a relação do dano (S) antes e após o repouso. Com os teores

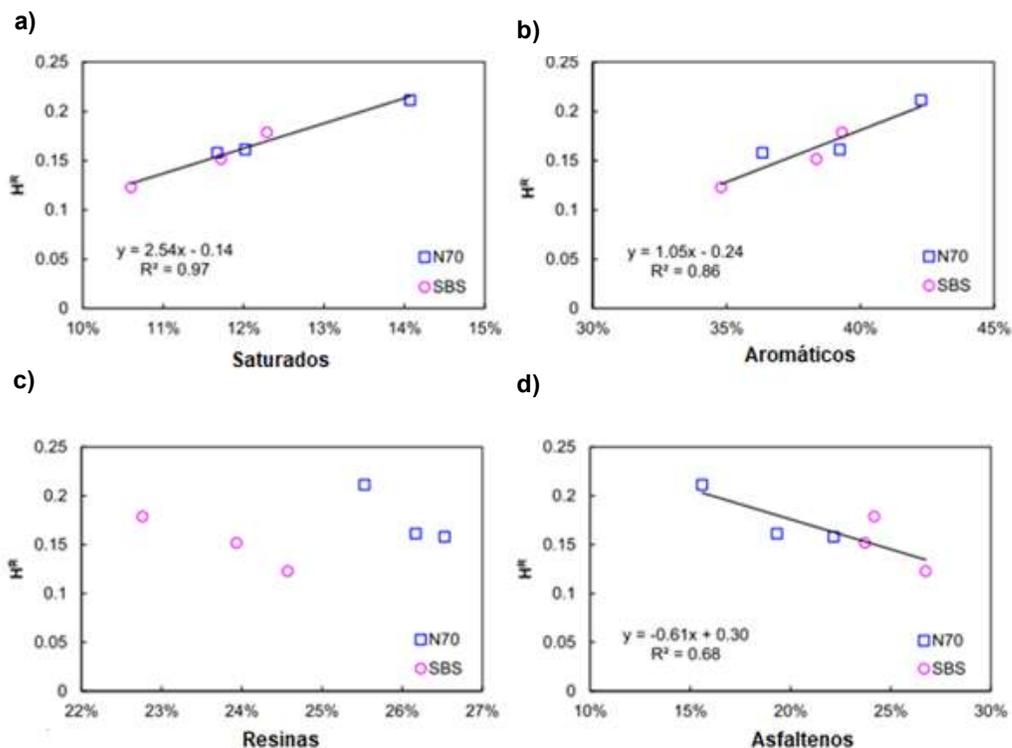
de autorregeneração em diferentes momentos e períodos de repouso, foi traçada uma curva mestre de autorregeneração, e a inclinação desta curva foi denominada taxa de regeneração (H^R). Esta taxa demonstra quão eficientes são os períodos de repouso. A Figura 14 apresenta os resultados de taxa de regeneração (H^R), para os dois ligantes asfálticos nos diferentes tempos de envelhecimento. A capacidade de regeneração decaiu com o envelhecimento do material. A Figura 15 apresenta o comportamento da autorregeneração (H^R) atrelado às frações de cada composto químico presente em cada um dos ligantes. Como o envelhecimento tende a ampliar a quantidade de autorregeneração e resinas, e conseqüentemente, aumentar sua viscosidade, a autorregeneração tende a diminuir, desta forma, a tendência da relação entre autorregeneração e asfaltemos e resinas é negativa, enquanto para aromáticos e saturados positiva

Figura 14 – Taxa de regeneração (H^R) em diferentes condições de envelhecimento



Fonte: Adaptado de Wang et al. (2019)

Figura 15 - Relações entre a taxa de regeneração (H^R) e as frações de: (a) saturados, (b) aromáticos, (c) resinas e (d) asfaltenos.



Fonte: Adaptado de Wang *et al.* (2019)

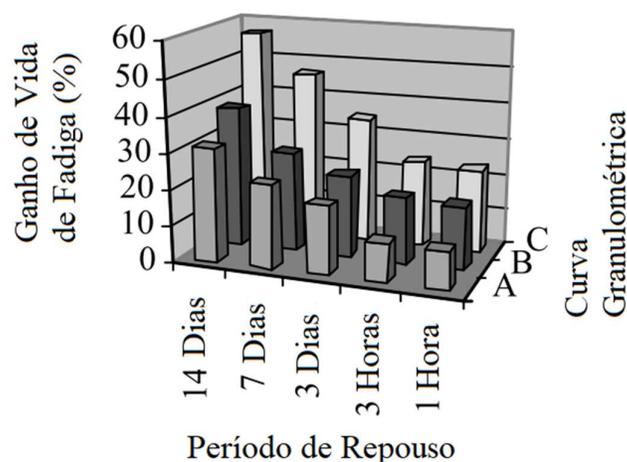
b) Características da mistura asfáltica

Como já mencionado, a maior parte dos estudos de autorregeneração em materiais asfálticos são feitos na escala do ligante asfáltico. É evidente que quanto maior for o teor de ligante na mistura asfáltica, maior deve ser a capacidade desta de autorregeneração, o que mostra a influência do ligante de uma forma geral. Porém, sabe-se que outros constituintes da mistura asfáltica também impactam nessa propriedade.

Alguns autores relatam que as propriedades físicas do material granular também influenciam na capacidade de autorregeneração, tanto no que diz respeito a distribuição granulométrica das partículas dos agregados, quanto com relação à sua área de superfície específica. Abo-Qudais e Suleiman (2005), por exemplo, concluíram que grãos maiores, geram menos zonas de interface entre agregado e ligante asfáltico, portanto, o ligante tem maior liberdade para movimentação. Desta forma, a capacidade de autorregeneração é ampliada. Isso pode ser verificado na

Figura 16, que apresenta o resultado do ganho de vida de fadiga para três misturas asfálticas compostas com o mesmo agregado, porém com diferentes granulometrias. O agregado A é mais fino e o agregado C é mais graúdo. Nota-se que, quando aplicado o repouso, a mistura com maior concentração de agregados graúdos (C), foi a que apresentou o maior ganho de vida de fadiga.

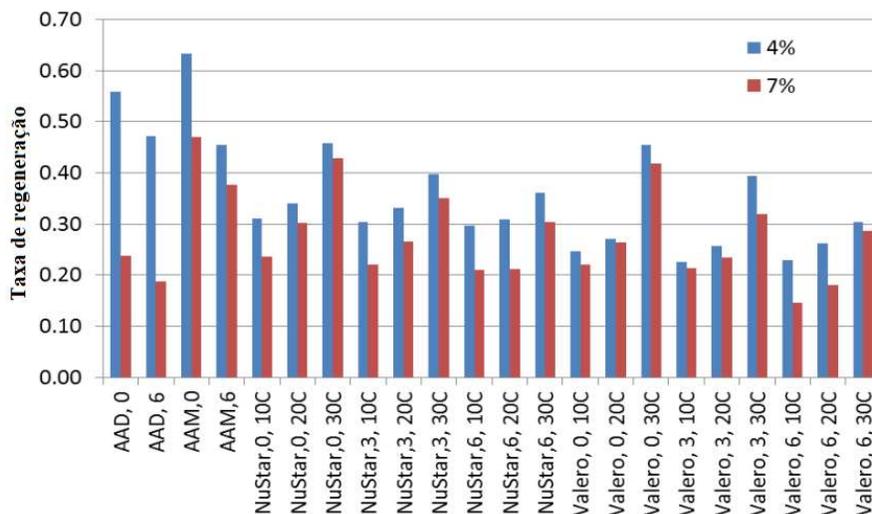
Figura 16 - Efeito da granulometria do agregado e da duração do tempo de repouso à 60°C no prolongamento da vida de fadiga de misturas asfálticas



Fonte: Adaptado de Abo-Qudais & Suleiman (2005)

O volume de vazios da mistura asfáltica também influencia a capacidade de autorregeneração das misturas. Foi concluído que a capacidade de autorregeneração é melhorada quando a mistura asfáltica possui menor volume de vazios, pois vazios preenchidos por ar, são zonas nas quais a autorregeneração não ocorre (QIU, 2012; GANJEI & AFLAKI, 2016). A fim de evidenciar essa relação, a Figura 17 apresenta resultados de autorregeneração obtidos por Luo (2012). Foi investigada a autorregeneração de misturas asfálticas diferenciadas de acordo com o ligante (AAD, AAM, NuStar e Valero), temperatura (10°C, 20°C e 30°C) e tempo de envelhecimento (0, 3 e 6 meses). Para cada mistura, o autor trabalhou com dois volumes de vazios 4 e 7%. Nota-se que, em todos os casos, a regeneração das misturas foi superior quando havia um menor número de vazios, vale destacar que neste estudo

Figura 17 - Autorregeneração de diferentes misturas asfálticas contendo diferentes volumes de vazios, para diferentes temperaturas



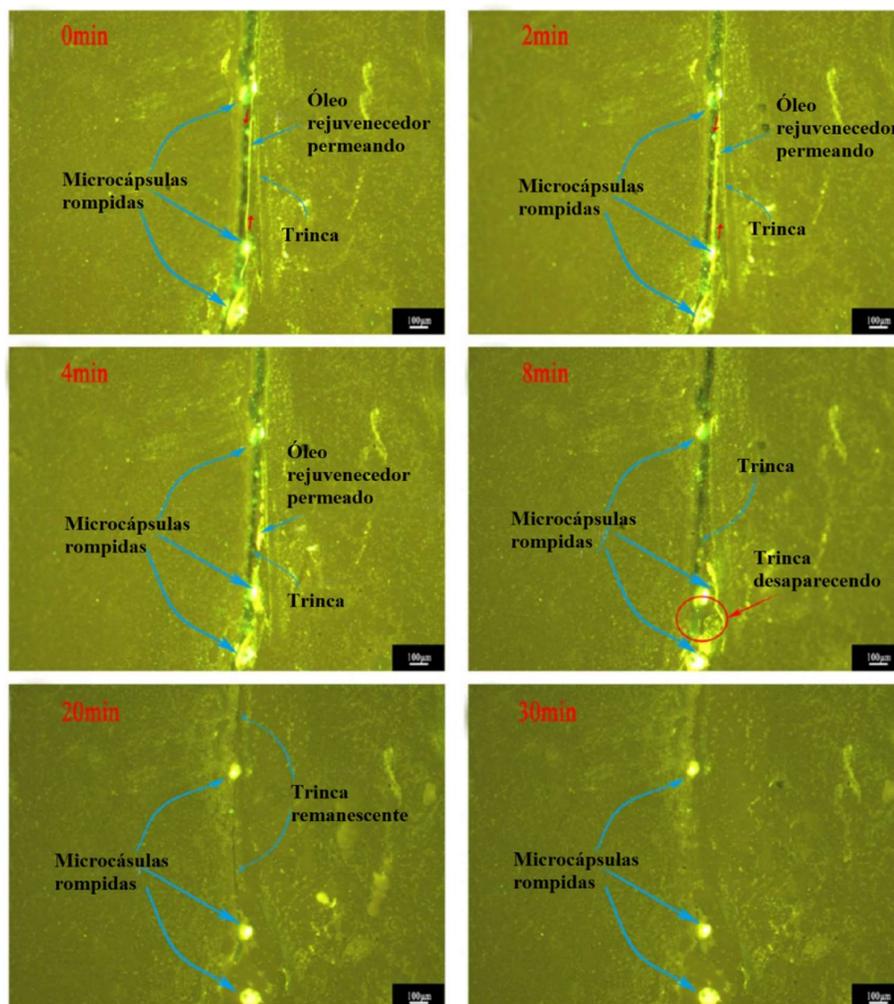
Fonte: Adaptado de Luo (2012)

c) Efeito de modificadores

Como a capacidade de autorregeneração é favorável para a extensão da vida útil de pavimentos, diversos estudos buscam ampliar essa capacidade através do uso de modificadores. Dentre os modificadores, um dos mais estudados é o polímero estireno-butadieno-estireno (SBS). Segundo estudos, a princípio, a adição de SBS nos ligantes contribui negativamente para a autorregeneração das microfissuras. Porém, com altos níveis de dano, podendo estas ser até mesmo macrotrincas, quando as superfícies estão próximas o ligante modificado com SBS tem uma melhor capacidade de restaurar sua rigidez (XIE *et al.*, 2017; LV *et al.* 2017; WANG *et al.*, 2018; WANG *et al.*, 2019; ASADI e TABATABAEE, 2020).

Outro modificador estudado é o uso de microcápsulas de óleos rejuvenescedores, que auxiliam na etapa de umidificação da autorregeneração. Essas cápsulas se rompem quando o material trinca, liberando o óleo na abertura. Na Figura 18, obtida através do uso de microscópio de fluorescência, é possível observar como as microcápsulas agem ao longo do tempo quando rompidas, após ser gerada uma trinca em um ligante asfáltico (SUN *et al.*, 2017). No caso, as microcápsulas, quando rompidas, liberam um óleo rejuvenescedor que permeia na trinca, e auxilia na difusão do ligante.

Figura 18 - Processo de autorregeneração do ligante asfáltico com adição de microcápsulas



Fonte: Adaptado de SUN *et al.* (2017)

2.3.2.2 Fatores externos

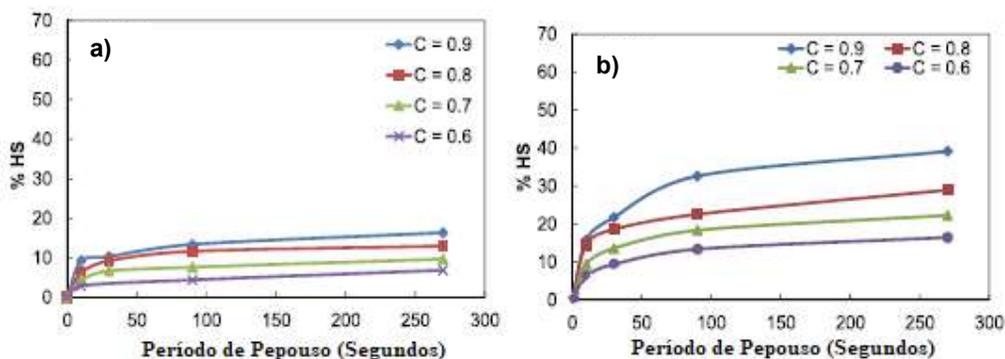
a) Temperatura

A temperatura é um parâmetro que tem forte influência sobre a capacidade de autorregeneração de materiais betuminosos. Sabe-se que quanto mais elevada for a temperatura, maior será a capacidade de autorregeneração do material (GARCÍA, 2011; SHEN & LU, 2014; LV *et al.* 2017; SUN *et al.*, 2018; ASHOURI *et al.*, 2021).

Ashouri *et al.* (2021) verificaram o comportamento de uma mistura asfáltica em diferentes temperaturas com o auxílio do DSR e aplicação do modelo VECD. A Figura

19 apresenta alguns resultados obtidos. A autorregeneração foi calculada com a aplicação de períodos de repouso após o módulo dinâmico atingir valores de 90%, 80% 70% e 60% de seu valor inicial, i.e., integridade (C) igual à 0,9; 0,8; 0,7 e 0,6. O aumento da temperatura de 10°C (a) para 20°C (b) contribuiu para aumentar os valores de autorregeneração (%HS) em todos os casos.

Figura 19 - Porcentagem de autorregeneração de acordo com o nível de dano e período de repouso para (a) 10°C e (b) 20°C



Fonte: Adaptado de ASHOURI *et al.* (2021)

b) Integridade no momento do repouso

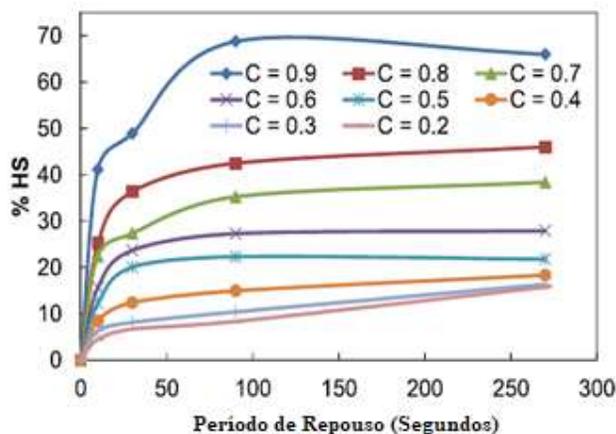
A amplitude de carregamento é um fator importante para a avaliação da autorregeneração, sendo que amplitudes mais altas podem diminuir essa capacidade, assim como o tempo sob o qual o material foi submetido aos esforços, pois, altas amplitudes de carregamento tendem a gerar rapidamente microtrincas ou macrotrincas, com difícil controle sobre a integridade.

Portanto, o momento de aplicação do repouso é um fator determinante para adquirir valores elevados de autorregeneração. Como visto, podem ser adotados diferentes critérios: números de ciclos, nível de dano ou o valor da integridade. Porém, quanto mais íntegro o material estiver durante o repouso maior será a recuperação de sua rigidez.

Para representar esse fenômeno, na Figura 20 são apresentadas diversas curvas com os níveis de autorregeneração (%HS) encontrados em função do período de repouso. Todas as curvas são referentes ao mesmo ligante. A única diferença entre elas é o nível de dano no qual o repouso foi aplicado. Pelos resultados, é possível

perceber como a capacidade de autorregeneração é diminuída se o repouso for aplicado em amostras com menor integridade (menores valores de C). Para os valores de C iguais a 0,2 e 0,3, i.e. o material muito danificado, os valores de autorregeneração são os mais baixos e quase iguais.

Figura 20 - Autorregeneração quando aplicados diferentes períodos de repouso para diferentes níveis de dano



Fonte: Adaptado de ASHOURI *et al.* (2021)

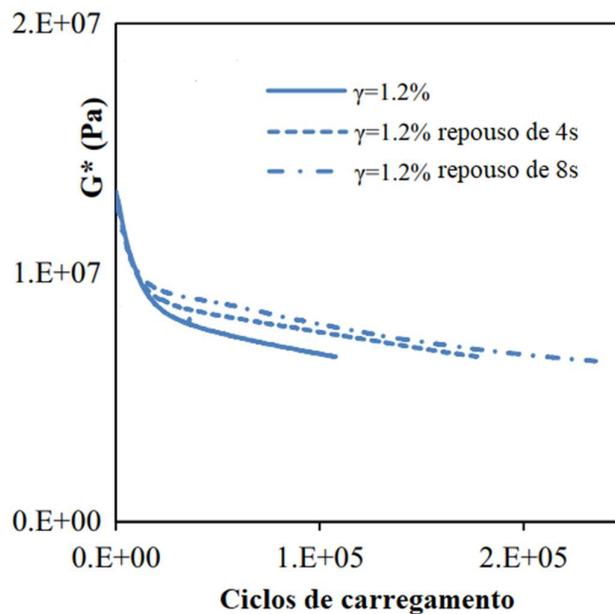
c) Períodos de Repouso

Os períodos de repouso são amplamente estudados na avaliação da autorregeneração. É certo que tempos de repouso mais longos promovem um efeito positivo, ampliando essa capacidade. Alguns autores utilizam períodos de repouso curtos, durante segundos, para simular condições de tráfego intenso (CASTRO & SÁNCHEZ, 2006; MICAELo *et al.*, 2015; MULLAPUDI *et al.*, 2020), porém deve-se atentar que para períodos de repouso curtos existe elevada interferência de fenômenos reversíveis (BABADOPULOS *et al.*, 2019; OLIVEIRA; 2019).

Micaelo *et al.* (2015) analisaram a capacidade de autorregeneração para amostras de ligante submetidas a curtos períodos de repouso. O estudo definiu como autorregeneração a recuperação do módulo complexo, após ensaios de fadiga. Alguns resultados estão presentes na Figura 21. As três linhas azuis representam amostras do mesmo material, que no caso foi um ligante modificado denominado PMB 45/80–65, sob as mesmas condições de carregamento, alterando apenas o

período de repouso aplicados a elas. É notório que o módulo complexo da amostra sem repouso (linha azul contínua) decai com menos ciclos de carregamento, em comparação as amostras em mesmas condições e inserção de períodos de repouso. Vale destacar também que, a tendência de queda do módulo é menor quando o tempo de repouso é de 8 segundos (traço ponto em azul), quando comparada a 4 segundos (linha azul tracejada).

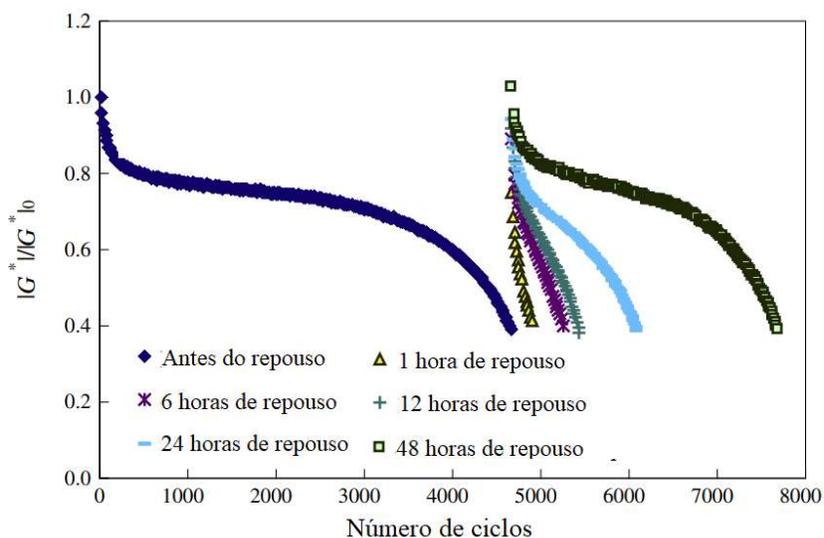
Figura 21 - Evolução do módulo complexo (G^*) durante teste de varredura de tempo



Fonte: Adaptado de MICAELO *et al.* (2015)

Em períodos de repouso mais longos a tendência continua sendo a mesma, i.e., quanto maior o período de repouso, em geral, maiores são os valores de autorregeneração das amostras de ligante. Essa conclusão foi obtida por TAN *et al.* (2012) e outros. A Figura 22 apresenta resultados que demonstram como o módulo dinâmico de um ligante asfáltico PG70-22 se recupera após um longo período de repouso, este último sendo aplicado quando o módulo chega a 40% de seu valor inicial. Percebe-se que períodos de repouso mais longos garantiram uma maior vida de fadiga ao material, visto que houve um acréscimo considerável no número de ciclos.

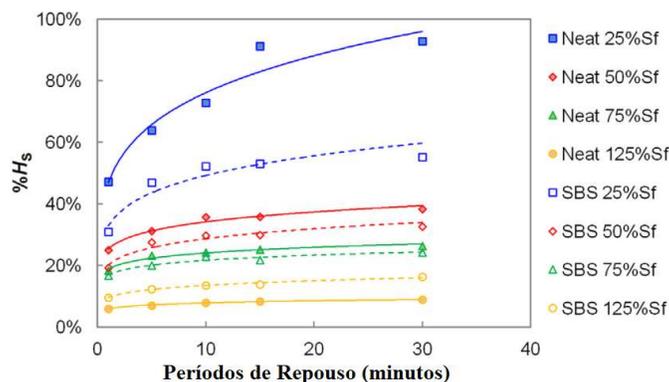
Figura 22 - Variação da integridade de um ligante asfáltico em relação ao número de ciclos, com diferentes períodos de repouso aplicados.



Fonte: Adaptado de TAN *et al.* (2012)

XIE *et al.* (2017) realizaram ensaios de fadiga e analisam as curvas CxS, obtendo a autorregeneração (%HS) com a relação ao dano antes e após os períodos de repouso. Os ensaios foram realizados em dois ligantes, um puro (*Neat*) e outro modificado (SBS), e interrompidos (início do repouso) em diferentes momentos, i.e., 25%, 50% 75% e 125% do valor de dano na ruptura (Sf). Sendo o último, utilizado para identificar a autorregeneração após a ruptura. Os citados autores relacionaram a autorregeneração dessas amostras com o tempo de repouso aplicado. Foram aplicados períodos de 1, 5, 10, 15 e 30 minutos. Pela Figura 23, é possível identificar como o aumento do período de repouso pode contribuir para a autorregeneração, principalmente em determinadas situações de dano e para diferentes materiais.

Figura 23 - Autorregeneração de ligantes em função do período de repouso e níveis de dano

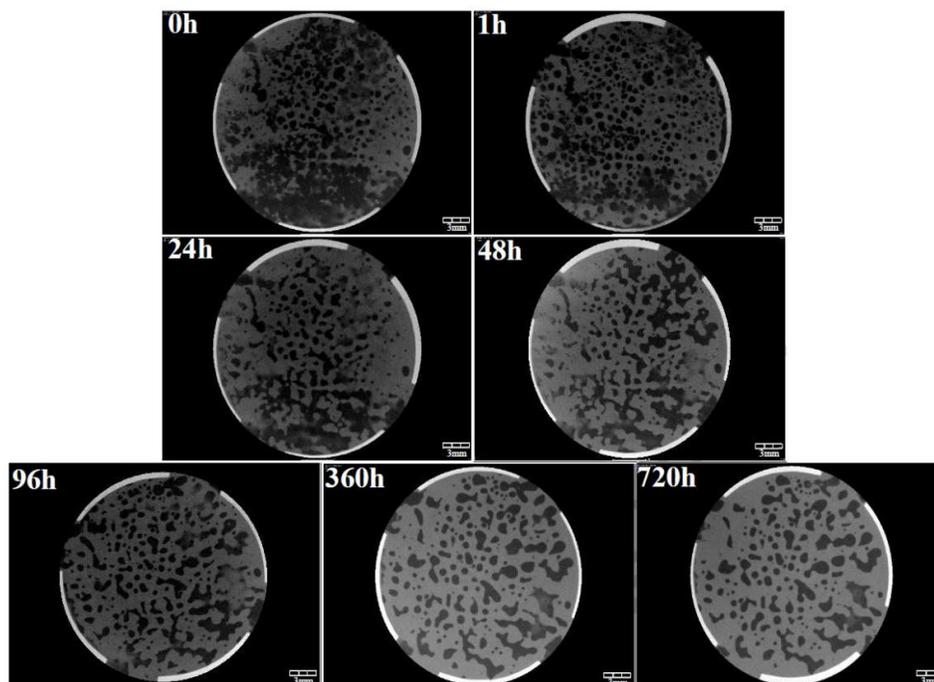


Fonte: Adaptado de XIE *et al.* (2017)

d) Umidade

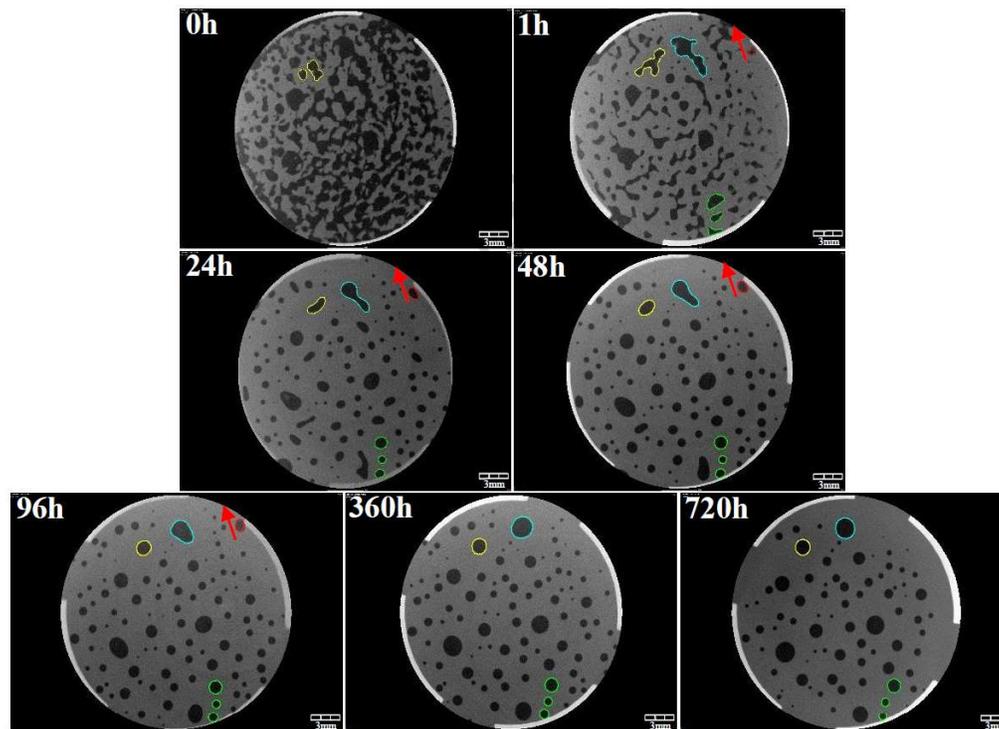
A umidade também pode influenciar na capacidade de autorregeneração. Estudos já verificaram que a curto prazo, a água diminui essa capacidade (LV *et al.*, 2017; MANNAN *et al.*, 2017). A influência da presença de água durante a autorregeneração é exemplificada pelas Figuras 24 e 25. As imagens obtidas através de tomografia computadorizada são de amostras utilizadas em ensaios BBS. Após a retirada do pino no ensaio, a superfície do ligante foi observada. Na Figura 24, o ligante estava em banho-maria, já na Figura 25 o ligante ficou em condição seca, ambas a 25°C. Por comparação das imagens no menor período (1 hora), percebe-se que a regeneração do material em condição seca se deu de forma mais rápida. Mesmo para longos períodos (720 horas), o material em condição úmida não alcançou o mesmo nível de regeneração que a amostra em local seco.

Figura 24 - Imagem de tomografia computadorizada de regeneração de um ligante PG 64-22 a 25°C e em banho-maria



Fonte: LV *et al.* (2017)

Figura 25 - Imagem de tomografia computadorizada de regeneração de um ligante PG 64-22 a 25°C e em condição seca

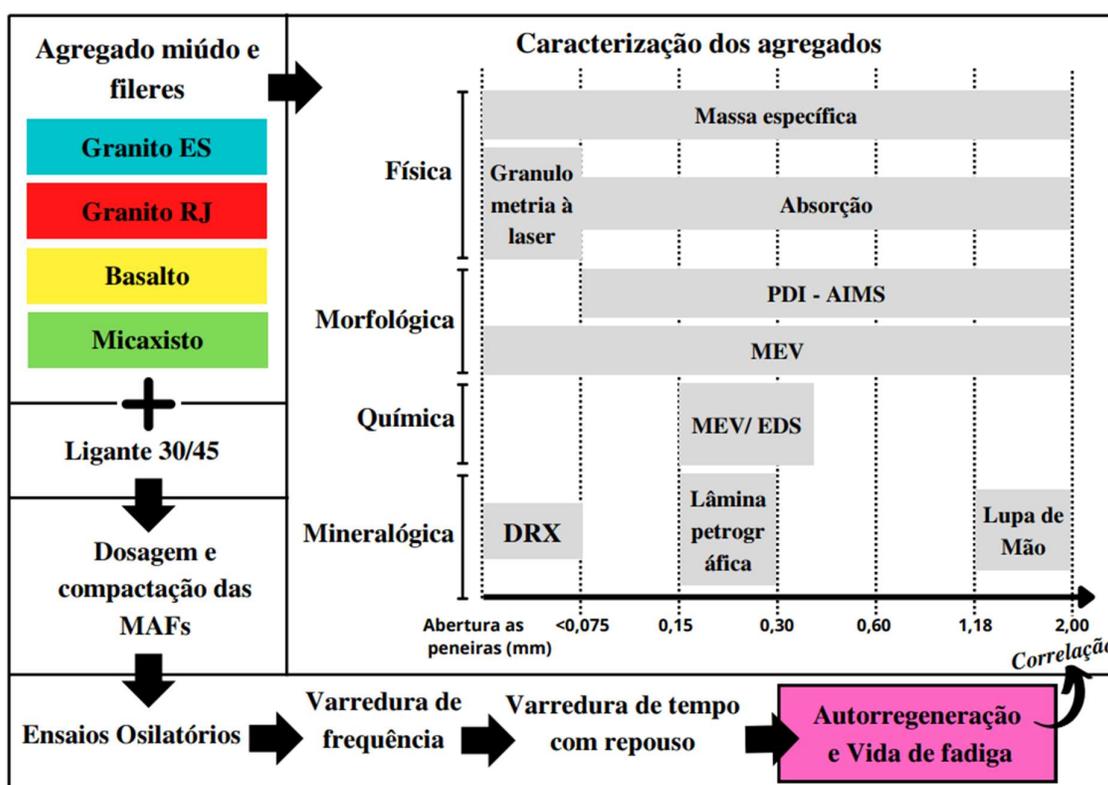


Fonte: adaptado de LV *et al.* (2017)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais (ligante e agregados) selecionados para este estudo, os ensaios realizados para caracterização dos agregados, os procedimentos adotados para a dosagem e compactação das MAFs e os ensaios reológicos empregados a fim de quantificar o dano por fadiga e as características de autorregeneração das MAFs estudadas. Na Figura 26 é apresentado um fluxograma referente à metodologia desenvolvida pelo presente trabalho.

Figura 26 – Programa Experimental



Fonte: Autor.

Com o objetivo de avaliar a influência do agregado na resistência à fadiga e autorregeneração, quatro agregados de diferentes composições mineralógicas foram selecionados. O tipo de ligante foi mantido nas quatro composições de MAFs estudadas uma vez que o objetivo central era avaliar o efeito do agregado nas respostas das misturas.

3.1 Ligante Asfáltico

O ligante asfáltico utilizado neste estudo é classificado por penetração como CAP 30/45, proveniente da Refinaria Duque de Caxias (REDUC), localizada no estado do Rio de Janeiro e foi fornecido por uma empresa local. A amostra de ligante foi coletada em uma única batelada para evitar possíveis diferenças na composição do material. No Quadro 5 são apresentados os resultados de caracterização e especificações contidos no laudo técnico fornecido pela refinaria.

Quadro 5 – Características da amostra de CAP 30/45 empregado neste estudo

Característica	Método	Especificação	Resultado	Unidade
Penetração	ASTM D5	30 – 45	35	0,1 mm
Ponto de Amolecimento	ASTM D 36	52 min	52	°C
Viscosidade Brookfield 135GC SP21 20RPM	ASTM D 4402	192 min	508	Cp
Viscosidade Brookfield 150GC SP21	ASTM D 4402	90 min	246	Cp
Viscosidade Brookfield 177GC SP21	ASTM D 4402	40 a 150	88	Cp
Ductilidade 25GC	ASTM D 113	60 min	66	Cm
Solubilidade no Tricloroetileno	ASTM D 2042	99,5 min	1000	% massa
Ponto de Fulgor	ASTM D 92	235 min	>360	°C
Índice de suscetibilidade térmica	ASTM X 018	-1,5 a +0,7	-1,5	N/A
Densidade relativa a 20/4 GC	ASTM D70	--	1,054	N/A
Aquecimento a 177GC	ASTM X 215	Não espuma	Não espuma	N/A

Fonte: Adaptado do laudo técnico fornecido pela empresa.

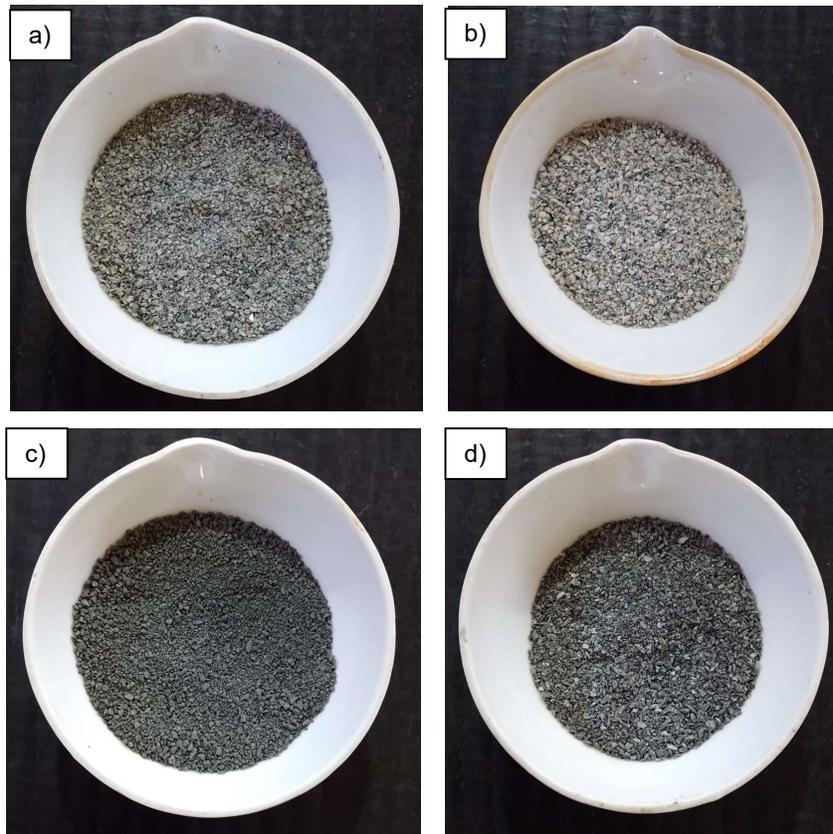
3.2 Agregados

O presente estudo avaliou quatro agregados britados com composições mineralógicas distintas a fim de representar os agregados disponíveis nas diferentes regiões do Brasil e utilizados em serviços de pavimentação. Dessa forma, buscou-se trabalhar com granitos, basaltos e micaxistos. Estes agregados foram coletados e identificados neste estudo da seguinte forma:

- G ES – Agregado de origem granítica, comercial, fornecido por pedreira localizada no estado do Espírito Santo, e comumente empregado em obras de pavimentação do ES;
- G RJ – Agregado de origem granítica, comercial, fornecido por uma pedreira localizada no estado do Rio de Janeiro. Este material foi selecionado para verificar a heterogeneidade dos minerais que pode ser encontrada em agregados provenientes de rochas com mesma nomenclatura, porém, de locais distintos, o que pode levar a comportamentos diferentes;
- BA – Agregado de origem basáltica, não comercial. A escolha do basalto foi proposital uma vez que este material é bastante empregado na região Sul do Brasil, além de ser uma rocha máfica, pobre em sílica, se diferenciando dos demais agregados utilizados neste estudo. Foi oriundo de um dique de Basalto em uma pedreira do estado do Espírito Santo, onde fragmentos maiores foram coletados e britados em laboratório por impacto;
- MX – Agregado de origem micaxística, comercial. Este material foi cedido pelo Laboratório de Asfalto (LabASFALTO) da UFG, coletado previamente em uma pedreira localizado no estado de Goiás, sendo um tipo de agregado empregado em obras de pavimentação da região centro-oeste. Por ser uma rocha metamórfica, o agregado de micaxisto se diferencia dos demais quanto à sua origem.

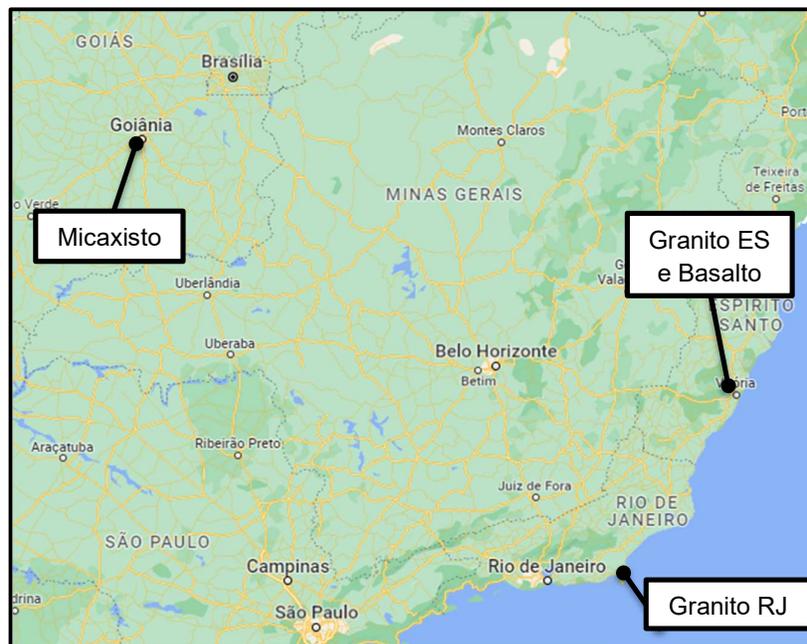
Imagens dos quatro agregados utilizados na presente pesquisa são apresentados na Figura 27, e as localizações das pedreiras que forneceram os agregados constam na Figura 28.

Figura 27 – Agregados: a) G ES; b) G RJ; c) BA; d) MX



Fonte: Autor

Figura 28 – Localização das pedreiras



Fonte: Autor

Após a coleta, as amostras de agregados foram quarteadas, secas em estufa à 105°C, peneiradas nas frações de interesse e armazenadas em sacos plásticos para uso posterior. Para a caracterização inicial, as amostras foram submetidas a quatro grupos de ensaios de caracterização: i) física; ii) morfológica; iii) química e iv) mineralógica. No Quadro 6 são mostrados os grupos, os ensaios realizados, os métodos empregados e o local de realização dos mesmos. É importante destacar que para a confecção das amostras de MAFs foram utilizados agregados miúdos e fíleres, ou seja, o tamanho nominal máximo dos grãos foi de 2,00 mm. Portanto, toda a caracterização foi realizada com amostras de partículas passando na peneira de #10 (abertura de 2,00 mm).

Quadro 6 - Ensaios de caracterização dos agregados

GRUPO	Característica	Método	Laboratório
Ensaio de caracterização física	Massa específica real e absorção do agregado miúdo	DNIT 411/2019 – ME	LabGEO – UFES
	Massa específica dos fíleres	ABNT NBR 16605:2017	LEMAC – UFES
	Granulometria a laser dos fíleres	-	Laboratório de Sedimentologia – UFES
Ensaio de caracterização morfológica	Morfologia por Processamento Digital de Imagem (PDI)	DNIT 432/2020 - ME	LME – UFC
	Morfologia por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	-	LabMic – UFG*
Ensaio de caracterização química	Composição química através da MEV acoplada à Espectroscopia por Energia Dispersiva (do inglês, “ <i>Energy-dispersive X-ray spectroscopy</i> ” - EDS)	-	LME – UFC*
Ensaio de caracterização mineralógica	Análise mineralógica com lupa de mão	-	LabGEO – UFES
	Mineralogia através de análise microscópica com lâminas delgadas	-	LME – UFC*
	Mineralogia através de DRX	-	LNF – UFES

*Ensaio realizado por técnicos e/ou alunos de pós-graduação destas instituições. Os demais ensaios foram realizados pelo autor desta dissertação.

Fonte: Autor.

3.2.1 Ensaios de caracterização física

Inicialmente, foram realizados ensaios triviais de caracterização física, pois, estas propriedades influenciam na distribuição volumétrica das partículas nas MAFs. Dessa forma, foram realizados ensaios de massa específica e absorção do agregado miúdo pelo procedimento descrito pela Norma DNIT 411/2019 – ME. Já nos fileres foi realizado o procedimento da Norma ABNT NBR 16605:2017 para identificar sua massa específica e também foi realizada a granulometria a laser, para identificar a distribuição dos tamanhos das partículas abaixo da peneira de nº. 200.

3.2.1.1 Massa específica real e absorção do agregado miúdo

Os procedimentos descritos na norma DNIT 411/2019 determinam que o material pulverulento não seja utilizado no ensaio, portanto, para sua realização o material foi peneirado e as frações menores que 0,075mm (#200) não foram utilizadas. Foram realizadas três determinações e utilizado o valor médio entre elas, sendo que o desvio padrão entre as três amostras devia ser inferior a 0,011 e 0,11 para a massa específica real e absorção respectivamente.

3.2.1.2 Massa específica dos fileres

A determinação da massa específica das frações menores que 0,075mm foi realizada através dos procedimentos descritos pela norma ABNT NBR 16605:2017 – Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Foram realizadas três determinações para cada um dos agregados e utilizado o valor médio.

3.2.1.3 Granulometria dos fileres

Para o ensaio de granulometria a laser, o material fino, já sem presença de material orgânico, foi separado por via úmida com uso de duas peneiras de 0,63 μm (#230) sobrepostas, o material retido em ambas peneiras é descartado, o material passante é armazenado para decantar e posterior remoção do excesso de água. Após a remoção da água, uma amostra de cerca de 3 g foi utilizada no analisador de

partículas a laser (Malvern - Mastersizer 2000) para determinação da curva granulométrica.

3.2.2 Ensaios de caracterização morfológica

3.2.2.1 Morfologia por Processamento Digital de Imagem (PDI)

A morfologia do agregado miúdo foi avaliada utilizando o PDI com o uso do equipamento *Aggregate Image Measurement System (AIMS)*. O ensaio seguiu o procedimento descrito na norma brasileira DNIT 432/2020 – ME.

O AIMS funciona a partir da aquisição e análise de imagens das frações separadas, calculando angularidade, esfericidade e textura superficial para frações graúdas, que são maiores que 4,75mm (#4), e angularidade e forma 2D de agregados miúdos, aqueles com tamanho nominal menores de 4,75mm e acima de 0,075mm (#200).

Para a realização da aquisição das imagens, a fração a ser analisada é depositada sobre uma bandeja, que pode ser translúcida ou preta dependendo da cor do agregado a ser analisado, a fim de gerar contraste. Uma câmera capta as imagens em um ponto fixo, e o prato gira conforme o mecanismo realiza a captura das imagens que são tratadas com o uso de um software. A Figura 29 representa o equipamento utilizado durante o ensaio de caracterização morfológica. Nesta é possível observar a bandeja utilizada, o agregado sobre ele, o foco de luz e a câmera que realiza a captura das imagens.

Figura 29 - Equipamento AIMS do Laboratório de Microscopia Eletrônica da UFC

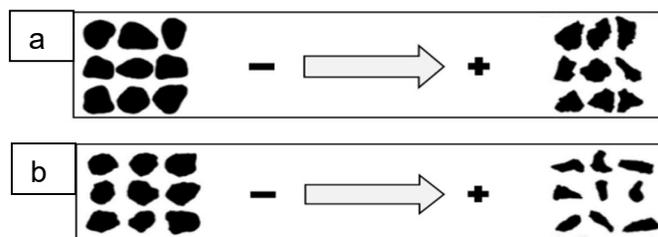


Fonte: Autor

As propriedades de forma 2D e angularidade são avaliadas a partir das imagens em preto e branco pelo contorno dos agregados. Já para as análises dos agregados graúdos também são utilizadas imagens em escala de cinza para avaliar a sua textura superficial.

Como neste estudo foram avaliados apenas os agregados miúdos, serão apresentados nos resultados os valores de angularidade e forma 2D das partículas. A angularidade é determinada pelos ângulos das arestas nas imagens 2D de cada partícula, ou seja, avaliada a partir do contorno das mesmas. O valor deste parâmetro varia de 0 a 10.000, e quanto mais alto for o mesmo, mais angular é a partícula. Porém, quanto mais próximo de 0 este for, mais arredondada é a mesma. Já o parâmetro forma 2D avalia a forma como um todo, definindo se o agregado é alongado ou circular. Os valores variam de 0 a 20, sendo que zero seria um círculo perfeito e 20 o valor para partículas mais alongadas. A Figura 30 ilustra a diferença entre as imagens de partículas com baixos e altos valores de angularidade (a) e forma 2D (b).

Figura 30 - Variação de: (a) angularidade e (b) forma 2D a partir de imagens geradas pelo AIMS



Fonte: Moura (2020)

Cada fração tem uma quantidade mínima de partículas a ser analisada, definida pela NORMA DNIT 432/2020 - ME. Este estudo avaliou forma e angularidade das frações retidas nas peneiras com aberturas iguais a 1,18mm (#16); 0,60mm (#30); 0,30mm (#50); 0,15mm (#100); 0,075mm (#200).

O sistema de classificação dos resultados utilizado foi o desenvolvido por Ibiapina (2018). Este teve como base um banco de dados composto por agregados brasileiros.

O Quadro 7 apresenta os valores limites de angularidade e forma 2D para cada classificação.

Quadro 7 - Classificação morfológica proposta por Ibiapina (2018)

Propriedades	Valores limites			
Angularidade	<1.260	1.260 – 4.080	4.080 – 7.180	>7.180
	Arredondado	Subarredondado	Subangular	Angular
Forma 2D	<4,0	4,0 - 11,0	11,0 - 15,5	>15,5
	Circular	Semicircular	Semialongado	Alongado

Fonte: Ibiapina (2018)

3.2.2.2 Morfologia por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

De forma a complementar os resultados obtidos com uso do PDI, também foram analisadas imagens dos agregados estudados a partir de MEV. Estas imagens são de alta resolução e em escala, portanto, a partir de uma análise visual é possível verificar se há concordância entre a morfologia das partículas obtidas pelo sistema AIMS e pelas imagens geradas pelo MEV.

3.2.3 Ensaio de caracterização química

3.2.3.1 Composição química através de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) acoplada à Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS)

Para a identificação dos elementos químicos foi utilizada a MEV anteriormente apresentada. Essa técnica pode ser realizada em conjunto com a Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS).

A EDS possibilita a análise química de forma qualitativa e quantitativa. Seu funcionamento parte da leitura das frequências liberadas quando o microscópio emite o feixe de elétrons e estes colidem com a superfície da amostra, cada elemento

presente na superfície emite fótons com frequências específicas, o que possibilita identificar quais os elementos presentes na superfície destes agregados.

Essa análise foi realizada para o agregado passante na peneira de abertura de 0,425mm e retido na de 0,150mm.

3.2.4 Ensaios de caracterização mineralógica

3.2.4.1 Análise mineralógica com lupa de mão

A fratura adesiva acontece na interface entre ligante e agregado, portanto, a adesividade entre os materiais deve ser levada em consideração para a análise de fadiga, um dos fatores que influenciam a adesividade é a mineralogia do agregado. Como visto, agregados classificados como ácidos tendem a ter uma pior adesividade ao ligante asfáltico. Os materiais graníticos utilizados no presente estudo são tidos como ácidos, porém, mesmo que os dois agregados sejam oriundos de rochas com a mesma nomenclatura, estas podem apresentar diferentes proporções entre seus minerais constituintes.

Portanto, de maneira preliminar, com a finalidade de comparar, de forma macroscópica, a mineralogia dos dois granitos utilizados no estudo, foi realizada uma inspeção visual com uma lupa de mão, e um quantitativo aproximado dos principais minerais constituintes.

O micaxisto e o basalto não passaram por essa análise por possuírem minerais em sua composição que dificilmente são identificados a olho nu. Já os granitos, por possuírem minerais constituintes de fácil identificação, foram submetidos a esta análise. Outras caracterizações mineralógicas foram realizadas em todos os agregados, inclusive nos dois granitos, reforçando os resultados obtidos através da análise visual.

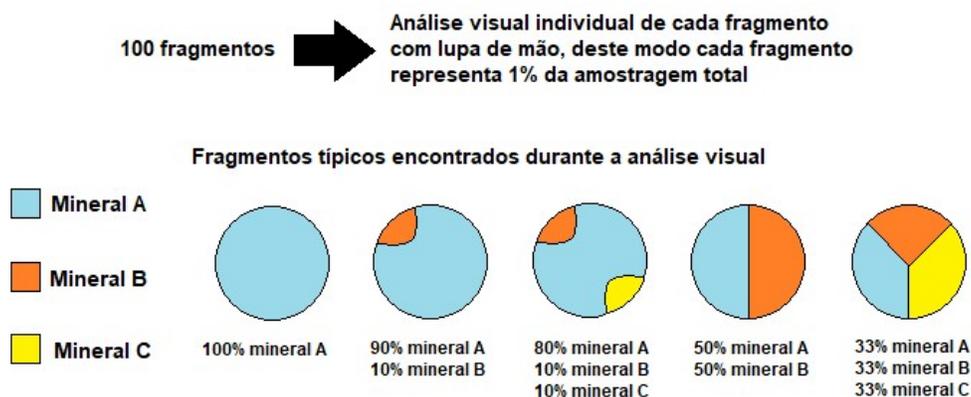
O procedimento consiste na separação de uma amostra representativa de cada agregado miúdo. Foi utilizado o material passante na peneira de abertura de 2,00mm (#10) e retido na peneira de abertura 1,18mm (#16). Com essa amostragem foram selecionadas aleatoriamente 100 partículas. Com o auxílio de uma lupa de mão com *zoom* de 30x e um foco de luz, os minerais de cada fragmento foram identificados e

quantificados de forma aproximada. Os minerais encontrados foram separados em quatro grandes grupos:

- Quartzo: mineral claro, sem plano de clivagem, podendo ser translúcido e que apresenta brilho quando colocado sob a luz;
- Feldspato: mineral claro, com planos de clivagem bem definidos, e que apresenta brilho espelhado quando colocado sob a luz;
- Mica: mineral com plano de clivagem mais bem definido e que se apresenta sob a forma placóide, podendo ser claro ou preto;
- Outros: minerais que não se encaixavam nas demais descrições, geralmente pretos, verdes ou avermelhados.

Para a quantificação da composição mineralógica por análise visual, foram atribuídos pesos para cada situação encontrada. A Figura 31 contém um esquema com essas possíveis situações. Como cada amostra de agregado contém exatos 100 fragmentos, cada fragmento representa 1% do montante total. Sendo assim, os fragmentos observados foram enquadrados em um dos 5 fragmentos típicos apresentados pelo esquema.

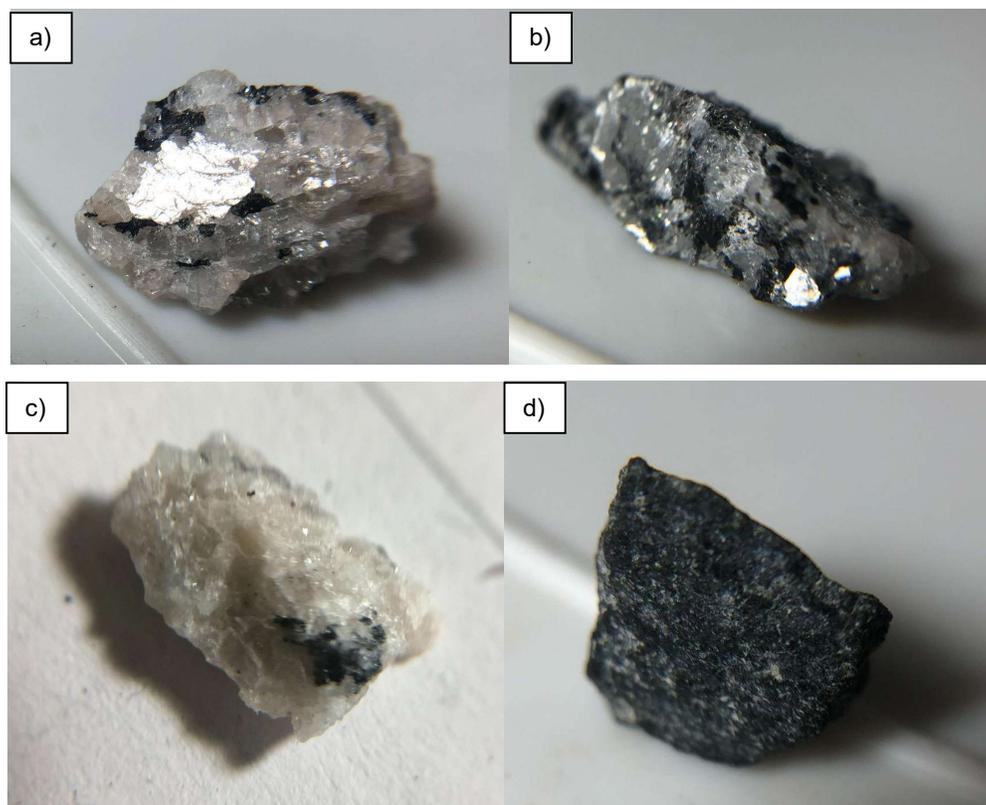
Figura 31 – Esquema de pesos considerados para cada tipo de fragmento observado



Fonte: autor

A Figura 32 apresenta alguns fragmentos do agregado granítico oriundo do estado do Rio de Janeiro, observados através da lupa, ilustrando o processo de identificação dos minerais.

Figura 32 - Inspeção visual de fragmentos através da lupa de mão.



Fonte: autor

Em (a) é apresentado um agregado com predominância de feldspatos. É possível identificar essa característica pelos planos de ruptura do fragmento além do brilho espelhado, como pode ser observado na mesma imagem. De modo diferente, no fragmento (b), pois mais que os minerais possam ser identificados, não é possível determinar qual deles é predominante. Em (c) o fragmento é quase que todo composto por quartzo, porém, através da fotografia também é possível visualizar traços de biotita. O fragmento (d) destoou dos demais, possuindo uma predominância de minerais escuros, característica de outras rochas como o basalto.

3.2.4.2 Mineralogia através de análise microscópica com lâminas delgadas

Essa análise, também chamada análise petrográfica, consiste em confeccionar uma lâmina fina com a rocha, que é levada ao microscópio, e realizar análise visual qualitativa e quantitativa a partir das imagens e do comportamento do material à luz.

Geralmente, esse procedimento é realizado com amostras de rochas ainda não britadas. No presente estudo, as lâminas foram confeccionadas com os agregados

BA e MX passantes na peneira de abertura de 0,3mm (#50) e retidos na 0,15mm (#100). O agregado foi colado sobre uma lâmina de vidro com resina e, posteriormente, houve o polimento de sua superfície. Esta adaptação diminuiu a qualidade das imagens do microscópio, pois, as lâminas precisaram ser confeccionadas com espessura maior que a usual, para que os grãos não se desprendessem da lâmina.

Contudo, os resultados não foram prejudicados. As lâminas foram utilizadas para análise qualitativa, para identificar minerais presentes nos fragmentos de rocha, e visualizar como estes minerais estavam estruturados entre si e dispostos dentro do grão.

3.2.4.3 Composição Mineralógica através de Difração de Raios X (DRX)

A técnica de difração de raios-X (DRX) foi utilizada para identificar a composição mineralógica dos agregados. O ensaio consiste, inicialmente, na separação das amostras, no caso, o material em pó (com partículas com tamanho máximo nominal de 0,063mm - #230) e seco. Então, o material é misturado com água, criando uma pasta que é espalhada sobre uma lâmina para então ser levado ao difratômetro.

O difratômetro é um equipamento que emite feixes de raios-X que difratam pelo material cristalino. O instrumento mensura a intensidade e os ângulos desses feixes difratados. Essas informações são representadas em um gráfico chamado difratograma, onde, em seu eixo horizontal são apresentados os ângulos de difração e no eixo vertical as intensidades dos feixes.

Para verificar a mineralogia do material é feita uma análise do difratograma, comparando os picos encontrados com outras estruturas cristalinas presentes em bancos de dados. Softwares podem ser utilizados para a análise do difratograma e estes, além de identificar as fases cristalinas, também podem gerar um quantitativo.

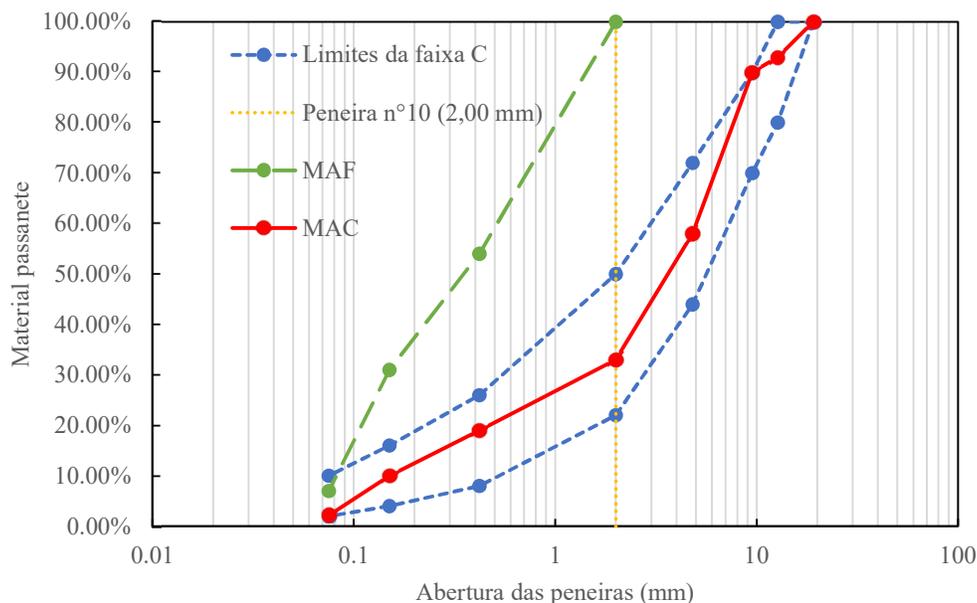
O presente estudo utilizou um difratômetro Ultima IV da marca Rigaku, com um tubo de ânodo de molibdênio. O software utilizado para análise do difratograma foi o *Match!*®, versão 3.12, com o banco de dados da *Crystallography Open Database* (COD 2021).

3.3 Procedimento de Dosagem e Compactação das MAFs

A dosagem e compactação de MAFs não é um processo normatizado. Desta forma, não há consenso na literatura quanto a metodologia a ser adotada. Assim, como nos estudos de misturas asfálticas completas, para a dosagem das MAFs faz-se necessária a determinação da composição granulométrica e, posteriormente, a determinação do teor de ligante. Internacionalmente, a maior parte dos estudos de MAF utilizam partículas com dimensões inferiores a 1,18mm (KIM *et al.*, 2003; CASTELO BRANCO, 2008; KARKI, 2014; KARKI *et al.* 2016; LI *et al.* 2020). Entretanto, no Brasil, essa abertura de peneira, referente a peneira de número #16, não faz parte do jogo de peneiras padrão estabelecido pelo DNIT para composição de misturas asfálticas. Desta forma, estudos nacionais têm adotado como TMN a peneira #10, cuja abertura é de 2,00mm (COUTINHO *et al.*, 2010; COUTINHO, 2012; SOUZA *et al.*, 2013; FONSECA, 2016; NG, 2017; OLIVEIRA & FAXINA, 2021). Já foi verificada que essa mudança no TMN, de 1,18mm para 2,00mm, não afeta o desenvolvimento do dano por fadiga, confirmando que a peneira #10 também é adequada para delimitar o TMN das partículas de agregado (FREIRE *et al.*, 2015).

Para este estudo, a determinação da distribuição granulométrica dos agregados das MAFs teve como base a composição de uma mistura asfáltica completa dosada por Frossard *et al.* (2022), excluindo os agregados retidos na peneira de 2,00mm (#10). A curva da mistura completa está enquadrada na Faixa C da norma DNIT 031/2006-ES. A Figura 33 apresenta a curva de distribuição granulométrica da mistura completa utilizada como base para a dosagem das MAFs, a curva de distribuição granulométrica adotada para as MAFs e os limites inferior e superior da Faixa C.

Figura 33 – Curva Granulométrica do agregado constituinte da MAC, MAF e limites da faixa C do DNIT



Fonte: Autor

3.3.1 Dosagem das MAFs

Para a determinação do teor de ligante das MAFs estudadas foi adotado o procedimento proposto por Ng *et al.* (2018). Como mencionado anteriormente, o ligante utilizado nesta pesquisa foi o CAP 30/45. Para a obtenção das temperaturas de usinagem e de compactação foram utilizados dados de caracterização do ligante apresentados no Quadro 6. Para as misturas utilizadas nesta pesquisa, as temperaturas de usinagem e compactação foram, respectivamente, $165 \pm 2^\circ\text{C}$ e $150 \pm 2^\circ\text{C}$.

A metodologia de dosagem proposta por Ng *et al.* (2018) adaptou a metodologia de dosagem de misturas asfálticas completas proposta por Arrambide e Duriez (1959) para MAFs e utiliza a superfície específica dos agregados e o módulo de riqueza da MAF para então definir o teor de ligante das MAFs. A superfície específica dos agregados (S_s) é dada pela Equação 14. Sendo esta, a somatória da superfície específica para cada intervalo de peneiras (S_i).

$$S_{maf} = \sum_{i_0}^{i_x} S_i \quad (14)$$

A Equação 15 apresenta a superfície específica de cada intervalo de peneira (S_i) e sua dependência do coeficiente de superfície específica de determinado intervalo de peneiras (C_i) e da porcentagem de partículas contidas neste intervalo (P_i).

$$S_i = \frac{C_i \times P_i}{100} \quad (15)$$

Enquanto a porcentagem de partículas contidas em cada intervalo (P_i) pode ser extraída diretamente do gráfico de composição granulométrica do agregado, o coeficiente de superfície específica (C_i) é obtido através das características morfológicas das partículas, conforme Equação 16, sendo A_i a área superficial média das partículas, V_i o volume, e ρ a massa específica das partículas. Para este cálculo, Ng. (2017) propõe estimar as partículas como cubos, portanto, a área superficial (A_i) e o Volume (V_i) podem ser encontrados pelas Equações 17 e 18, respectivamente. Por fim, o parâmetro ai representa cada lado da partícula de cada intervalo de peneiras, e este pode ser obtido através da Equação 19 que apresenta sua dependência da diagonal de cada partícula (di), representada pela diagonal de um cubo mensurado como a média da abertura das peneiras daquele intervalo de peneiras.

$$C_i = \frac{A_i}{V_i \times \rho} \quad (16)$$

$$A_i = 6 \times ai^2 \quad (17)$$

$$V_i = 6ai^3 \quad (18)$$

$$ai = \frac{di}{\sqrt{3}} \quad (19)$$

Ng *et al.* (2018) orientam que valores entre 3,75 e 4,50 são apropriados para o módulo de riqueza de MAFs. O módulo de riqueza desta MAF (K_{maf}) foi calculado em função do módulo de riqueza da sua MAC correspondente (K_{mac}), e da massa específica do agregado que a compõe, conforme Equação 20.

$$K_{maf} = 1,51 \times K_{mac} \times \frac{\rho}{2,65} \quad (20)$$

Conforme mencionado, o teor de ligante da MAF (T_{maf}) pode ser obtido em função de seu módulo de riqueza e da superfície específica de seus agregados, assim como apresentado na Equação 21. Porém, o teor de ligante final da MAF ainda é dependente de uma última correção, que leva em consideração a absorção do agregado (%Abs), conforme Equação 22.

$$T_{maf} = \frac{100 \times K_{maf} \times \sqrt[5]{S_s}}{100 + (K_{maf} \times \sqrt[5]{S_s})} \quad (21)$$

$$T_{Finalmaf} = T_{maf} \times (1 + \%Abs) \quad (22)$$

A MAF_G_ES foi a primeira mistura dosada, a partir de uma MAC que utilizou o mesmo agregado. A dosagem das demais MAFs partiu desta primeira, o agregado G_ES foi substituído por outro mantendo o mesmo volume de agregado, com o intuito de se diminuir a variação entre a espessura do filme de ligante. A Tabela 1 apresenta a massa de ligante e de agregado em cada faixa granulométrica para cada uma das MAFs.

Tabela 1 – Massa dos componentes das MAFs

Componente	MAF_G_ES	MAF_G_RJ	MAF_BA	MAF_MX
% Ligante	9,67	10,25	9,69	10,27
% Agregado 2,00 – 0,425 mm	40,92	40,65	40,92	40,56
% Agregado 0,425 – 0,150 mm	22,22	22,07	22,22	22,02
% Agregado 0,150 – 0,075 mm	21,68	21,54	21,68	21,49
% Agregado < 0,075 mm	5,51	5,49	5,50	5,66

Fonte: Autor.

O procedimento de mistura se inicia com o preparo dos agregados, que devem ser quarteados, secos e peneirados. Após a separação do agregado nas faixas granulométricas de interesse, cerca de 250g agregados, juntamente com o ligante e todos os utensílios utilizados para a mistura, são levados à estufa na temperatura de mistura previamente determinada. Após 60 minutos, deve-se pesar a massa de ligante necessária e misturá-lo aos agregados até que seja formada uma mistura homogênea (Figura 34). Após esse procedimento, a mistura é separada em quantidades menores para posterior compactação, tomando cuidado com o envelhecimento do material, ou seja, esta deve ser armazenada em local seco e protegido para evitar oxidação.

Figura 34 – Procedimento de mistura



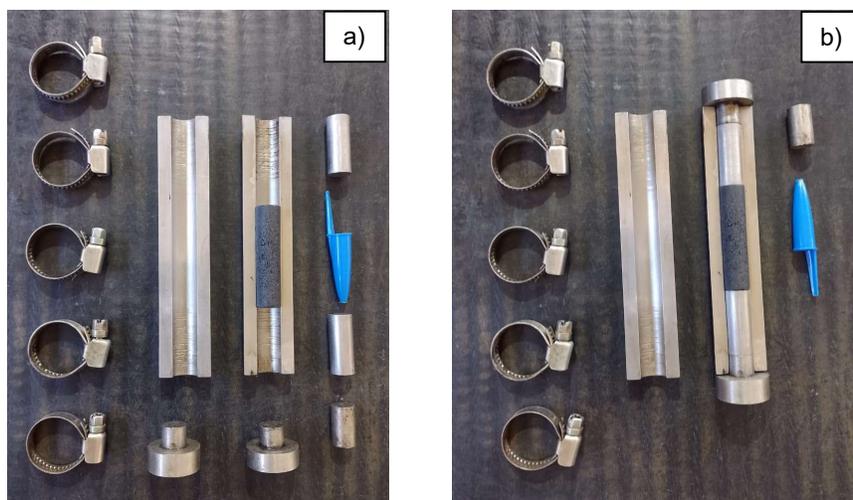
Fonte: Autor.

3.3.2 Compactação das MAFs

O procedimento de compactação de MAFs foi definido a partir de um protocolo definido pelo grupo do CNPq SAM (*Sand Asphalt Mortar*), uma colaboração de pesquisadores da UFES, UFG e USP/São Carlos. Este procedimento encontra-se detalhado no trabalho de Curado *et al.* (2021).

Neste procedimento, corpos de prova de dimensões aproximadas de 50mm de comprimento e 12mm de diâmetro são confeccionados individualmente a partir do uso de molde metálico, conforme Figura 35.

Figura 35 – Molde para compactação de MAF



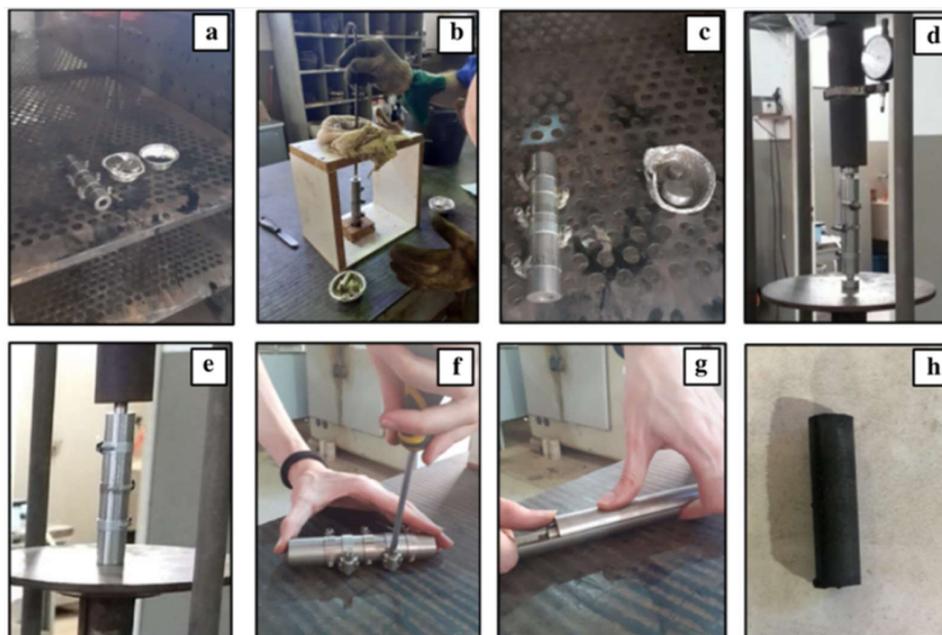
Fonte: Autor.

Para tanto, é separada a massa de mistura necessária para moldar um corpo-de-prova, i.e., cerca de 13-16g dependendo do agregado que compõe a MAF. O

processo de compactação se inicia levando a mistura e todas as peças do molde à estufa na temperatura de compactação durante 30 min (Figura 36 a). Após esse período, a mistura deve ser colocada dentro do molde com o auxílio de um funil e de uma haste metálica (Figura 36 b). Assim que toda a mistura estiver dentro do molde, o conjunto deve ser levado novamente à estufa, na mesma temperatura, por mais 15 min (Figura 36 c). Em seguida, as extremidades do molde devem ser posicionadas e todo o conjunto deve ser levado à um equipamento para compactação (neste estudo foi utilizada uma prensa manual CBR) (Figura 36 d). A aplicação de carregamento na prensa CBR deve ser de forma constante e rápida para que não haja grande perda de temperatura. O conjunto é então mantido pressionado pela prensa até que seja possível manusear o molde sem auxílio de luvas, evitando o deslocamento da amostra dentro do mesmo

Para desmoldar a amostra, as extremidades do molde devem ser retiradas e, com uma peça auxiliar, o corpo-de-prova deve ser movimentado no interior do molde para as duas direções, desprendendo-o das paredes do molde (Figura 36 e). A peça auxiliar então é retirada e as abraçadeiras abertas (Figura 36 f). Por experiência deste estudo, recomenda-se abrir o molde deitado com uma de suas metades sobre a mesa e empurrar manualmente a parte superior de forma cuidadosa (Figura 36 g). Assim que as partes do molde forem separadas, deve-se verter a amostra. Se esta ainda estiver presa nas paredes do molde, recomenda-se não puxar a amostra e sim empurrá-la na direção que ocorre a compactação. Por fim, o corpo-de-prova (Figura 36 h) deve ser identificado e armazenado por 24 horas para a determinação do volume de vazios.

Figura 36 – Procedimento de compactação de MAFs



Fonte: Autor.

3.3.3 Determinação do Volume de vazios das MAFs

O Volume de vazios (V_v), em percentagem, é determinado empregando-se a Equação 23, onde G_{mb} é a densidade aparente do corpo-de-prova. O valor de G_{mb} , por sua vez, é obtido com o emprego de uma balança hidrostática baseado no princípio de Arquimedes, portanto é uma relação entre a massa seca (m_{seca}), a massa submersa (m_{sub}) e a massa específica da água na temperatura em que a amostra foi pesada ($\rho_{água}$), como apresentado na Equação 24. Por fim, a DMM é a Densidade Máxima Medida da mistura, que pode ser substituída, por simplificação, pela Densidade Máxima Teórica (DMT), cujo valor pode ser encontrado pela Equação 25, onde %a, %m e %f é a percentagem de ligante asfáltico, agregado miúdo e fíler na mistura, respectivamente, e ρ_a , ρ_m e ρ_f a massa específica do ligante, do agregado miúdo e do fíler, nesta ordem.

$$V_v = \frac{DMM - G_{mb}}{DMM} \quad (23)$$

$$G_{mb} = \frac{m_{seca}}{m_{seca} - m_{sub}} \times \rho_{água} \quad (24)$$

$$DMT = \frac{100}{\frac{\%a}{\rho a} + \frac{\%m}{\rho m} + \frac{\%f}{\rho f}} \quad (25)$$

No estudo realizado por Curado *et al.* (2021) observou-se variações inferiores à 0,9% nos valores de DMT ou DMM, assegurando que a substituição da DMM pela DMT não gera diferenças significativas no Vv. Para a realização dos ensaios oscilatórios, de forma a padronizar o Vv e não ter a influência destes nos resultados, adotou-se um Vv de $4,00 \pm 0,50\%$.

3.4 Ensaios Oscilatórios

Com a finalidade de avaliar a resistência à fadiga e à autorregeneração das MAFs, foram realizados ensaios oscilatórios utilizando um equipamento DSR, modelo AR 2000ex da TA instruments. Este reômetro é capaz de aplicar torques de $0,3 \mu\text{N.m}$ até 200 mN.m , frequências entre $7,5 \text{ E}^{-7}$ e 628 rad/s , velocidade angular de 0 a 300 rad/s e força normal de $0,005$ a 50N . Os ensaios oscilatórios são normalmente realizados nos ligantes asfálticos e sua adaptação para análise de MAFs ainda é uma proposta recente, não possuindo normatização.

Os ensaios oscilatórios realizados na presente pesquisa foram varreduras de frequência (Fingerprint) e de tempo, nesta ordem. Para obter a autorregeneração, no ensaio de varredura de tempo é aplicado um período de repouso, cujas considerações serão explanadas a seguir. Para estes ensaios foram utilizadas amostras cilíndricas de MAFs. Os corpos de prova possuem dimensões aproximadas de 12mm de diâmetro e 50mm de altura. Para acoplar o Corpo-de-Prova (CP) no DSR são colados “holders” metálicos (Figura 37) nas extremidades dos CPs com um adesivo instantâneo da marca “Tekbond”, e então, após a secagem, o CP é posicionado no reômetro para execução do ensaio. A geometria utilizada no reômetro é a mesma para as amostras sólidas retangulares, permitindo a fixação das bases metálicas nas hastes da geometria. Por fim, a Figura 38 apresenta o CP acoplado ao DSR antes de se iniciar os ensaios oscilatórios.

Figura 37 – Corpo-de-prova de MAF e “holders”



Fonte: Autor.

Figura 38 - CP de MAF acoplado ao reômetro.



Fonte: Autor.

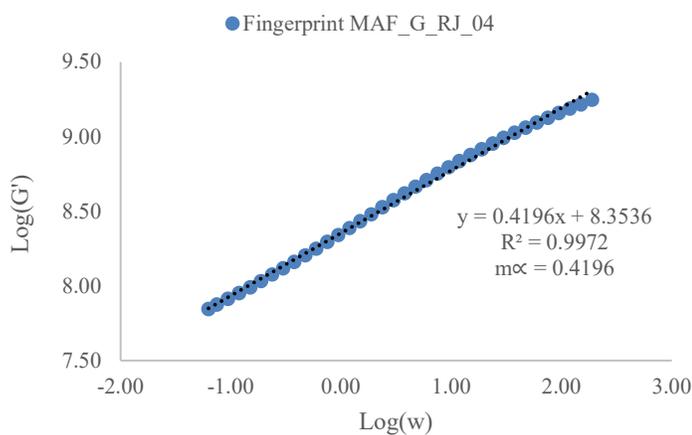
3.4.1 Ensaio de Varredura de Frequência (*Fingerprint*)

Primeiramente, foi realizado um ensaio denominado “*fingerprint*”, que consiste em um ensaio de varredura de frequência a baixas deformações para determinar as propriedades viscoelásticas lineares do material, i.e., ainda sem dano. Este ensaio é necessário para obter as características de rigidez da amostra quando esta apresenta sua integridade total, i.e., $C=1$. Portanto, o ensaio ainda deve ser realizado na zona viscoelástica linear, aplicando-se valores de deformação baixos. Os parâmetros adotados para esta etapa foram frequências que variavam de 0,01 à 30Hz,

temperatura de 25°C e deformação de 65 microstrain ($\mu\text{m/m}$), possibilitando que o ensaio seja realizado na zona viscoelástica linear (COUTINHO, 2012; SOUZA *et al.*, 2013; FREIRE, 2015; FREIRE *et al.*, 2015; KARKI *et al.* 2015; FONSECA, 2016; Li *et al.*, 2020.)

De posse dos dados obtidos pelo “*fingerprint*”, foi calculado o parâmetro α , utilizando a Equação 8, a partir da inclinação ($m\alpha$) da curva referente ao logaritmo do módulo de armazenamento (G') em função do logaritmo da frequência, assim como exemplificado na Figura 39. Após o “*fingerprint*”, a amostra é deixada em repouso por 30 min e reutilizada no ensaio de varredura de tempo.

Figura 39 – Ensaio de varredura de frequência para obtenção de m



Fonte: autor

3.4.2 Ensaio de Varredura de Tempo

O ensaio de varredura de tempo é realizado com aplicação de um carregamento senoidal constante (tensão ou deformação controlada) e repetitivo que leve à ruptura da amostra após a aplicação de sucessivos carregamentos devido ao acúmulo de dano gerado em cada ciclo, i.e., ruptura por fadiga. Nesta pesquisa este ensaio foi realizado sob uma tensão constante de 400KPa. O valor de tensão aplicado deve ser suficiente para induzir um dano progressivo na amostra por fadiga. O valor adotado neste está dentro da faixa utilizada por algumas pesquisas relatadas na literatura para a escala MAF, considerando frequência e temperatura constantes de 10Hz e 25°C, respectivamente (FREIRE, 2015; KARKI *et al.*, 2015; SADEQ *et al.*, 2016; NG, 2017).

Tipicamente, para o cálculo da curva característica de dano, o carregamento senoidal é aplicado até a ruptura da amostra. Entretanto, como proposto por Karki *et al.* (2015), a autorregeneração pode ser determinada juntamente com este ensaio ao ser inserido um período de repouso durante sua execução. Como esta pesquisa tinha como objetivo, além da avaliação da resistência à fadiga, a avaliação da capacidade de autorregeneração, foi adotado a metodologia proposta por Karki *et al.* (2015) por gerar resultados mais rápidos com um menor número de amostras. O ensaio de fadiga foi interrompido uma única vez para possibilitar o repouso, no instante em que a integridade da amostra se aproximava em 80%, i.e., $C=0,8$. Este momento de aplicação do repouso foi adotado a partir de outros trabalhos que utilizaram metodologia semelhante (PALVADI *et al.*, 2012; KARKI *et al.*, 2015; LI *et al.*, 2020; ASHOURI *et al.*, 2021).

O tempo de repouso foi fixado em 60 minutos. Embora a maior parte dos estudos em MAF tenha utilizado períodos de repouso variando de 5 à 40 minutos (vide Quadro 3), optou-se por um período maior para permitir o máximo de interação entre os agregados e ligante durante a autorregeneração. Acredita-se que o efeito das propriedades dos agregados na autorregeneração pode ser melhor evidenciado para longos períodos de repouso (OLIVEIRA, 2019). Durante o repouso de 60 minutos, as amostras foram mantidas condicionadas a 25°C. Após esse período, o ensaio de fadiga retornou sem nenhuma alteração em seus parâmetros, amplitude de carregamento de 400 KPa, frequência de 10 Hz, e temperatura de 25°C, mantendo o carregamento até a ruptura do CP, que foi determinada quando houve queda brusca no ângulo de fase.

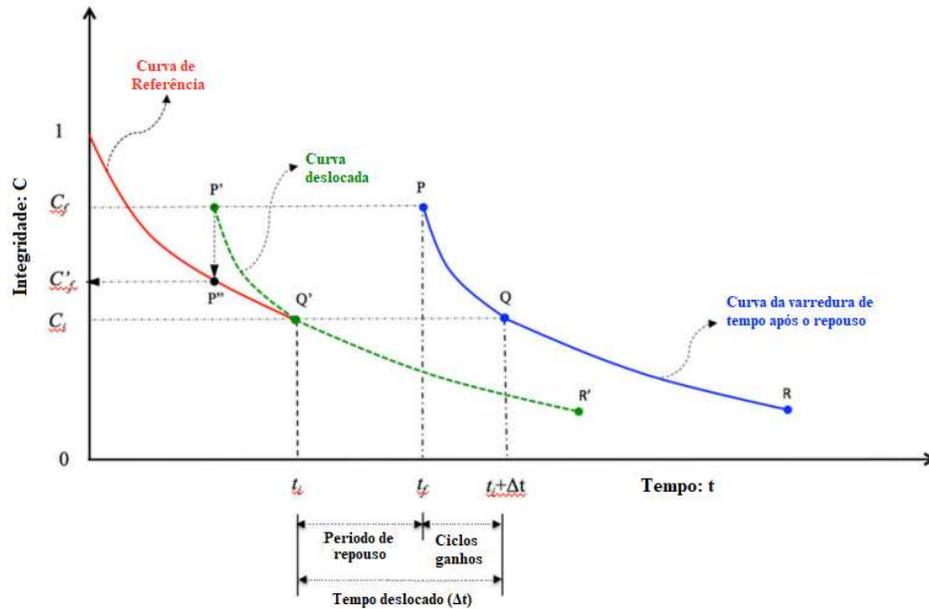
Com os resultados dos ensaios de "*fingerprint*" e de varredura de tempo com repouso, foi aplicada a teoria S-VECD. Primeiramente, a curva de integridade *versus* tempo foi deslocada para desconsiderar o repouso e a autorregeneração nos cálculos da curva característica de dano. Com esse ajuste, os valores da integridade (C) e do dano (S) foram calculados para a obtenção das curvas CxS de cada CP, como se não tivesse acontecido o repouso. As curvas das amostras foram então ajustadas à uma única equação "*power law*", para determinar a curva característica de cada MAF. Com esse objetivo foi adotado um fator de forma de $\pm 5\%$ entre a área acima do gráfico da amostra com a área da curva representativa, assegurando que as curvas características representem as amostras ensaiadas (LEE *et al.*, 2018). De posse das

curvas características de dano de cada MAF, foram traçadas as curvas de fadiga, com os parâmetros C_{11} e C_{12} extraídos da “*power law*”.

Por último, foram calculados os valores de autorregeneração, utilizando a Equação 13, primeiramente o parâmetro C_i refere-se à integridade no momento em que o repouso começou, ou seja, 0,8. Na sequência C'_f foi obtido a partir do deslocamento da curva de integridade *versus* tempo, sendo C'_f uma redução do valor C_f referente à integridade logo após o repouso. A redução acontece, pois o comportamento de parte da curva após o repouso pode não ser exatamente como antes do repouso, ou seja, parte da regeneração não foi integral. Se as cadeias moleculares se restituíssem por completo, o comportamento da curva característica de dano deveria ser o mesmo antes e após o repouso. Karki *et al.* (2015) propuseram que a redução do dano aconteça a partir da redução do valor da pseudo-rigidez. Na Figura 40 é apresentada a redução do valor da pseudo rigidez. As etapas para esta redução as seguintes:

- A redução é realizada com os resultados do ensaio de fadiga ao ser plotado o gráfico de pseudo rigidez vs tempo;
- Dado início ao ensaio de fadiga, a pseudo rigidez decai, e o ensaio segue até que a integridade atinja a integridade de interesse para aplicar o repouso (C_i) (Ponto Q');
- Após o período de repouso, o ensaio de fadiga é retomado, sendo que, o primeiro valor de pseudo rigidez computado após o repouso (C_f), representa a integridade recuperada durante o repouso (Ponto P);
- O ensaio segue até o critério de ruptura (ponto R);
- Após a ruptura, é realizado o deslocamento da curva da varredura de tempo após o repouso (curva do ponto P ao R). A curva é deslocada para a esquerda até que a curva toque a curva de referência (ponto Q toca o ponto Q');
- Determina-se o valor da pseudo-rigidez reduzida (C'_f) a partir da curva deslocada (P'' é o ponto da curva de referência que coincida com o mesmo tempo de ensaio do ponto P').

Figura 40 – Deslocamento da curva C vs Tempo e obtenção de C'_f

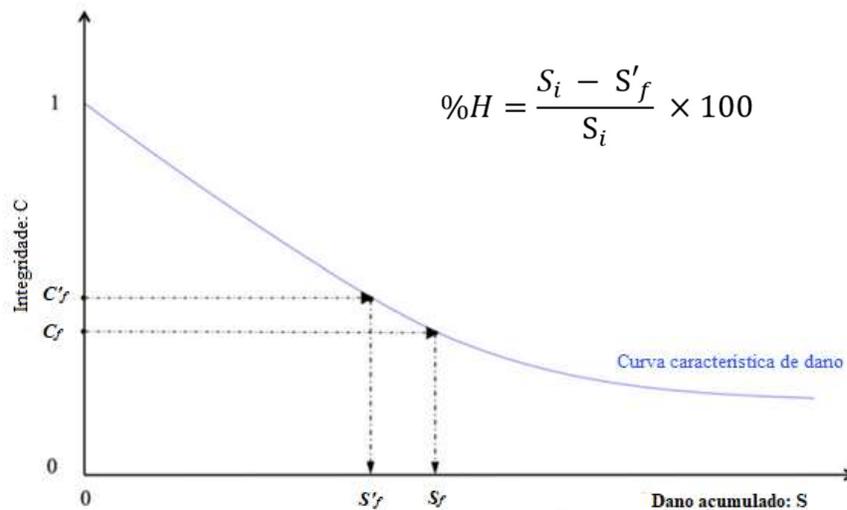


Fonte:

Adaptado de Karki et al. (2015)

Com as curvas C vs S, foram obtidos os valores de S_i e S'_f correspondentes às integridades C_i e C'_f , conforme Figura 41. De posse de todos os parâmetros é possível calcular a autorregeneração ($\%H$) pela Equação 13.

Figura 41 – Obtenção de S'_f



Fonte: Adaptado de Karki et al. (2015)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios realizados, assim como discussões sobre os mesmos. Os resultados são apresentados, inicialmente, pela caracterização dos materiais, seguidos da compactação e mistura das MAFs, e, por fim, dos resultados da caracterização reológica com relação à fadiga e à autorregeneração.

4.1 Ensaios de Caracterização dos Agregados

4.1.1 Resultados de Ensaios de Caracterização Física

O primeiro ensaio realizado em cada agregado foi a determinação das massas específicas do material miúdo e sua absorção, assim como a massa específica dos fíleres. O procedimento para agregados miúdos é descrito pela norma DNIT 411/2019 – ME e para os fíleres pela norma ABNT NBR 16605:2017. A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos para cada um dos agregados estudados.

Tabela 2 - Resultados de massa específica real e absorção

Agregado	Fração (mm)	Massa específica real (g/cm ³)	Absorção (%)
G ES	2,00 - 0,075	2,818	0,20
	<0,075	2,852	-
G RJ	2,00 - 0,075	2,641	0,72
	<0,075	2,680	-
BA	2,00 - 0,075	2,811	1,22
	<0,075	2,838	-
MX	2,00 - 0,075	2,631	0,28
	<0,075	2,782	-

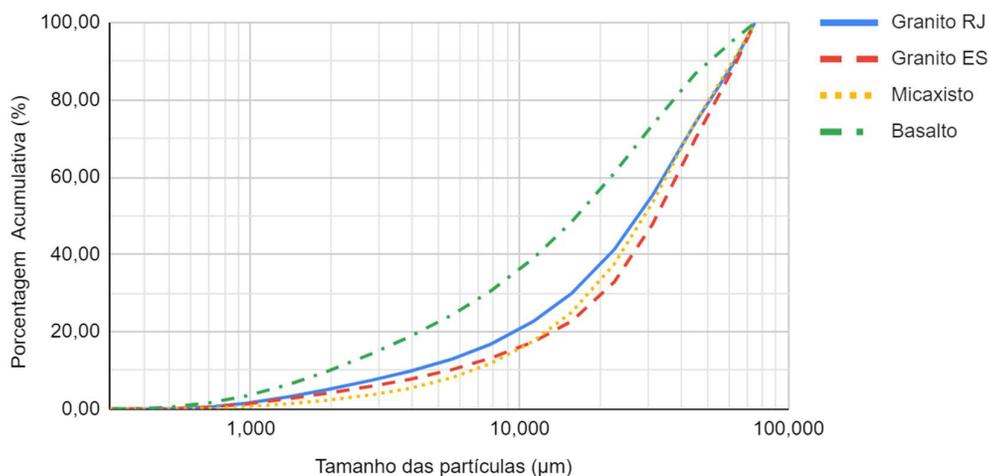
Fonte: autor

É esperado que os fíleres possuam maior massa específica que suas frações maiores correspondentes. Com relação à absorção, entre os agregados analisados destacam-se positivamente o Granito_ES e o Micaxisto que apresentaram,

respectivamente, valores de absorção iguais à 0,20% e 0,28%. Já o basalto apresentou o maior valor de absorção (maior que 1%) dentre os quatro agregados estudados, porém, este agregado ainda é classificado como um agregado de baixa absorção por possuir absorção inferior à 2%. Agregados com baixa absorção são ideais para composição de misturas asfálticas, pois, além de necessitarem de uma menor quantidade de ligante, característica pode influenciar positivamente na resistência do concreto asfáltico (BERNUCCI *et al.*, 2008). A alta absorção encontrada para o agregado BA pode estar relacionada à diferença do tamanho das partículas dentro das faixas analisadas, por conta do procedimento de britagem adotado para obtenção do agregado basáltico, possuindo maior teor de finos. Mesmo com a separação dos grãos por peneiramento para manter a mesma proporção nas misturas, havia uma diferença perceptível entre no tamanho das partículas dentro de um mesmo intervalo de peneiras. Essa diferença também foi observada nos fileres, após britagem e a separação granulométrica, o agregado basáltico não apenas possuía maior volume de material passante na peneira de número #200, mas também aparentava ser mais fino quando manuseado.

Na Figura 42 são apresentados os resultados do ensaio de granulometria a laser realizado nos fileres, que confirmam essa diferença. Enquanto os três agregados comerciais (G-ES, G-RJ e MX) possuem uma distribuição dos tamanhos das partículas dos fileres semelhante, o filer do basalto possui maior teor de finos, com destaque à parcela abaixo dos 20 μm . Sabe-se que partículas inferiores a esta dimensão podem atuar como modificadores de ligante. O agregado basáltico possui quase que 60% das partículas de filer inferiores à 20 μm , já os demais agregados não chegam a 40%.

Figura 42 – Curvas de distribuição granulométrica dos fíleres (<0,075mm)

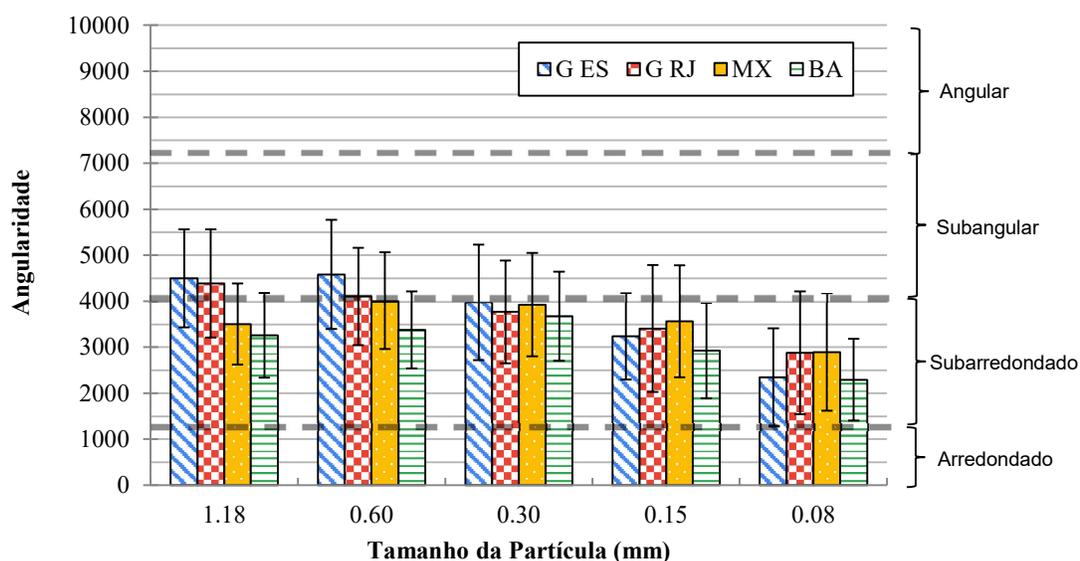


Fonte: autor

4.1.2 Resultados de Ensaio de Caracterização Morfológica

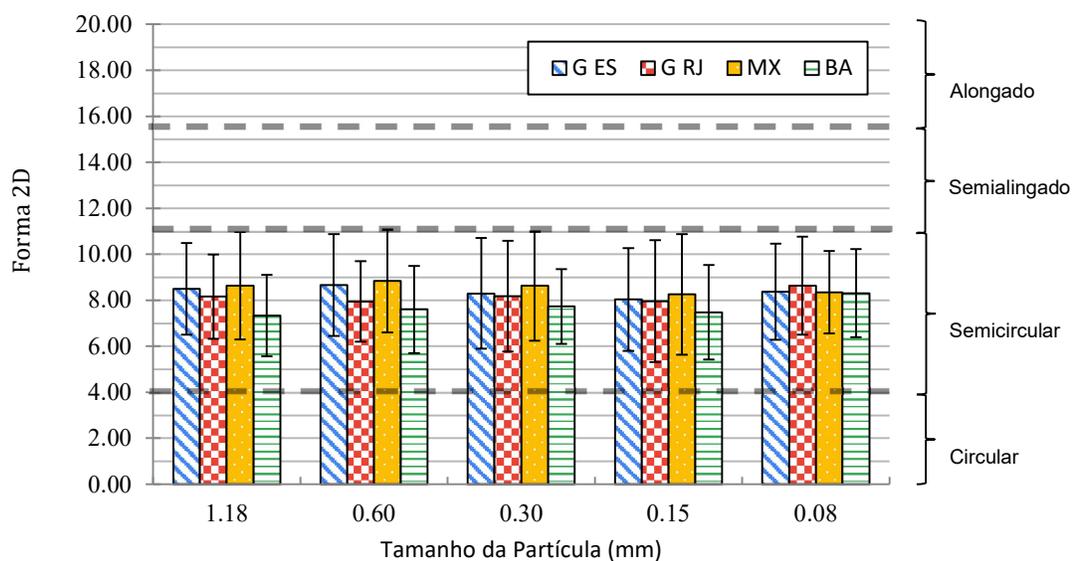
A morfologia dos agregados foi quantificada a partir do PDI, utilizando o AIMS, e classificados a partir do sistema de classificação proposto por Ibiapina (2018). Como somente foram analisadas as frações de agregados miúdos, foram obtidos os resultados de angularidade e forma 2D, apresentados nas Figuras 43 e 44, respectivamente. As barras de erro apresentam o desvio padrão entre os fragmentos, o que demonstra uma variedade na morfologia dos fragmentos, que se assemelha para todos os agregados.

Figura 43 – Angularidade obtida por PDI e limites de classificação segundo Ibiapina (2018)



Fonte: autor

Figura 44 – Forma 2D obtida por PDI e limites de classificação segundo Ibiapina (2018)



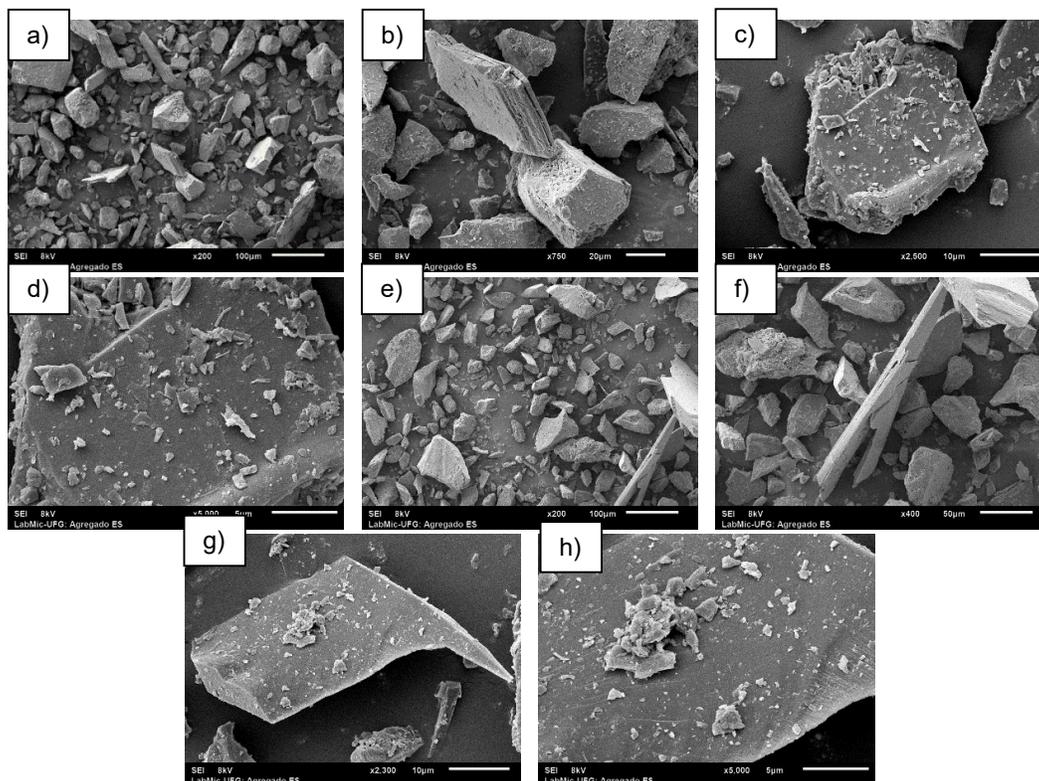
Fonte: autor

Pela classificação proposta por Ibiapina (2018), todos os agregados, em todas as faixas analisadas, são enquadrados como semicirculares em relação a forma 2D. Quanto a angularidade, os agregados G ES e G RJ foram classificados como subangulares nas faixas de 1,18 e 0,60 mm. Para as demais faixas, todos os agregados foram classificados como subarredondados. Apesar desta diferença na

classificação da angularidade para algumas faixas dos agregados graníticos, os valores médios margeiam o limite inferior da classificação. Para os agregados G ES e RJ, observou-se uma tendência de queda na angularidade para frações menores. Para os agregados MX e BA, os valores de angularidade da fração de 1,18 mm foram inferiores se comparados aos valores de angularidade para as amostras de material granítico. A partir da fração de 0,30 mm, esta diferença é reduzida. Embora tenham sido observadas algumas diferenças nos valores de angularidade dos agregados, estas são pequenas, e de forma geral, os agregados apresentam morfologias semelhantes dentro das faixas analisadas, principalmente quanto a sua Forma 2D.

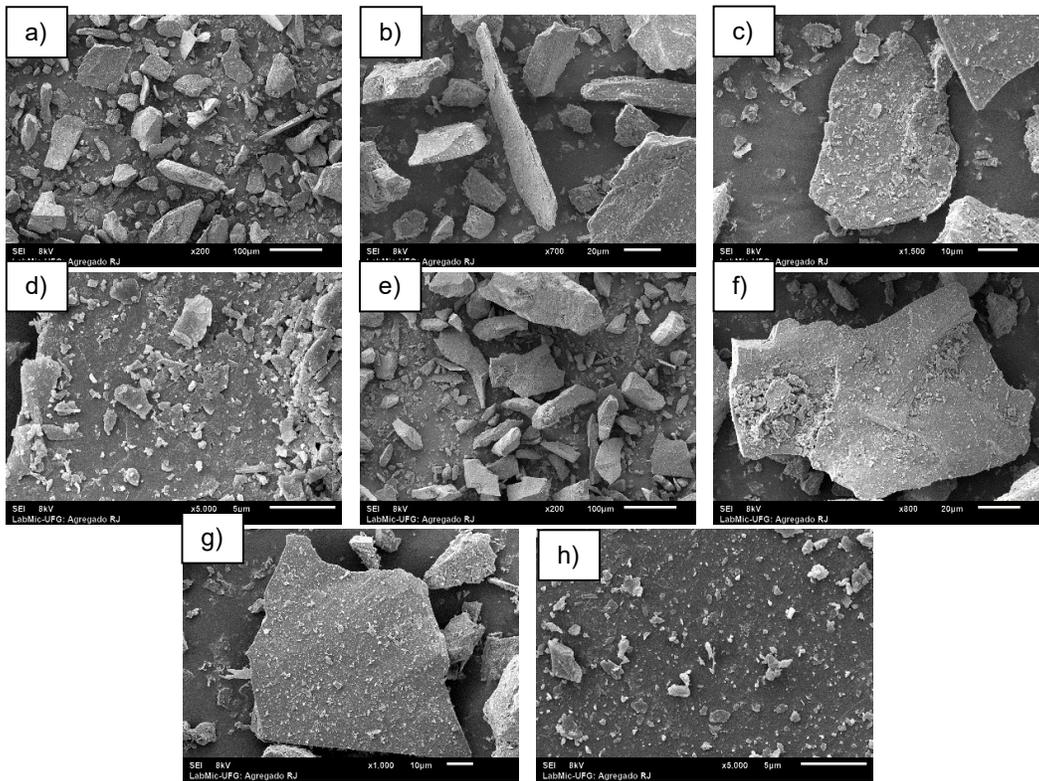
Imagens captadas com o uso do MEV reforçam que os agregados possuem angularidade e formas parecidas, além de apresentar o aspecto da textura dos grãos. As Figuras 45, 46, 47 e 48 representam, respectivamente, os agregados G ES, G RJ, BA e MX, com a granulometria natural do agregado abaixo dos 2,00mm.

Figura 45 – Imagens do agregado G ES obtidas por MEV



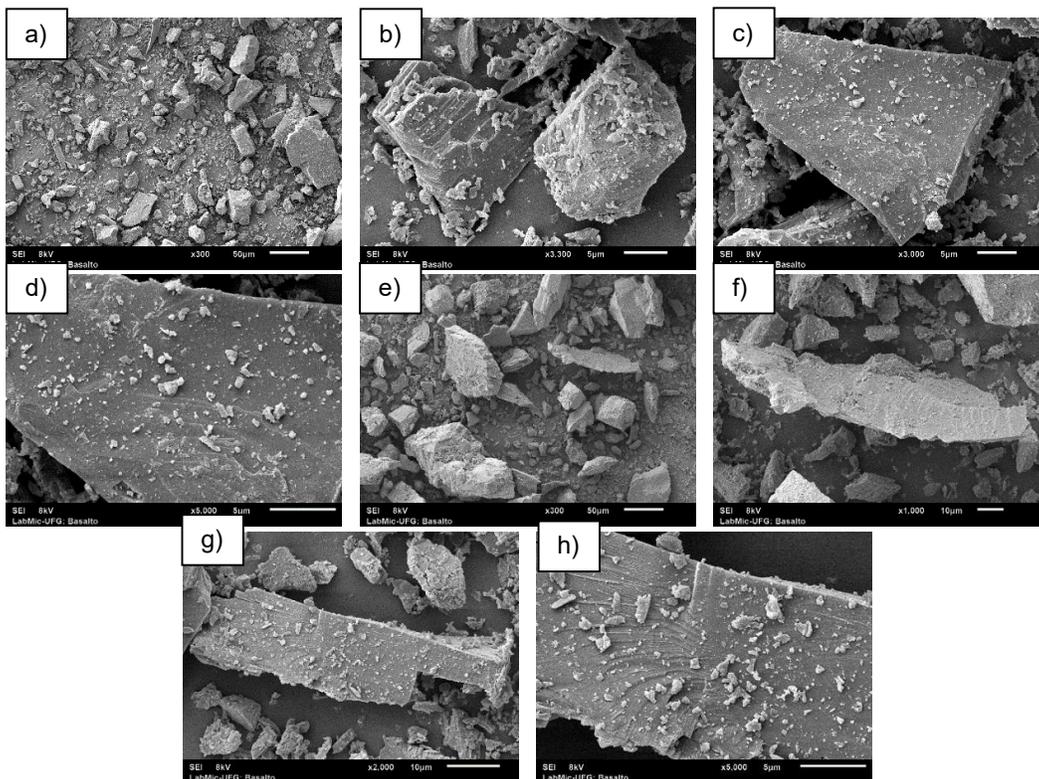
Fonte: autor

Figura 46 – Imagens do agregado G RJ obtidas por MEV



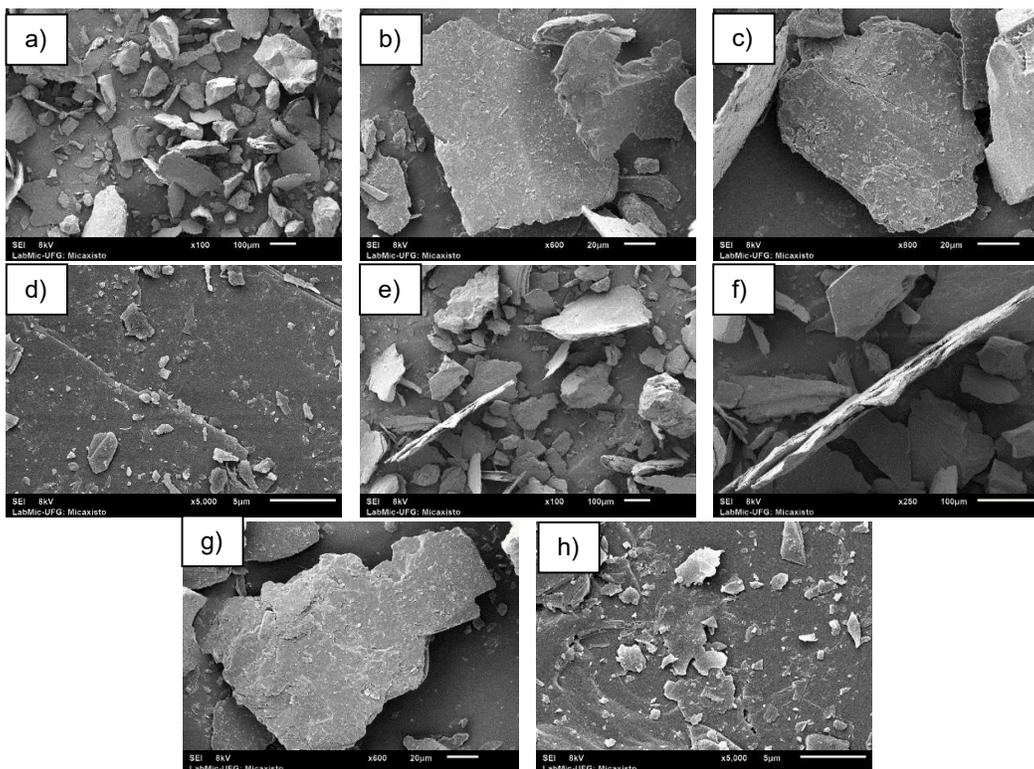
Fonte: autor

Figura 47 – Imagens do agregado BA obtidas por MEV



Fonte: autor

Figura 48 – Imagens do agregado MX obtidas por MEV



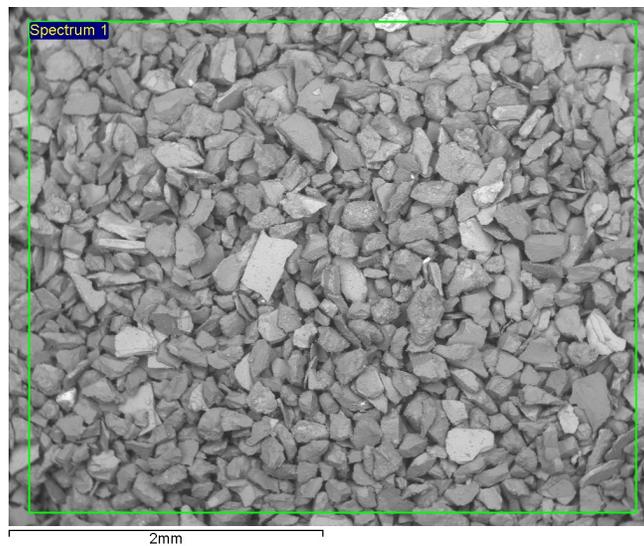
Fonte: autor

Dentre os grupos de figuras as identificadas como a) e e) possuem maior campo de visão, portanto, conferem a capacidade de visualizar uma maior quantidade de grãos, as demais figuras são aproximações estratégicas, com a finalidade de visualizar partículas específicas com maiores detalhes. Como não houve a separação do material em faixas granulométricas, é possível observar que o agregado BA possui maior concentração de finos. No agregado MX, foram observados diversos fragmentos em forma de escamas, como as destacadas nas Figuras 48 b) e f), esse tipo de estrutura também pode ser observado nos agregados G ES e G RJ, como na Figura 45 b) e f) e em Figura 46 b). A partir das imagens mais próximas, é possível observar a textura superficial destes grãos com detalhes. Foram observadas partículas com texturas distintas, como no caso das Figuras 47 b), e c), que representam partículas mais rugosas e mais polidas, respectivamente.

A técnica de MEV/EDS que foi utilizada para análise de composição química gerou imagens dos agregados separados dentro de uma mesma fração, que no caso, foi o material passante na peneira de 0,3mm e retido na de 0,150mm, fração esta que

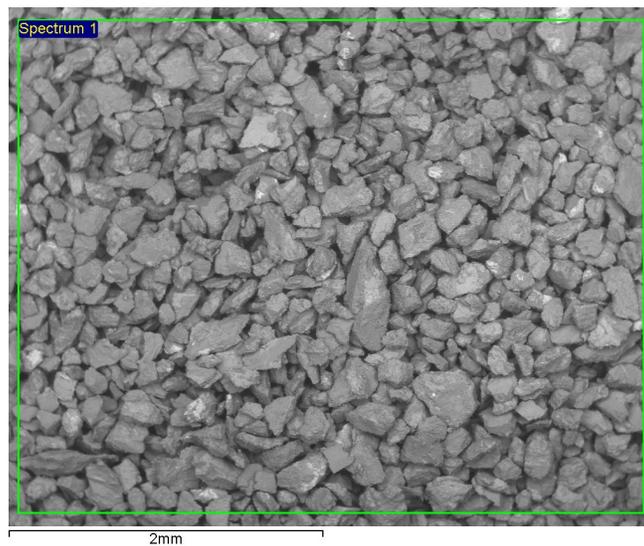
coincide com umas das frações utilizadas pelo sistema AIMS. As Figuras 49, 50 e 51 representam, respectivamente, os agregados G RJ, BA e MX.

Figura 49 – Imagem do agregado G RJ obtida por MEV/EDS



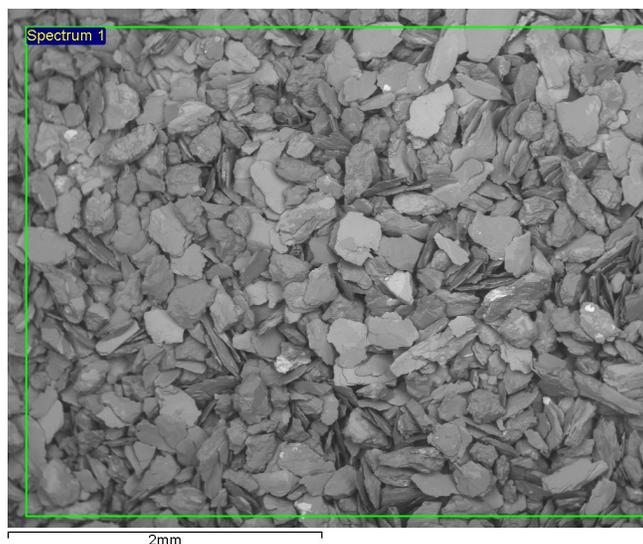
Fonte: autor

Figura 50 – Imagem do agregado BA obtida por MEV/EDS



Fonte: autor

Figura 51 – Imagem do agregado MX obtida por MEV/EDS



Fonte: autor

Conforme pode ser visualizado, as partículas, em geral, possuem morfologia semelhante, porém, em uma análise mais criteriosa podem ser identificadas algumas diferenças. Para agregados abaixo dos 2,00mm, o sistema AIMS não avalia a textura dos fragmentos, porém, pelas imagens, o agregado BA aparenta ter uma textura mais rugosa que os demais. Outra característica que os diferencia é a forma 3D. O agregado MX aparenta uma maior proporção de fragmentos plaquetários, vide composição mineralógica da rocha, composta por altos teores de micas. Estas conclusões corroboram que a morfologia do agregado sofre forte influência da mineralogia da rocha, principalmente em agregados miúdos (DIÓGENES, 2018; DIÓGENES *et al.*, 2021).

4.1.3 Resultados de Ensaios de Caracterização Química

A composição química dos agregados foi analisada com a técnica de MEV/EDS. Os resultados obtidos estão na Tabela 3, sendo que, para cada um dos agregados analisados, são apresentados a massa percentual de cada elemento químico assim como a de seu óxido correspondente.

Tabela 3 – Composição química dos agregados pela técnica de MEV/EDS em massa dos óxidos (%)

Elemento	G ES	G RJ	BA	MX	Óxido correspondente
Silício	58,017	67,699	52,831	57,216	SiO ₂
Ferro	9,996	6,369	15,013	11,502	FeO
Alumínio	14,294	12,916	14,879	18,267	Al ₂ O ₃
Cálcio	5,549	2,663	7,184	0,918	CaO
Potássio	4,025	4,361	1,666	4,701	K ₂ O
Magnésio	3,328	1,783	3,306	4,486	MgO
Sódio	2,584	2,840	3,347	1,862	Na ₂ O
Fósforo	-	-	0,813	-	P ₂ O ₅
Titânio	2,205	1,269	0,962	1,050	TiO ₂

Fonte: autor

Como já mencionado o granito pode ser classificado como uma rocha ácida, ou seja, possui uma alta concentração de silício em sua composição. Isso pode ser verificado a partir dos dados apresentados. Porém ressalta-se que há uma diferença significativa entre os dois granitos analisados, i.e., enquanto o Granito RJ possui aproximadamente 68% de óxido de silício em sua composição, o Granito ES tem cerca de 10% a menos, tendo teor próximo ao micaxisto. O basalto, no entanto, apresentou aproximadamente 53% de óxido de silício, reforçando que este material é proveniente de uma rocha básica e, possivelmente, é a que possui menor concentração do mineral quartzo. Estes resultados estão próximos aos resultados da classificação proposta por Metso Minerals (2005), conforme Quadro 1.

A composição química das rochas tem forte relação com a mineralogia, e funciona como indicador de algumas características das mesmas. Um exemplo, é a maior concentração de alumínio presente no micaxisto, rocha rica em minerais como as micas, que por sua vez, podem ter o alumínio em sua composição. O ferro é destaque na composição do basalto, sua concentração pode ser correlacionada à coloração mais escura do agregado, mas também à diferença de densidade do basalto, pois, dentre os elementos analisados, o ferro é o elemento de maior massa atômica e, assumindo que os agregados não se diferenciam muito com relação a porosidade, é compreensível que o basalto seja o mais denso.

A concentração de elementos como potássio, cálcio e sódio também são indicativos para uma futura análise mineralógica. A principal família de minerais formadores de

rochas são os feldspatos, silicatos que se diferenciam em grupos como os feldspatos alcalinos (ricos em potássio) ou os plagioclásios (possuindo maior concentração de cálcio ou sódio).

A química do agregado pode indicar como será sua adesividade ao ligante, principalmente em condições úmidas. Como já descrito, a presença do óxido de silício (SiO_2) é um forte indicativo de má adesividade ao ligante asfáltico. Entretanto, outros óxidos como os de alumínio (Al_2O_3), ferro (Fe_2O_3), magnésico (MgO) e cálcio (CaO) tendem a minimizar o dano por umidade por terem boa adesividade ao ligante (HORGNIER, 2011; CALA, 2019, FROSSARD, 2021). Dentre os quatro agregados, destaca-se o basáltico, que, além de possuir a menor proporção de silício em sua composição, é o que possui o maior teor de óxidos que tendem a contribuir para a adesividade ligante-agregado. De modo contrário, o agregado granítico RJ, além de conter o maior teor de silício, também possui os menores teores de ferro, alumínio, magnésio e cálcio, reforçando a ideia de que este agregado possui a pior adesividade dentre os quatro. No agregado BA estes óxidos em conjunto representam 76,4% da massa de silício, enquanto no G RJ 35,1%. Essa relação está apresentada na Tabela 4 para todos os agregados. Segundo estudos a adesividade ligante-agregado tem impacto na resistência à fadiga (VASCONCELOS et al., 2008; HOU et al., 2018; LUCAS JUNIOR et al. 2019). Portanto, considerando apenas a química do agregado, infere-se que a MAF_G_RJ teria vida de fadiga inferior às demais MAFs.

Tabela 4 – Relação de elementos que favorecem a adesividade pelo teor de silício em massa

Elemento	G ES	G RJ	BA	MX
Óxidos de alumínio, ferro, magnésio e cálcio	33,167	23,758	40,382	35,173
Silício	58,017	67,699	52,831	57,216
Relação entre o conjunto de óxidos de alumínio, ferro e magnésio com o óxido de silício	57,1%	35,1%	76,4%	62,1%

Fonte: autor

4.1.4 Ensaios de Caracterização Mineralógica

A caracterização mineralógica dos agregados se iniciou com a comparação visual dos dois agregados com o auxílio da lupa de mão, pela simplicidade do procedimento, e afim de visualizar se os agregados graníticos tinham diferenças significativas nas

proporções de seus minerais. Os resultados desta análise são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Proporção dos minerais determinada a partir da realização de inspeção visual

Descrição	Grupo de minerais	G ES (%)	G RJ (%)
Mineral claro, sem plano de clivagem, pode ser translúcido e apresenta brilho quando colocado sob a luz	Quartzo	33,0	52,4
Mineral claro, com plano de clivagem bem definido, e que apresenta brilho espelhado quando colocado sob a luz	Feldspato	44,9	34,4
Mineral com plano de clivagem mais bem definido e que se apresenta sob a forma placóide, pode ser claro ou preto	Mica	22,1	12,2
Minerais que não se encaixavam nas demais descrições, geralmente pretos, verdes ou avermelhados	Outros	-	1,0

Fonte: autor

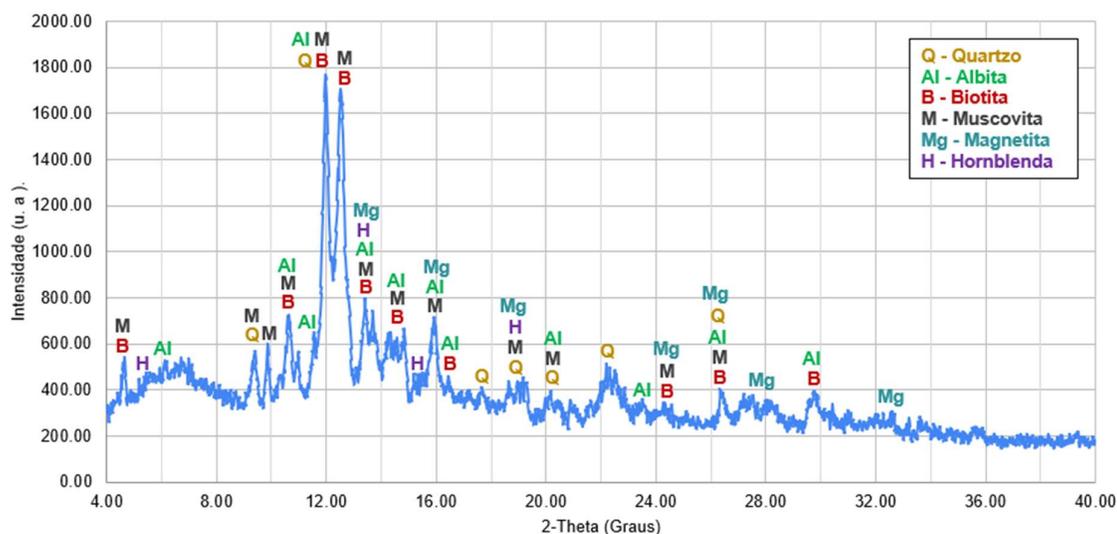
Os resultados demonstram que o agregado G RJ possui maior concentração de quartzo frente ao outro material granítico analisado, uma diferença de quase 20% entre os fragmentos foi observada.

As Figuras 52, 53, 54 e 55 correspondem aos difratogramas gerados a partir do ensaio de DRX. É possível identificar com qual ficha cristalográfica de mineral cada pico do difratograma foi correlacionado. Os resultados da análise semiquantitativa feita com o DRX corroboram as informações da análise visual, além de também caracterizar o basalto e o micaxisto quanto as suas composições mineralógicas. Comparando os difratogramas do G ES e do G RJ é possível perceber que o G RJ possui picos de quartzo com maiores intensidades frente ao G ES, como no caso de 2-theta 9,4° e 12°. Já o difratograma do G ES apresenta indícios de possuir maiores teores de mica e feldspatos, ao se comparar as intensidades de picos de biotita, muscovita e albita, como em 10,6°, 12,5° e 14,4°.

Dentre as rochas analisadas a única que foi correlacionada a um feldspato diferente da albita foi o basalto, pois, os feldspatos se dividem em diferentes minerais, dependendo da concentração de cálcio e sódio. Pela análise química, verificou-se que o agregado basáltico era o que possuía maior concentração de cálcio, o que reforça a escolha do mineral labradorita ao invés da albita. Também, é possível identificar picos de labradorita que não existem nos demais agregados, localizados

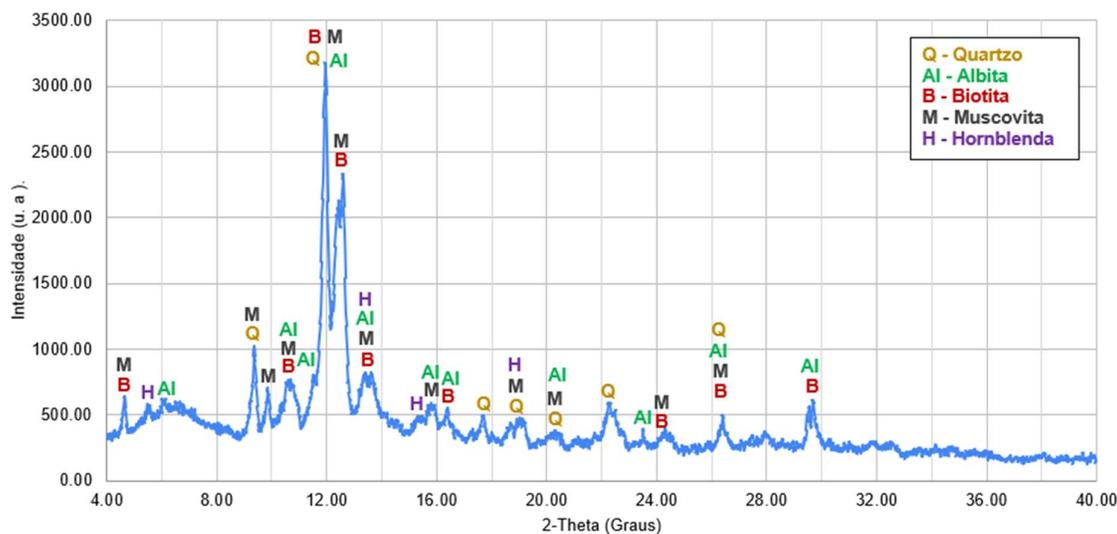
entre 2-theta de 22° e 23°. Também foram identificados alguns minerais acessórios, como anfibólios nos granitos, óxidos de ferro em formato de magnetita no G ES e no basalto, além do argilomineral caulinita presente no basalto.

Figura 52 – Difratoograma do agregado G ES



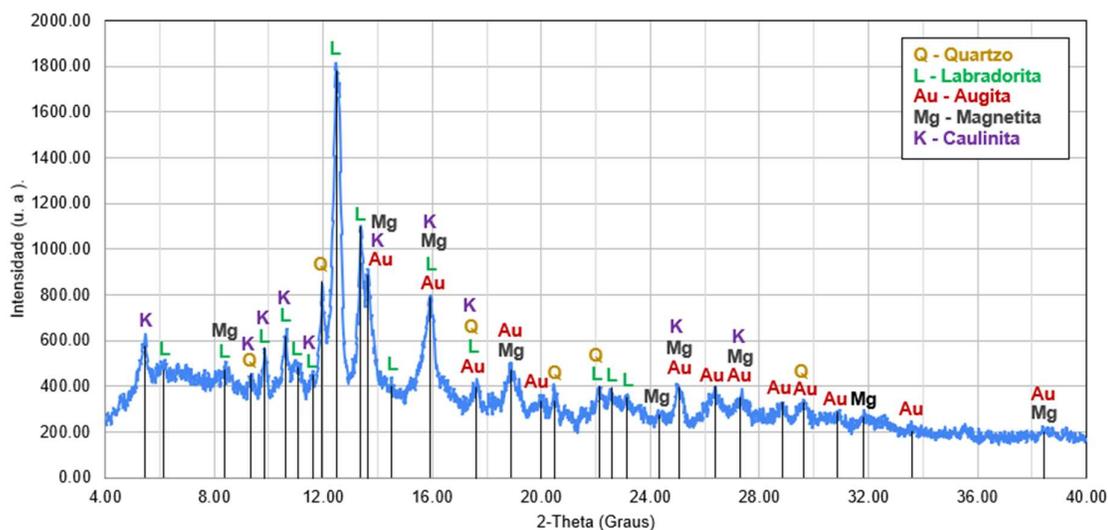
Fonte: autor

Figura 53 – Difratoograma do agregado G RJ



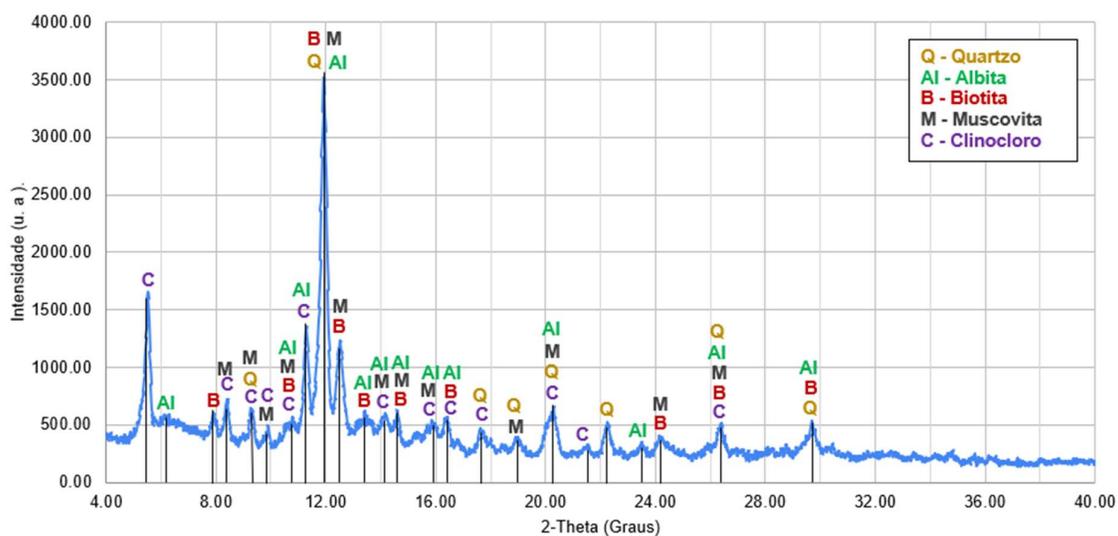
Fonte: autor

Figura 54 – Difratoograma do agregado BA



Fonte: autor

Figura 55 – Difratoograma do agregado MX



Fonte: autor

Os resultados semiquantitativos obtidos a partir da análise dos difratogramas e com o software *Match!* são apresentados na Tabela 6. Os resultados reforçam as diferenças entre os dois agregados graníticos, e apontam quais são os minerais essenciais e acessórios de cada agregado. A composição mineralógica dos agregados estudados está de acordo com a relatada pela bibliografia para rochas de mesma nomenclatura. Portanto, os granitos, conhecidos por serem uma rocha

trifásica, possuem os minerais quartzo, feldspatos e as micas como majoritários, assim como o micaxisto, porém com diferenças significativas nas proporções das micas. O basalto tem como minerais essenciais os piroxênios e os feldspatos.

Tabela 6 – Quantitativo aproximado dos minerais presentes nos agregados a partir da análise realizada com o uso dos difratômetros

Grupo de Minerais	Mineral	G ES	G RJ	BA	MX	Fórmula Química
Silicatos	Quartzo	24,7%	37,2%	5,5%	29,4%	SiO ₂
Silicatos (Feldspatos)	Albita	46,4%	44,9%	-	28,8%	(Na,K,Ca).Al.(Al,Si) ₃ O ₈
Silicatos (Feldspatos)	Labradorita	-	-	47,6%	-	(Na,K,Ca).Al.(Al,Si) ₃ O ₈
Silicatos (Micas)	Biotita	4,7%	3,5%	-	15,7%	K(Mg,Fe) ₃ (AlSi ₃ O ₁₁)(OH,F) ₂
Silicatos (Micas)	Muscovita	17,0%	10,1%	-	19,6%	KAl ₂ (Si ₃ Al)O ₁₀ (OH,F) ₂
Silicatos (Piroxênios)	Augita	-	-	25,9%	-	(Ca,Mg,Fe,Al) ₂ [(Al,Si)O ₃] ₂
Óxidos	Magnetita	1,1%	-	16,3	-	Fe ₃ O ₄
Silicatos (Anfibólio)	Hornblenda	6,1%	4,2%	-	-	Ca ₂ (Mg,Fe) ₄ Al(Si ₇ AlO ₂₂)(OH) ₂
Silicatos	Clinocloro	-	-	-	6,5%	(Mg,Al,Fe) ₆ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₈
Silicatos	Caulinita	-	-	4,6	-	Al ₄ (Si ₄ O ₁₀)(OH) ₈

Fonte: autor

Além de identificar as fases cristalinas dos agregados, o software também disponibiliza uma composição química com base nas fichas cristalográficas escolhidas. Cada ficha possui uma composição química e um arranjo. Com base no quantitativo apresentado, os dados são dispostos na Tabela 7.

Tabela 7 – Composição química aproximada dos agregados obtida pela análise com o uso do DRX

Elemento	G ES	G RJ	BA	MX
	Massa (%)	Massa (%)	Massa (%)	Massa (%)
Silício	32,27	35,34	21,19	30,94
Ferro	2,45	0,99	10,57	2,45
Alumínio	8,62	7,09	11,15	8,06

Calcio	0,51	0,35	8,57	0,00
Potássio	1,94	2,49	1,47	3,09
Magnésio	0,88	0,68	2,32	3,30
Sódio	4,24	3,25	1,05	2,60
Oxigênio	48,78	49,73	43,56	49,13

Fonte: autor

Ao correlacionar esses dados com a análise química por meio do MEV/EDS, notam-se algumas diferenças entre os valores, como apresentado na Tabela 8. No caso do elemento cálcio isso pode estar correlacionado ao fato de apenas ter sido escolhido fichas cristalográficas de uma única fase dos plagioclásios. Já a diferença de massa de ferro, se deve ao fato de que certos minerais possuem uma variação na proporção de seus elementos químicos. Neste caso, as fichas cristalográficas utilizadas para as micas não representam, com exatidão, a composição química destes minerais.

Tabela 8 – Diferenças na composição química dos agregados encontradas através dos resultados dos ensaios MEV/EDS e DRX

Elemento	G ES	G RJ	BA	MX
	Massa (%)	Massa (%)	Massa (%)	Massa (%)
Silício	-5.15	-3.69	+3.51	-4.20
Ferro	+5.32	+3.96	+1.10	+6.49
Alumínio	-1.05	-0.25	-3.28	+1.61
Cálcio	+3.46	+1.55	-3.44	+0.66
Potássio	+1.40	+1.13	-0.09	+0.81
Magnésio	+1.13	+0.40	-0.33	-0.60
Sódio	-2.32	-1.14	+1.43	-1.22
Oxigênio	-3.79	-2.69	+0.27	-3.76

Fonte: autor

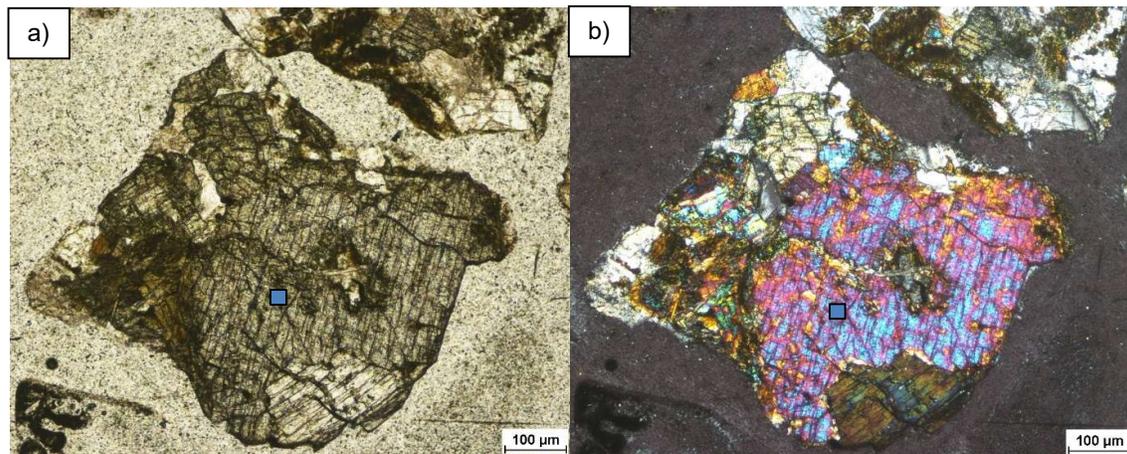
Porém, mesmo que os valores não sejam exatos, é possível observar qualitativamente as relações semelhantes entre as duas técnicas. Tanto na composição química aproximada obtida pela análise do DRX quanto a obtida pela análise dos dados do MEV/EDS, verifica-se que o agregado G RJ possui a maior concentração de silício, seguido do G ES, MX e o BA tendo a menor concentração. A menor concentração de ferro e alumínio no G RJ frente ao G ES e ao MX também contribui para a conclusão de que esta rocha possui menor concentração de micas

que as demais. Por fim os valores de cálcio e sódio também são coerentes, principalmente quando relacionados ao tipo de feldspato encontrado em cada agregado.

Foram confeccionadas lâminas petrográficas com os agregados de micaxisto e de basalto, para visualizar de forma microscópica como os minerais se organizam e ligam-se no interior de cada agregado. A metodologia geralmente utiliza rochas inteiras, porém, no caso do presente trabalho, a confecção das lâminas foi adaptada para a rocha britada.

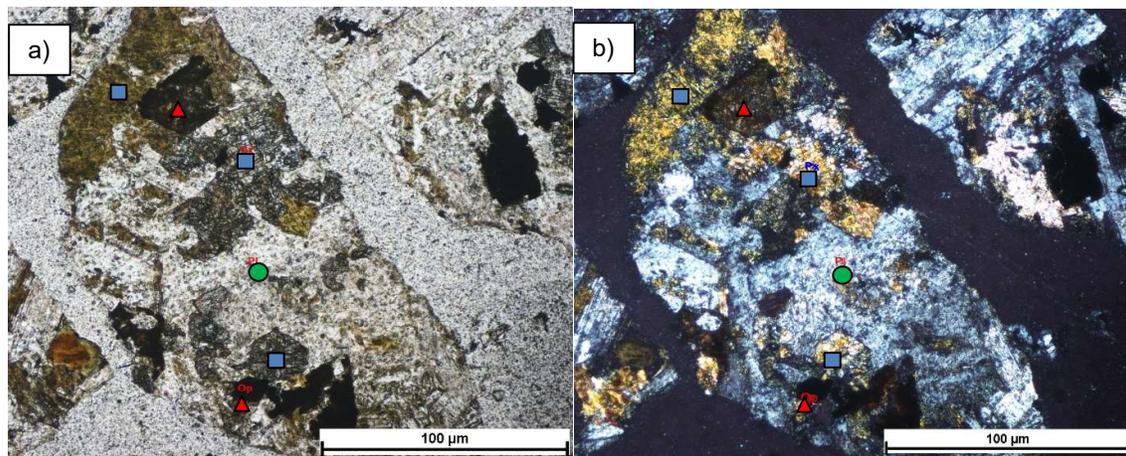
As Figuras 56, 57, 58, 59 são imagens de fragmentos do agregado basáltico, e as Figuras 60, 61 e 62 do micaxístico, sendo que as figuras identificadas por a) estão sob luz natural e b) sob luz polarizada. Nas imagens do basalto foram identificados minerais do grupo dos plagioclásios (círculos verdes), piroxênios (quadrados azuis) e opacos (como a magnetita, representado pelo triângulo vermelho), conforme a análise mineralógica feita por DRX. Na lâmina de agregado micaxístico foram observada uma predominância de quartzo (losangos amarelos), feldspatos e micas (cruz roxa), sendo que, este último grupo em formato característico de mica peixe, típico de rochas metamórficas.

Figura 56 – Fragmento de basalto 1



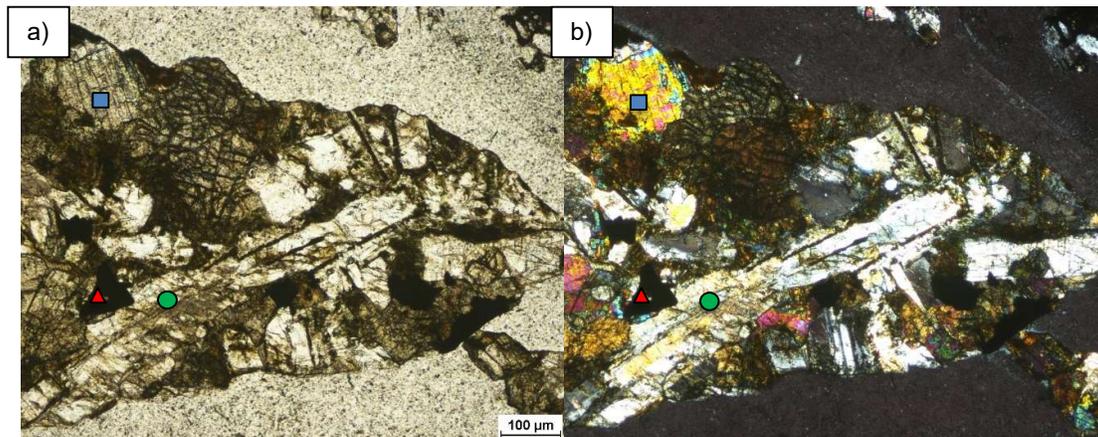
Fonte: autor

Figura 57 – Fragmento de basalto 2



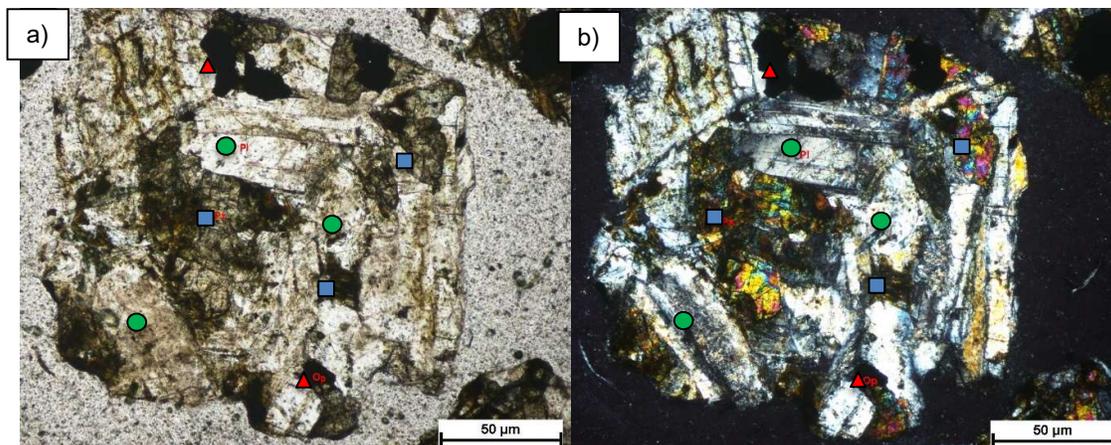
Fonte: autor

Figura 58 – Fragmento de basalto 3



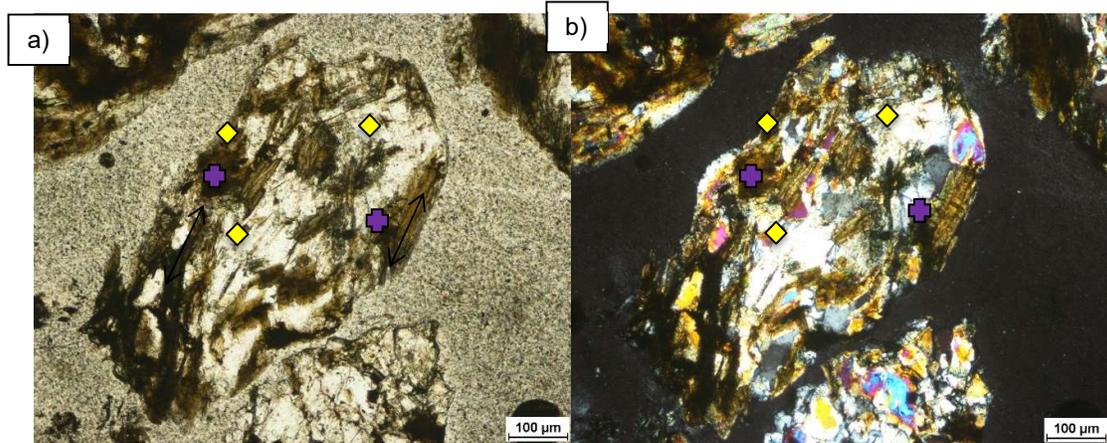
Fonte: autor

Figura 59 – Fragmento de basalto 4



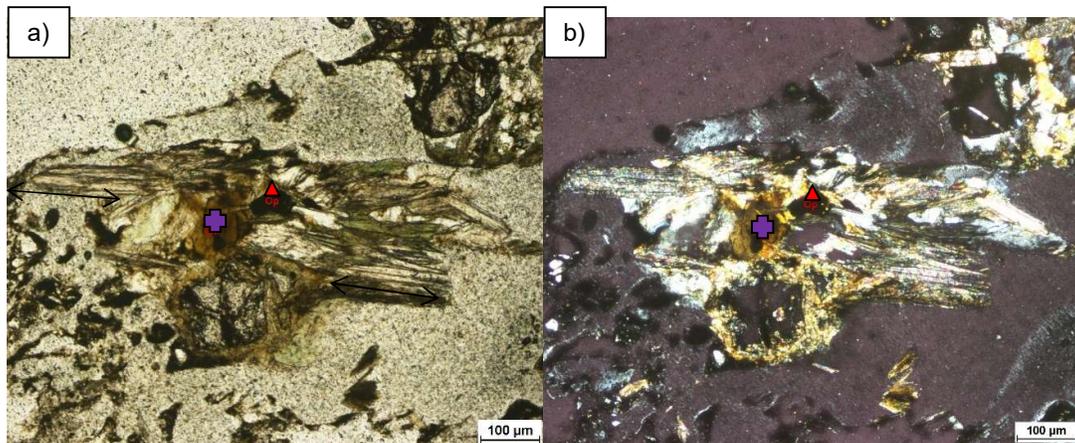
Fonte: autor

Figura 60 – Fragmento de micaxisto 1



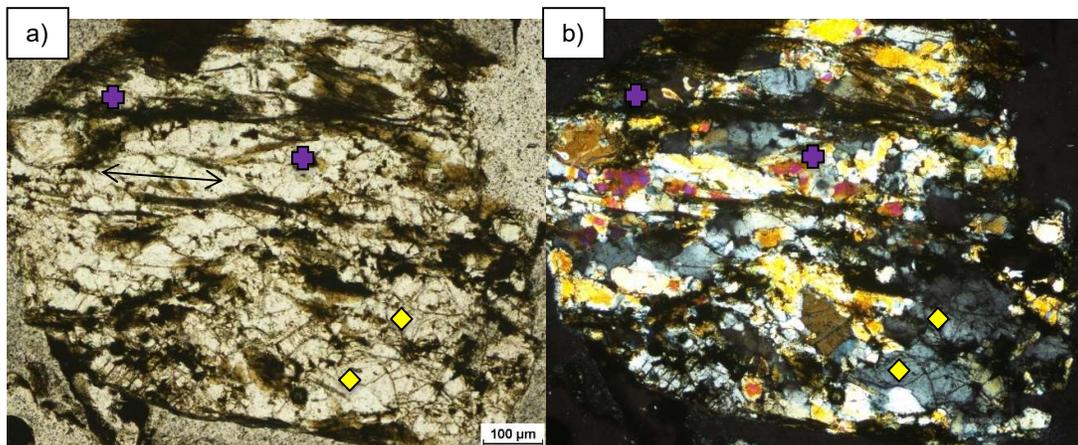
Fonte: autor

Figura 61 – Fragmento de micaxisto 2



Fonte: autor

Figura 62 – Fragmento de micaxisto 3



Fonte: autor

Em comparação, as duas rochas apresentam não apenas mineralogias distintas, mas também estruturas. Foi observada uma orientação na estrutura do agregado micaxístico, indicada nas imagens por setas, enquanto, o agregado proveniente de uma rocha magmática basáltica não apresentou orientação em sua estrutura. No agregado basáltico, há uma interface bem definida entre os minerais, geralmente formada por ângulos retos e incrustações que favorecem a resistência do agregado. Já a interface entre os minerais do micaxisto não estava tão bem definida, e, por conta da orientação, foram observados poucos ângulos e incrustações.

Entretanto, foi observada uma similaridade entre os dois agregados. Os minerais com maiores concentrações de metais como ferro, geralmente não estavam presentes na superfície do agregado. No basalto isso pode ser observado pela localização dos minerais opacos e no micaxisto pela distribuição das biotitas ou de um fragmento de mineral opaco encontrado. Portanto, a química pode não determinar com exatidão qual agregado possui a melhor adesividade ligante-agregado, pois, como a adesividade é definida pela interação entre o ligante e os minerais presentes na superfície, os compostos químicos que auxiliam na adesividade podem estar dispostos no interior do fragmento. No caso, ainda é dedutível que o agregado BA pode possuir uma melhor adesividade ao ligante, pois, mesmo que os minerais opacos tenham sido observados majoritariamente no interior dos fragmentos, os piroxênios presentes no basalto também são compostos por elementos que contribuem para a adesividade.

4.2 Dosagem e Compactação das MAFs

Como mencionado anteriormente, a dosagem das MAFs seguiu a metodologia proposta por Ng (2017). A princípio, utilizou o agregado (G ES) e ligante asfáltico (CAP 30/45) da mistura completa dosada por Frossard (2021). Portanto, a dosagem refere-se à MAF_G_ES. Para as outras MAFs, os agregados foram substituídos peneira a peneira pelos demais agregados estudados, mantendo-se o mesmo volume, para garantir a proporção volumétrica de agregados e ligante. O Quadro 8 reúne os parâmetros utilizados para a dosagem da MAF_G_ES. O teor de ligante encontrado para a MAF_G ES foi de 9,67%. Este valor está coerente com aquele

obtido para outras MAFs que utilizaram a mesma metodologia para dosagem (NG *et al.*, 2018; FONSECA *et al.*, 2019; CURADO *et al.*, 2021). Após a substituição do agregado G ES pelos demais agregados, a MAF_G RJ, MAF_BA e MAF_MX demandaram teores de ligante iguais à 10,25%, 9,69% e 10,27%, respectivamente. Não foram levados em consideração a absorção dos agregados e a finura dos mesma na determinação destes teores. A diferença entre eles é resultado da diferença na massa específica de cada agregado. Portanto, deve-se atentar à um possível efeito dessas variáveis nos ensaios reológicos das MAFs, principalmente da MAF_BA, que apresentou maior absorção e finura do agregado, o que demandaria mais ligante.

Quadro 8 – Parâmetros utilizados na dosagem da MAF_G_ES

Parâmetro	Ss	ρ_{agg}	Abs.	Kmac	Kmaf	T'maf
Valor Obtido	16,83	2,83	0,2%	3,77	6,06	9,67

Fonte: autor

A partir da dosagem, foi realizada a mistura e compactação dos corpos-de-prova. Todas as amostras foram submetidas a ensaios de fadiga com repouso para avaliar a resistência à fadiga e à autorregeneração das MAFs. Os parâmetros volumétricos encontrados são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Parâmetros volumétricos das MAFs

AMOSTRA	DMT	Gmb	Desvio Padrão Gmb	Vv (%)	Desvio Padrão Vv (%)
MAF_G_ES 01	2,427	2,323	0,004	4,27	0,13
MAF_G_ES 02		2,328		4,09	
MAF_G_RJ 01	2,289	2,187	0,008	4,49	0,35
MAF_G_RJ 02		2,203		3,77	
MAF_G_RJ 03		2,204		3,76	
MAF_G_RJ 04		2,189		4,37	
MAF_G_RJ 05		2,206		3,66	
MAF_BA 01	2,421	2,319	0,009	4,24	0,37
MAF_BA 02		2,313		4,48	
MAF_BA 03		2,335		3,55	

MAF_BA 04		2,330		3,75	
MAF_MX 01		2,191		4,17	
MAF_MX 02	2,286	2,197	0,004	3,88	0,20
MAF_MX 03		2,185		4,44	
MAF_MX 04		2,189		4,24	

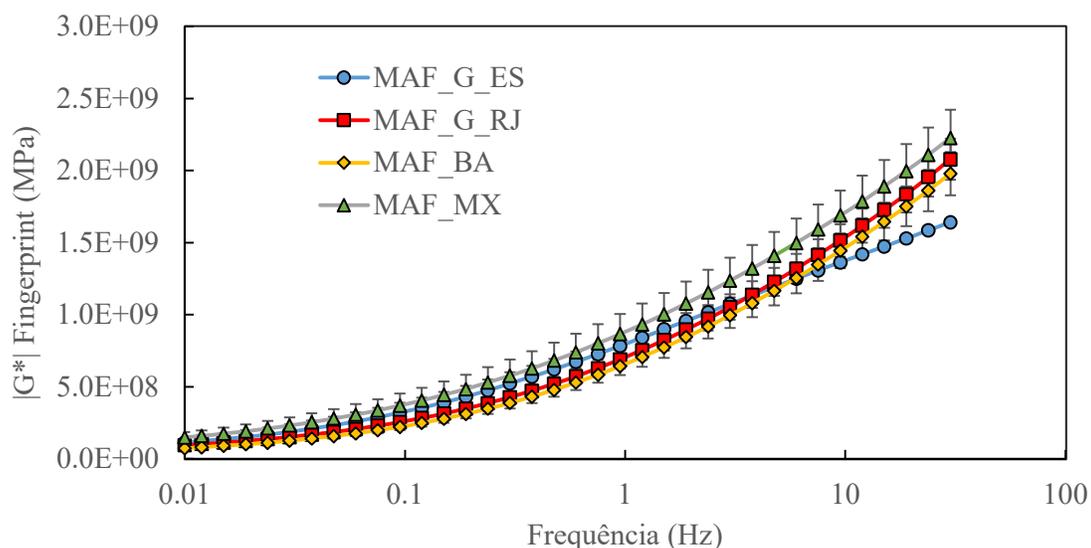
Fonte: autor

4.3 Ensaios oscilatórios

Como mencionado anteriormente, os ensaios oscilatórios realizados têm por objetivo avaliar o comportamento das MAFs quanto à fadiga. Para tanto, antes dos ensaios que promoveram a fadiga nas amostras, foi realizado o ensaio denominado “*fringerprint*” que consiste em uma varredura de frequência realizada na zona viscoelástica linear. Portanto, a amostra utilizada para este ensaio foi, posteriormente, levada para o ensaio de fadiga com aplicação de período de repouso.

Os resultados de cada MAF da variação módulo dinâmico médio pela frequência são apresentados pela Figura 63, onde as barras de erro representam o desvio padrão entre as amostras. Nota-se que as barras de erro se cruzam, demonstrando que as diferenças obtidas entre os resultados não foram expressivas. Segundo os ensaios de caracterização diferenças morfológicas dos agregados foram sucintas, portanto, infere-se que as diferenças nas propriedades químicas e mineralógicas também não tiveram grande impacto nas propriedades das MAFs ainda sem dano, pois, a maior diferença observada entre os agregados foi nas propriedades químicas e mineralógicas. Essa conclusão é reforçada por Bessa *et al.* 2015, que concluiu que o comportamento mecânico das misturas asfálticas é mais influenciado pela morfologia do que pela composição mineralógica.

Figura 63 – Variação do módulo complexo $|G^*|$ das MAFs durante ensaio de “Fingerprint”



Fonte: autor.

Entre os parâmetros extraídos do “fingerprint” para a aplicação do modelo S-VECD, destacam-se o módulo dinâmico a 10Hz ($|G^*|$ Fingerprint) e a taxa de evolução de dano (α). Os valores destes parâmetros podem ser observados na Tabela 10. Os valores de $|G^*|$ Fingerprint a 10 hz demonstram a rigidez das MAFs estão na mesma ordem de grandeza. Entretanto, foram observadas diferenças nos valores de α , diferenças estas que têm forte impacto no comportamento à fadiga.

Tabela 10 – Parâmetros extraídos do “Fingerprint” para aplicação do modelo S-VECD

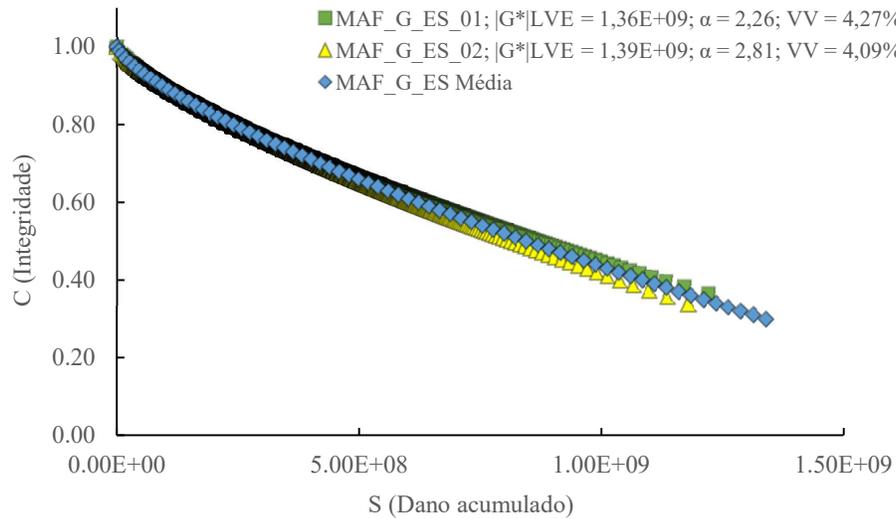
Elemento	MAF_G_ES	MAF_G_RJ	MAF_BA	MAF_MX
$ G^* $ Fingerprint à 10 Hz (MPa)	$1,37 \times 10^9$	$1,54 \times 10^9$	$1,46 \times 10^9$	$1,71 \times 10^9$
Taxa de evolução de dano (α)	2,534	2,314	2,140	2,631

Fonte: autor.

De posse dos parâmetros do “fingerprint”, o ensaio de varredura de tempo com repouso foi realizado, e então o modelo S-VECD foi aplicado, juntamente com o deslocamento das curvas como proposto por Karki *et al.* (2018), para a criação das curvas características de dano. As curvas de cada amostra são apresentadas nas Figuras 64, 65, 66 e 67. As curvas encontradas para cada amostra foram próximas,

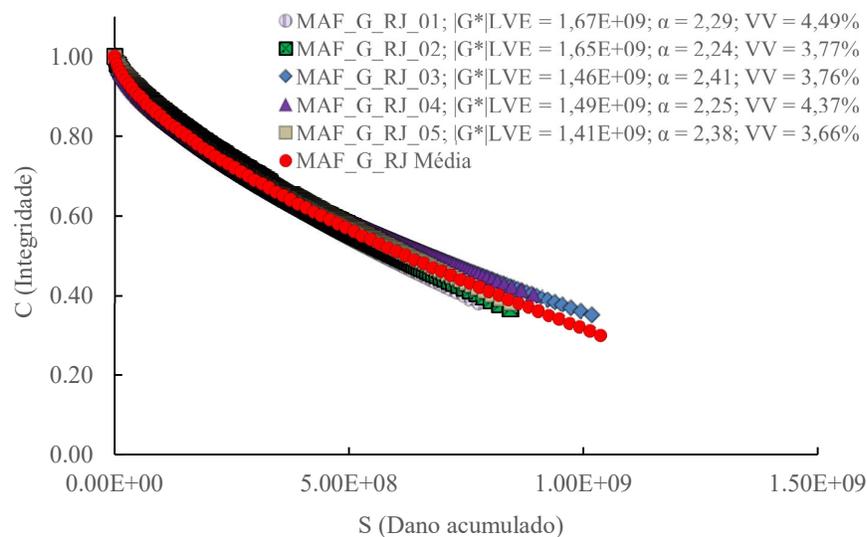
assegurando que elas são características para o material. Essas curvas foram obtidas com auxílio da ferramenta “*solver*” do Excel. Para aproximar a curva das amostras à equação “*power law*”, o erro padrão máximo adotado para essa aproximação foi de 5%.

Figura 64 – Curva característica de dano da MAF_G_ES



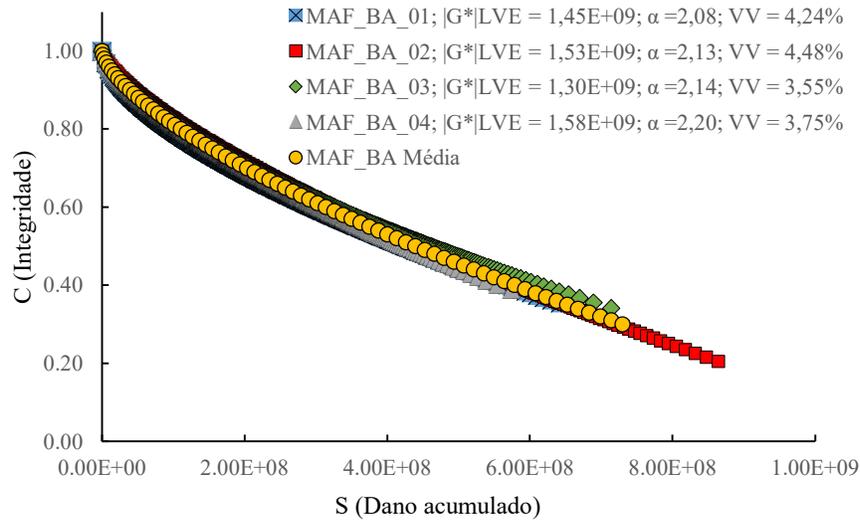
Fonte: autor

Figura 65: – Curva característica de dano da MAF_G_RJ



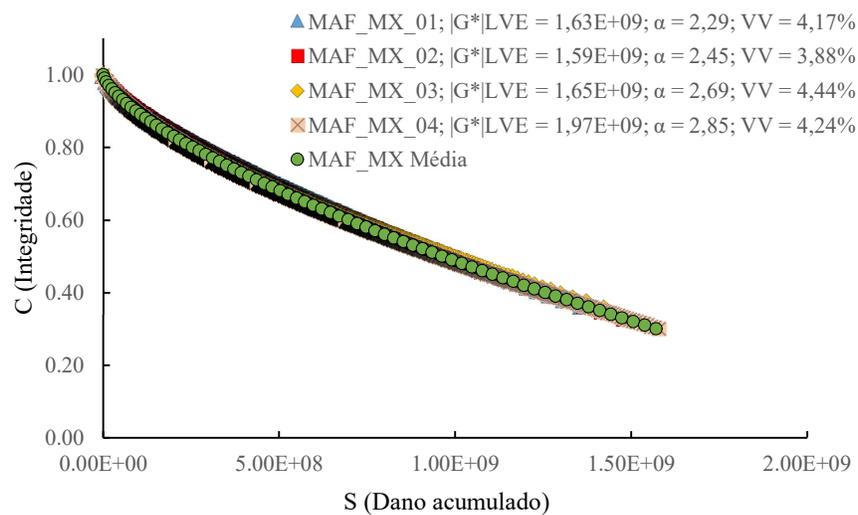
Fonte: autor

Figura 66 – Curva característica de dano da MAF_BA



Fonte: autor

Figura 67 – Curva característica de dano da MAF_MX



Fonte: autor

Além de apresentar a curva característica de dano (C vs. S) de cada amostra, também são apresentadas as curvas médias e representativas de cada MAF. Para garantir que a curva característica de dano média represente as curvas de cada amostra ensaiada, foi adotado um fator de forma de $\pm 5\%$. Este fator de forma é o resultado da comparação da área acima da curva de cada amostra com a curva característica da mistura, ou seja, quanto mais próximo de zero, mais próxima são as curvas. A

Tabela 11 apresenta os fatores de forma das curvas características de cada amostra quando comparadas as curvas médias correspondentes.

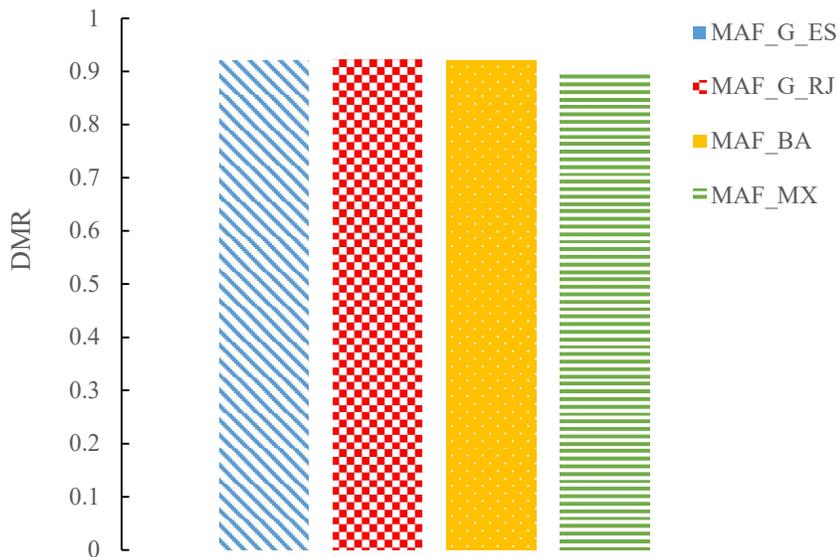
Tabela 11 – Fator de forma das curvas características de dano

MAF	Amostra	Fator de Forma (%)
MAF_G_ES	1	1,79
	2	2,47
MAF_G_RJ	1	4,87
	2	1,96
	3	4,48
	4	4,14
	5	3,00
MAF_BA	1	2,93
	2	0,68
	3	2,45
	4	0,84
MAF_MX	1	1,93
	2	0,54
	3	1,39
	4	0,99

Fonte: autor

Uma característica importante para uma análise comparativa entre as MAFs é o nível de tensão aplicado às amostras. Como são materiais diferentes e o procedimento utilizada pelo estudo aplicou o mesmo nível de tensão à todas as MAFs, elas podem estar em diferentes zonas de dano. Para assegurar que todas as MAFs estejam na mesma zona de dano, seria ideal a realização do ensaio de varredura de tensão nas MAFs, varrendo a amostra de tensões mais baixas até mais altas para determinar a zona viscoelástica linear de cada MAF. Porém, não foi possível realizar este ensaio devido ao tempo e equipamentos disponíveis. Entretanto, o fator DMR, i.e., a relação entre o módulo complexo do “*fingerprint*” (sem dano) na temperatura e frequência do ensaio de fadiga e o primeiro valor do módulo complexo obtido no ensaio de fadiga é um indício de que o carregamento aplicado levou a uma perda de integridade inicial semelhante em todas as MAFs, o que pode indicar um nível de dano semelhante aplicada às MAFs no início do ensaio. O Figura 68 apresenta o DMR médio para cada uma das MAFs, os valores médios ficaram entre 0,90 e 0,93, valores entendidos como próximos para assegurar que as MAFs apresentam taxas de dano semelhantes no início do ensaio.

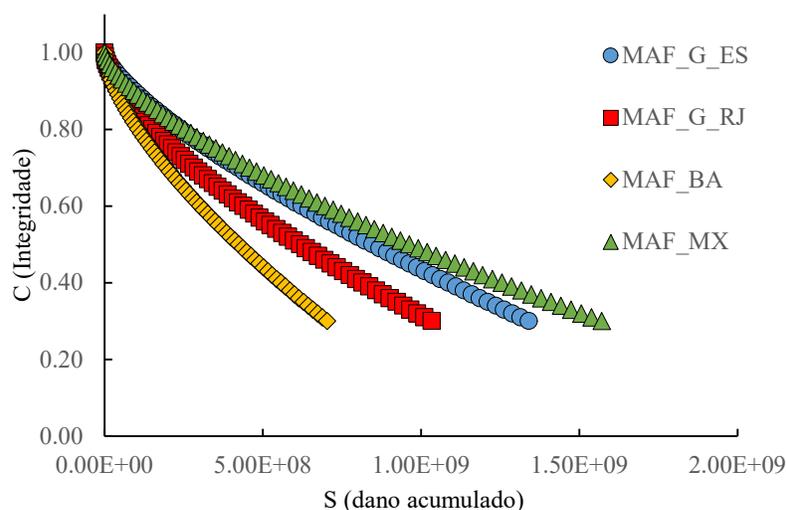
Figura 68 – DMR médio das MAFs analisadas



Fonte: autor

Na Figura 69 são apresentadas as curvas características de dano médias das MAFs estudadas. Em comparação, a MAF_G_ES e a MAF_MX obtiveram comportamento semelhante. Enquanto, a integridade da MAF_BA foi aquela que caiu mais rapidamente com o acréscimo do dano. Esse comportamento não era esperado, considerando-se que o agregado basáltico tenderia a apresentar uma melhor adesividade ao ligante em função da sua composição química (baixo teor de SiO_2 e presença de elementos que são favoráveis para a adesividade como Fe, Mg, Al e Ca). Entretanto, devido ao alto teor de finos (abaixo de 0,075mm) do agregado basáltico e a alta absorção do agregado pode ter levado a um filme de ligante inadequado para recobrimento das partículas nesta MAF, afetando seu comportamento reológico e resistência à fadiga. De forma contrária à MAF_BA, as demais MAFs seguiram com o comportamento esperado, sendo que a MAF_G_RJ a que possui o agregado com maior teor de silício ou do mineral quartzo, aquela que obteve o pior desempenho à fadiga.

Figura 69 – Curvas características de dano das MAFs analisadas



Fonte: autor

Para a representação gráfica das curvas características de dano das MAFs foram adotados coeficientes da equação “Power Law”, já apresentada pela Equação 9 com auxílio da função “*solver*” do Excel. Os valores destes coeficientes estão presentes na Tabela 12.

Tabela 12 – Parâmetros da “Power Law” das MAFs

	MAF_G_ES	MAF_G_RJ	MAF_BA	MAF_MX
C_{11}	1,505E-07	8,660E-07	9.219E-07	3,355E-07
C_{12}	0,731	0,655	0.663	0,687

Fonte: autor

Os coeficientes C_{11} e C_{12} também foram utilizados para o modelo de previsão de vida de fadiga das MAFs. Para o modelo, o critério de ruptura adotado para os cálculos foi quando a integridade (C) da amostra chegou à 0,5. Para a aplicação do modelo são calculados os parâmetros A e B, já apresentados pelas Equações 11 e 12, respectivamente. Os valores dos parâmetros para cada uma das MAFs estão na Tabela 13, enquanto as curvas do modelo são apresentadas na Figura 70.

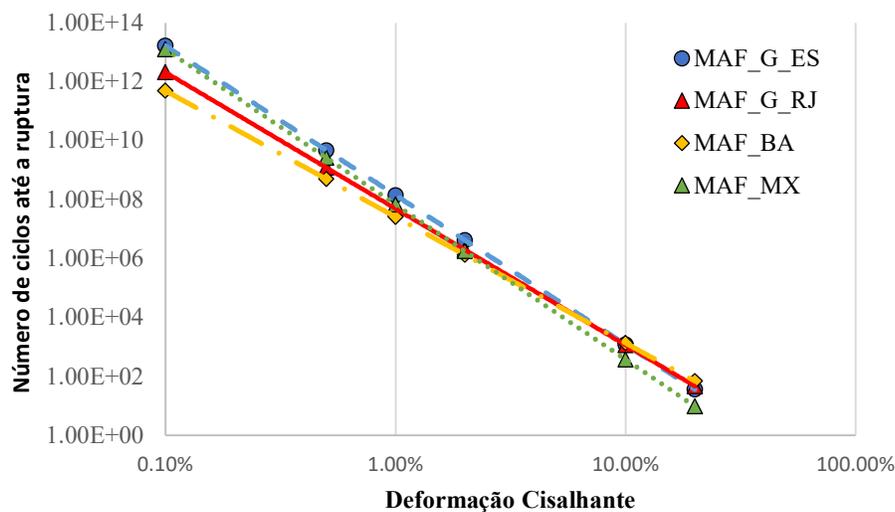
Tabela 13 – Parâmetros do modelo de fadiga das MAFs

	MAF_G_ES	MAF_G_RJ	MAF_BA	MAF_MX
A	1,577E+34	5.06E+31	3.744E+29	2,345E+35

B	5,069	4,628	4,280	5,262
---	-------	-------	-------	-------

Fonte: autor

Figura 70 – Curvas de Fadiga



Fonte: autor

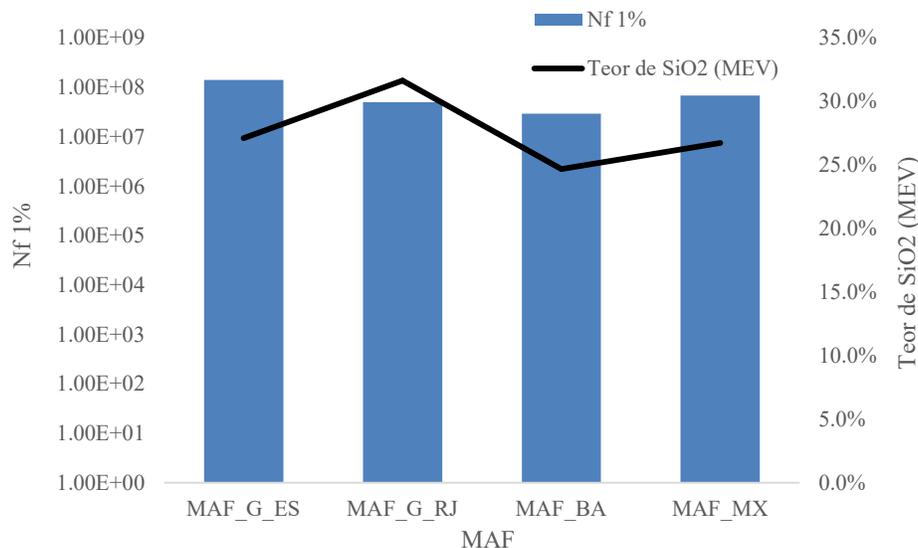
Pelo modelo de previsão de vida de fadiga é possível verificar a durabilidade do material dependendo da deformação cisalhante aplicada. Em deformação mais baixas que variam de 0,1% a 1% foi observado o mesmo comportamento das curvas características de dano, uma maior vida de fadiga para a MAF_G_ES e para a MAF_MX, enquanto a MAF_BA foi a mistura com menor número de ciclos até sua ruptura. Entretanto, o comportamento muda em deformações mais altas, pois, o dano da MAF_MX tende a evoluir mais rapidamente do que nas demais MAFs, enquanto o oposto acontece com a MAF_BA.

Como o tipo de ligante, o teor de ligante e a granulometria, foram mantidos constantes entre as amostras MAF_G_ES, MAF_G_RJ e MAF_MX, o que justifica o comportamento à fadiga distinto destes materiais é a estrutura mineral dos agregados ou a interação entre estes e o ligante. As MAF_G_ES e MAF_MX possuem agregados com composições de óxido de silício semelhante, entretanto, o esqueleto mineral dos agregados se diferencia, como visto, a rocha micaxística, de origem metamórfica, possui uma interface entre os minerais que tende a ser mais frágil do que em granitos, devido à orientação dos minerais e a disposição em placa dos grãos, o que justifica a

queda mais acentuada da curva de fadiga da MAF_MX do que nas curvas de MAFs com agregados graníticos. De outro modo, as curvas MAF_G_ES e MAF_G_RJ se diferenciam por conta da relação química entre ligante e agregado, pois, os agregados destas rochas possuem estrutura semelhante, entretanto, composições distintas. O agregado granítico G_RJ possui teor de quartzo mais elevado do que aquele encontrado no agregado granítico G_ES. Esse teor de quartzo é prejudicial para a adesividade ligante e agregado, resultando em uma maior vida de fadiga prevista para a MAF_G_ES se comparada a MAF_G_RJ. Por fim, a MAF_BA apresentou a menor vida de fadiga em baixas deformações, porém, com uma inclinação menor na curva de fadiga, o que resultou em uma vida de fadiga mais alta do que outras MAFs, quando submetidas a altas deformações;

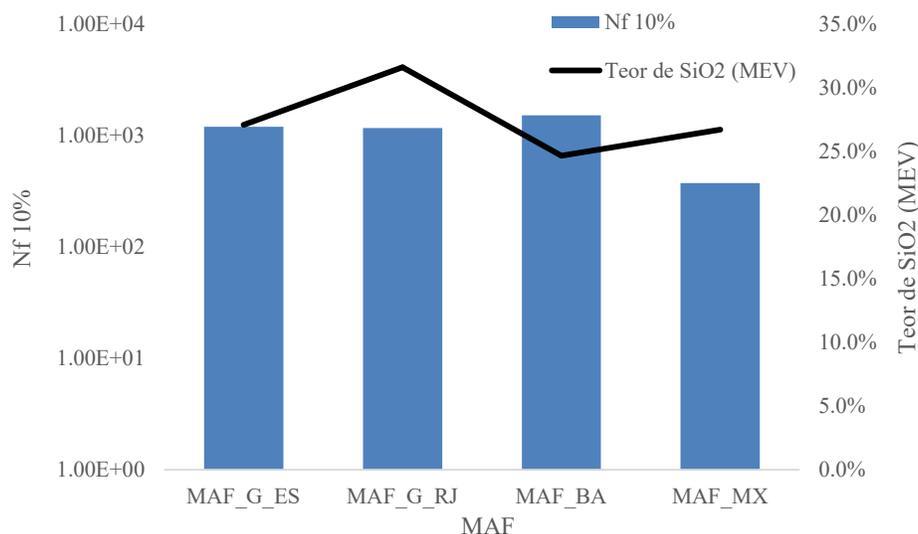
As Figuras 71 e 72 demonstram a vida de fadiga das MAFs quando a deformação é de 1% e de 10% e o teor de óxido de silício presente no seu agregado correspondente, demonstrando que a adesividade química do agregado não é determinante para o comportamento a fadiga.

Figura 71 – Número de ciclos até a ruptura das MAFs segundo modelo de fadiga com deformação controlada de 1% frente ao teor de silício



Fonte: autor

Figura 72 – Número de ciclos até a ruptura das MAFs segundo modelo de fadiga com deformação controlada de 10% frente ao teor de silício



Fonte: autor

Conclui-se que o comportamento à fadiga das misturas analisadas foi resultado do efeito completo que diversas variáveis desempenharam simultaneamente:

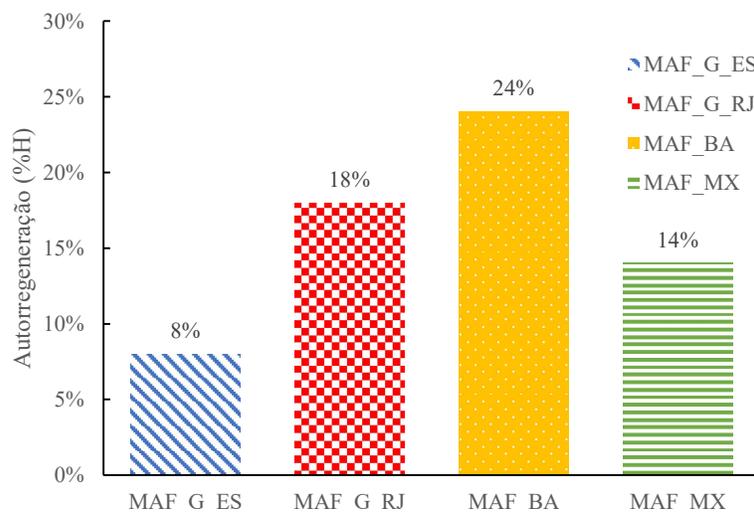
- (I) Os agregados BA e MX obtiveram maiores absorções, o que pode ter gerado uma espessura de filme de ligante menor na MAF_BA e MAF_MX, o que é prejudicial para a fadiga, pois, há menos ligante para auxiliar a dissipar os esforços atuantes sobre a mistura.
- (II) A morfologia dos granitos foi um pouco superior nas frações maiores. A textura dos agregados não foi avaliada, e também pode esta ter tido influência sobre a fadiga.
- (III) Foi observado que a disposição dos minerais na estrutura interna do grão de agregado é variável, e não necessariamente a mineralogia realizada nos fileres pelo ensaio de DRX, reflete a disposição dos agregados na superfície do agregado.
- (IV) A diferença na finura das frações menores que 2,00 mm do basalto pode ter gerado efeitos reológicos que não foram replicados nas demais MAFs

4.4 Autorregeneração

Como já mencionado, o ensaio de fadiga foi interrompido e o CP ficou em repouso por um período para possibilitar que a autorregeneração acontecesse. O ensaio foi interrompido quando a integridade (C) da amostra chegava no valor de 0,8. A amostra foi condicionada a 25°C durante 60 minutos.

A Figura 73 apresenta o valor da autorregeneração (%H) média para cada uma das MAFs. Como a autorregeneração é dependente de diversas variáveis já listadas, é comum que haja diferenças nos valores de autorregeneração deste trabalho quando comparado a outros. Entre os trabalhos que utilizaram amostras de MAF e metodologia semelhante, Karki *et al.* (2015) encontraram valores de autorregeneração entre 40% e 50% para 40 minutos de repouso, valores mais altos do que os obtidos nesta pesquisa, mesmo que com menos tempo de repouso. Li *et al.* (2020), que também utilizaram o mesmo procedimento em amostras de MAF obtiveram valores de autorregeneração entre 7% e 27%, ou seja, valores próximos aos encontrados nessa pesquisa, que variaram de 8% a 24%. Li *et al.* (2020) avaliou o uso de asfaltos naturais, que geralmente são mais viscosos, e, portanto, possuem dificuldade para se autorregenerar, assim como o ligante utilizado no presente estudo (CAP 30/45).

Figura 73 – Autorregeneração média das MAFs



Fonte: autor

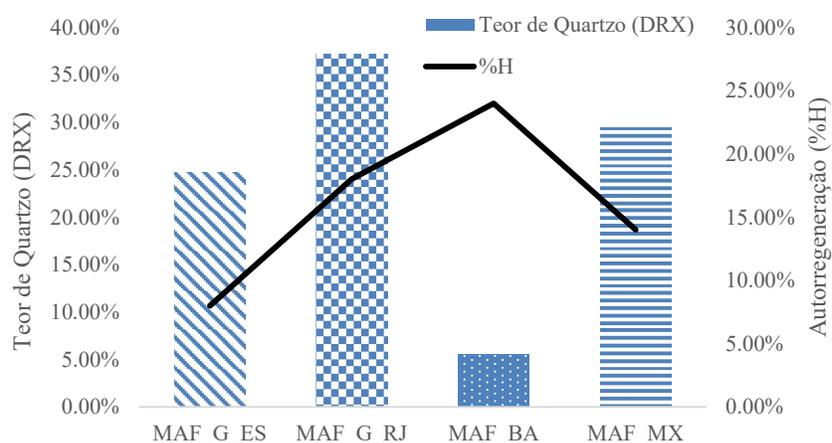
A MAF_BA foi aquela que apresentou a maior autorregeneração, seguida, consecutivamente, pelas MAF_G_RJ, MAF_MX e MAF_G_ES. Os resultados de autorregeneração foram confrontados com os ensaios de caracterização do agregado, para identificar como as variáveis que não foram controladas podem ter impactado nestes resultados.

Entre as características que não foram controladas está a granulometria dos fíleres da MAF_BA. Para esta MAF, em particular, a fração abaixo de 0,075mm apresentava partículas mais finas, que podem interagir com o ligante asfáltico e modificar seu comportamento reológico. Como o fenômeno de autorregeneração é herdado prioritariamente do ligante, quaisquer modificações neste podem impactar nos resultados de autorregeneração. Não foram encontrados estudos que avaliaram como a distribuição granulométrica dos fíleres afeta a autorregeneração. Porém, estudos já demonstram que quanto mais graúda a granulometria de um agregado maior a autorregeneração, pois, graduações mais graúdas possuem menor área superficial, o que resulta em menos zonas de interação entre agregado e ligante, zonas estas onde não ocorre autorregeneração. Note que, apesar de possuir uma maior quantidade de partículas finas, a MAF_BA ainda assim possui maior capacidade de autorregeneração, o que leva a outra hipótese, sobre o efeito da mineralogia e das propriedades químicas dos agregados nos resultados encontrados.

A MAF_BA, composta por agregado basáltico, teoricamente possui a melhor adesividade entre ligante e agregado por conta de seu baixo teor silício e quartzo, gerando fortes ligações nas interfaces entre o agregado e o ligante. Desta forma, durante o processo de fadiga, podem ser geradas mais fraturas coesivas do que adesivas, e são pelas fraturas coesivas que a autorregeneração é mais expressiva. As fraturas coesivas são resultadas da ruptura das cadeias moleculares do ligante, sendo assim, é compreensível que a MAF_BA possuir a maior regeneração dentre as quatro misturas. Entretanto, a relação entre a adesividade e a autorregeneração não é direta, pois, a MAF_G_RJ composta pelo agregado que teoricamente possui a pior adesividade, também demonstrou autorregeneração considerável. Uma baixa adesividade permite que haja mais movimentação do ligante, para que assim ocorra difusão. Desconsiderando a MAF_BA, a MAF_G_ES teve a pior autorregeneração dentre as 3 misturas, e foi a que apresentou o menor teor de quartzo, mesmo sendo uma rocha básica. Portanto, nesta MAF, acredita-se que aconteceram tanto trincas

coesivas quanto adesivas, porém, o ligante não tinha capacidade de se movimentar como na MAF_G_RJ ou MAF_MX. Deste modo, é justificado que as MAFs com o agregado de melhor adesividade possuam uma autorregeneração mais alta, seguido daquelas com os agregados que possuem os maiores teores de quartzo (Figura 74), e conseqüentemente, piores adesividades ao ligante asfáltico.

Figura 74 – Teor de quartzo frente à autorregeneração média das MAFs



Fonte: autor

Também foi realizada uma análise estatística a fim de verificar se há alguma correlação entre a autorregeneração e os parâmetros do modelo S-VECD. Para tal, foi utilizado o software SigmaPro para realizar uma análise de correlação de Pearson entre a autorregeneração de cada amostra e os seus parâmetros $|G^*|$, α , C_{11} e C_{12} . A correlação de Pearson utiliza valores numéricos para verificar se há relação linear entre eles, para tal, são calculados a significância (valor de P) e o coeficiente de correlação. Caso o valor de P seja um valor abaixo de 0,05, a relação entre as variáveis é significativa e, portanto, é feita a análise do coeficiente de correlação de Pearson, que por sua vez possui valores que variam entre +1 e -1, valores próximos de +1 indicam forte correlação linear positiva, enquanto valores próximos de -1 uma relação linear negativa, caso o valor seja próximo de zero, a distribuição das variáveis não possui correlação linear. A Tabela 14 contém o valor de P e o coeficiente de correlação de Pearson para cada uma das correlações analisadas.

Tabela 14 – Parâmetros da correlação de Pearson

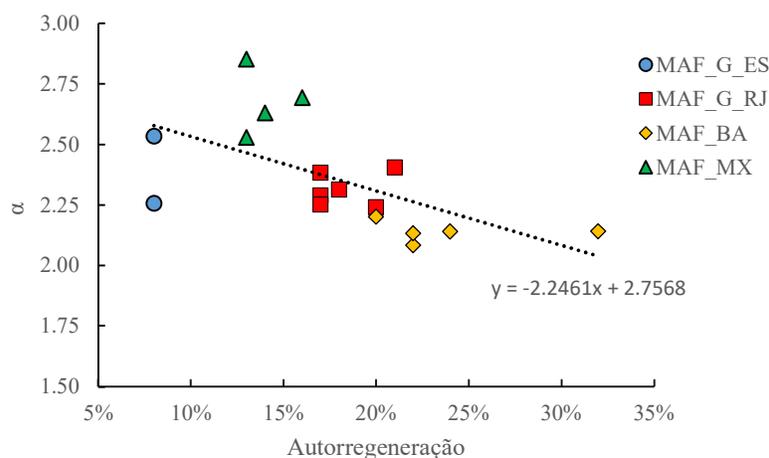
$ G^* _{\text{fingerprint}}$	%H x α	%H x C_{11}	%H x C_{12}
------------------------------	---------------	---------------	---------------

Valor de P	0,18900	0,04540	0,00341	0,0151
Coefficiente de correlação	-0,335	-0,491	0,668	-0,578

Fonte: autor

O valor de P indica que não há uma relação entre a autorregeneração e o $|G^*|_{\text{Fingerprint}}$, pois o valor é maior do que 0,05, entretanto, há uma relação significativa para as demais correlações, principalmente com o parâmetro C_{11} que apresentou o menor valor de P. Mesmo que a correlação entre a autorregeneração e α esteja abaixo de 0,05 o coeficiente de correlação de Pearson é um valor que está mais próximo de 0 do que das extremidades da escala, 1 ou -1, o que demonstra uma correlação fraca entre os parâmetros. Essa correlação é apresentada na Figura 75, para que a correlação fosse mais forte, os resultados deviam estar mais alinhados, ou seja, mais próximos da linha de tendência.

Figura 75 – Taxa de evolução de dano frente a autorregeneração de cada amostra



Fonte: autor

O coeficiente de correlação de Pearson para a correlação entre a autorregeneração e os parâmetros C_{11} e C_{12} da “Power Law” foram respectivamente, 0,668 e -0,578, isso significa que, a correlação é moderada, porém a relação com C_{11} é uma relação direta, isto é, os valores de C_{11} tendem a aumentar com o acréscimo da autorregeneração, enquanto para C_{12} comportamento é contrário. As Figuras 76 e 77 apresentam as relações dos parâmetros analisados.

Figura 76 – C₁₁ frente a autorregeneração de cada amostra

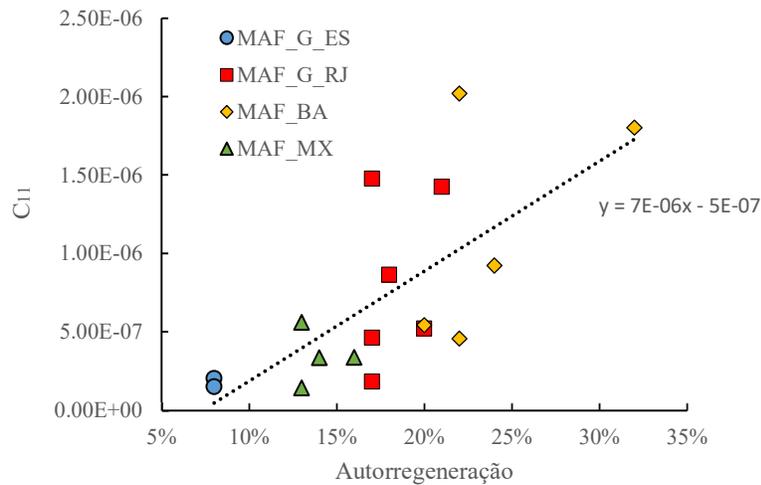
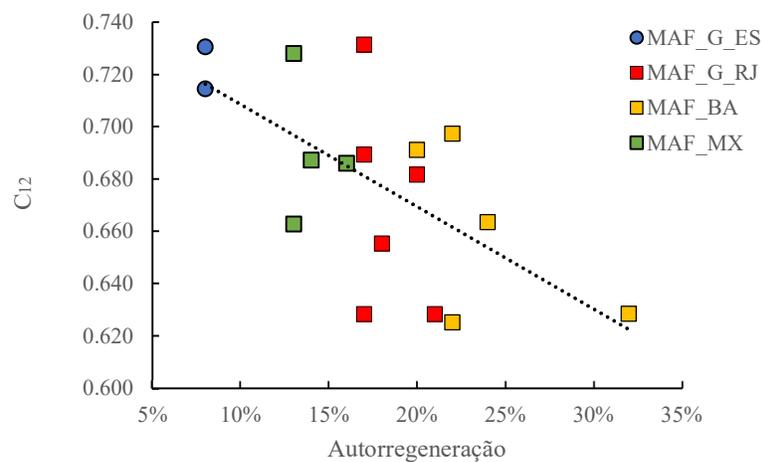


Figura 77 – C₁₂ frente a autorregeneração de cada amostra



Fonte: autor

Como expresso pelo coeficiente de correlação a relação entre %H e C₁₁ é mais forte, e como reflexo, os dados são mais agrupados e seguem uma tendência, demonstrando que pode haver uma relação entre os parâmetros de fadiga e a autorregeneração. Diante de outros trabalhos que avaliaram a autorregeneração pelo mesmo método, e que apresentaram os parâmetros C₁₁ e C₁₂, já se sabe que essa relação não é verdadeira para o envelhecimento do ligante e para a modificação do mesmo (YUE *et al.*, 2021).

5 CONCLUSÕES

A presente pesquisa teve por objetivo compreender como diferentes agregados afetam as propriedades de fadiga e autorregeneração de misturas asfálticas utilizando a escala MAF, tendo foco no impacto da composição química e mineralógica, buscando controlar as demais variáveis como granulometria, morfologia, teor e tipo de ligante, parâmetros do ensaio de fadiga, parâmetros do ensaio de autorregeneração. Para tal, foram realizados uma gama de ensaios de caracterização de agregados, para diferencia-los e identificar possíveis variáveis entre eles.

Após a caracterização dos agregados o trabalho realizou ensaios de fadiga com repouso em amostras de MAF, para gerar as curvas características de dano e curvas de fadiga, e por fim, obter a autorregeneração. A metodologia é recente e, por isso, pouco replicada em amostra de MAF. Esta se demonstrou prática e eficiente para estudos nesta escala. A influência dos agregados na autorregeneração de misturas asfálticas ainda foi pouco investigada, portanto, este estudo busca nortear futuros trabalhos que investigarão a fadiga e a autorregeneração em MAFs. Por meio dos resultados e discussões realizados é possível chegar às seguintes conclusões:

- Segundo a caracterização morfológica dos agregados miúdos todos os quatro agregados analisados possuíam angularidade e forma próximas, independentes da diferença mineralógica, origem da rocha ou procedimento de britagem;
- O britagem por impacto do agregado basáltico gerou partículas menores, enquanto os demais agregados possuíram a curva granulométrica do fileres praticamente iguais. O agregado basáltico possui uma curva com maior teor de finos, principalmente com partículas abaixo de 20 micrômetros. Esta característica refletiu nos resultados de caracterização física, como a absorção, demonstrando que mesmo em agregados miúdos o procedimento de britagem deve ser levado em consideração;
- A análise visual com lupa de mão forneceu resultados que deram indícios de como os agregados graníticos se diferenciariam quanto à sua proporção de quartzo, feldspatos e micas, sendo que o teor de mica foi o que mais se aproximou do resultado obtido pela análise de DRX. Este procedimento visual

demonstra que a característica trifásica do granito facilita sua caracterização de forma preliminar;

- A composição química obtida do procedimento de caracterização mineralógica por DRX foi próxima ao resultado do MEV/EDS, as variações encontradas são resultadas de fichas cristalográficas que não representam o mineral com exatidão. Portanto, as duas técnicas, em conjunto, funcionam de maneira complementar, o ensaio de MEV/EDS reforçou os resultados semiquantitativos do DRX;
- A metodologia utilizada para preparação da mistura e moldagem e compactação de MAFs se demonstrou prática e eficiente, resultando em amostras com pequenas variações nos seus Volumes de vazios (V_v) e outros aspectos;
- A adesividade química dos agregados não tiveram grande influência sobre as propriedades viscoelásticas das MAFs. Visto que os resultados do “*fingerprint*” foram semelhantes para todas as misturas.
- Segundo o modelo de previsão e vida de fadiga, a curva de fadiga da MAF_MX apresentou a maior inclinação dentre as quatro MAFs. Deste modo, a MAF_MX foi aquela que em altas deformações apresentou a menor vida de fadiga. A adesividade teórica dos agregados teve maior impacto na vida de fadiga em altas deformações, visto que neste caso, as MAFs com granitos tiveram vida de fadiga semelhantes, enquanto a MAF_BA, pelo modelo de previsão obteve a maior vida de fadiga;
- A metodologia utilizada para realizar os ensaios de fadiga e autorregeneração em conjunto se demonstrou eficiente, visto que as curvas características de dano possuíram pequenas variações entre as amostras, como visto pelo fator de forma de cada curva.
- As MAFs com agregados que contribuíam para a melhor e pior adesividade, MAF_BA e MAF_G_RJ respectivamente, foram aquelas que apresentaram os maiores níveis de autorregeneração. Portanto, aparentemente, a autorregeneração é afetada pela adesividade agregado-ligante de forma diferenciada. Pressupõe-se que, de forma mais benéfica, uma boa adesividade ao agregado, leva a um processo de trincamento mais coesivo que adesivo.

Este tipo de trincamento tende a ser mais facilmente recuperado, levando a maiores valores de autorregeneração. Por outro lado, os resultados demonstraram que uma má adesividade não necessariamente está relacionada à baixos valores de autorregeneração. Em agregados com baixa adesividade, o ligante está livre para se movimentar, contribuindo para que a difusão das trincas coesivas. Sendo assim, conclui-se que há uma relação complexa entre a autorregeneração e a adesividade ligante-agregado que precisa ser melhor compreendida.

- Foi encontrada uma relação entre os parâmetros C_{11} e C_{12} da equação “Power Law’ com os valores de autorregeneração correspondentes de cada MAF. Ainda assim são necessários mais estudos para assegurar que essa relação é verdadeira para misturas com diferentes agregados, porém com o mesmo ligante. Caso se confirme, a relação poderá ser utilizada para estimar como a autorregeneração da mistura irá se comportar com determinado agregado a partir de ensaios de fadiga.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

A partir das conclusões obtidas pela presente pesquisa sugere-se para futuros trabalhos:

- Utilizar outros agregados com mineralogias distintas das que foram abordadas neste estudo, como seixo, calcário, escórias, entre outros.
- É fundamental que seja incluído nos ensaios de caracterização dos agregados, um ensaio que determine quantitativamente a adesividade ligante-agregado, para assegurar a relação desta com a morfologia e química do agregado.
- Otimizar o procedimento de confecção de lâminas delgadas com agregados britados e observar a dimensão dos minerais e buscar correlações dos mesmos com a granulometria do agregado.
- Realizar os ensaios oscilatórios em um número maior de amostras.
- Utilizar a mesma metodologia com adição de mais períodos de repouso (mais curtos e longos) e aplicá-los em outros momentos além de quando a

integridade for igual a 80%. Com isso, a curva de autorregeneração pode ser traçada para determinar o nível máximo que cada mistura pode atingir.

- Investigar outros fatores que afetam a autorregeneração em escala MAF, como a temperatura, umidade, envelhecimento e outros.
- Confirmar se a relação entre os parâmetros da “*power law*” e a autorregeneração se repete, com a realização de ensaios com outros agregados e ligantes.
- Correlacionar os resultados obtidos em MAF com outras escalas.

6 REFERÊNCIAS

ABO-QUDAIS, S.; SULEIMAN, A. **Monitoring fatigue damage and crack healing by ultrasound wave velocity**. *Nondestructive Testing and Evaluation*, v. 20, n. 2, p. 125-145, 2005.

AL-MANSOORI, T., NORAMBUENA-CONTRERAS, J., & GARCIA, A. **Effect of capsule addition and healing temperature on the self-healing potential of asphalt mixtures**. *Materials and Structures*, 51(2), 1-12, (2018).

ASADI, B.; TABATABAEE, N. **Alteration of initial and residual healing potential of asphalt binders due to aging, rejuvenation, and polymer modification**. *Road Materials and Pavement Design*, p. 1-21, 2020.

ASHOURI, M. **Modeling microdamage healing in asphalt pavements using continuum damage theory**. North Carolina State University, 2014.

ASHOURI, M.; WANG, Y.; CHOI, Y. T.; KIM, Y. R. **Development of healing model and simplified characterization test procedure for asphalt concrete**. *Construction and Building Materials*, v. 271, p. 121515, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605:2017: Cimento portland e outros materiais em pó – determinação da massa específica**. Rio de Janeiro, Brasil, 2017.

ARRAMBIDE, J.; DURIEZ, M. **Liants routiers et Enrobés: matériaux de protection, plâtre, agglomérés, Bois**. Editions du Moniteur des Travaux Publics ("Les Manuels de l'Ingénieur et du Technicien de Batiment et de Travaux Publics"). Paris: Dunod, 1959.

ARSHADI, A.; BAHIA, H. **Development of an image-based multi-scale finite-element approach to predict mechanical response of asphalt mixtures**. *Road Materials and Pavement Design*, v. 16, n. sup2, p. 214-229, 2015.

AYAR, P.; MORENO-NAVARRO, F.; RUBIO-GÁMEZ, M. C. **The healing capability of asphalt pavements: a state of the art review**. *Journal of Cleaner Production*, v. 113, p. 28-40, 2016.

AYAR, P.; MORENO-NAVARRO, F.; SOL-SÁNCHEZ, M.; RUBIO-GÁMEZ, M. C. **Exploring the recovery of fatigue damage in bituminous mixtures: the role of rest periods**. *Materials and Structures*, v. 51, n. 1, p. 1-10, 2018.

BABADOPULOS, L. F. D. A.; FERREIRA, J. L. S.; SOARES, J. B.; NASCIMENTO, L. A. H. D.; CASTELO BRANCO, V. T. **Aging-effect incorporation into the fatigue-damage modeling of asphalt mixtures using the S-VECD model**. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 28, n. 12, p. 04016161, 2016.

BABADOPULOS, L. F. D. A.; Orozco, G.; Sauzeat, C.; Di Benedetto, H. **Reversible phenomena and fatigue damage during cyclic loading and rest periods on bitumen**. *International Journal of Fatigue*, v. 124, p. 303-314, 2019.

BAGLIERI, O.; TSANTILIS, L.; SANTAGATA, E. **Evaluation of healing potential of bituminous binders using a viscoelastic continuum damage approach**. *Construction and Building Materials*, v. 184, p. 344-350, 2018

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.

BESSA, I. S.; CASTELO BRANCO, V. T.; SOARES, J. B.; NETO, J. A. N. **Aggregate shape properties and their influence on the behavior of hot-mix asphalt**. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(7), 04014212, 2015

BOEIRA, F. D.; **Estudo da rigidez, da deformação permanente e da fadiga de misturas asfálticas com ligantes convencionais e modificados**. Tese de doutorado em engenharia civil. Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS). Santa Maria, Rio Grande do Sul – RS, Brasil, 2018.

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*, 216, 661-672, 2019.

CANESTRARI, F.; VIRGILI, A.; GRAZIANI, A.; STIMILLI, A. **Modeling and assessment of self-healing and thixotropy properties for modified binders**. *International Journal of Fatigue*, v. 70, p. 351-360, 2015.

CASTELO BRANCO, V. T. F. **An unified method for the analysis of nonlinear viscoelasticity and fatigue cracking of asphalt mixes using the dynamic**

mechanical analyzer. Tese de doutorado - Texas A&M University. College Station, TX, 2008.

CASTRO, M.; SÁNCHEZ, J. A. **Fatigue and healing of asphalt mixtures: discriminate analysis of fatigue curves**. Journal of transportation engineering, v. 132, n. 2, p. 168-174, 2006.

CNT – CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Boletins técnicos: pesquisa CNT de rodovias – 2021** – Brasília: CNT, 2021.

COUTINHO, R. P.; PAMPLONA, T. F.; CASTELO BRANCO, V. T. F.; SOARES, J. B.; MATEOS, A. **Multiscale approach for characterization of asphaltic materials designed in Brazil and Spain**. In 11th International Conference on Asphalt Pavements–ISAP, 2010.

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

CURADO, T. S.; KLUG, A. B.; PIOLI, J. H. G.; NARDO, R. C.; FAXINA, A. L.; TEIXEIRA, E. S. L.; REZENDE, R. R. **Study of maximum specific gravity of fine aggregate matrices: a comparison of sample sizes and density determination procedures**. Anais do 35º Congresso da ANPET, 2021.

DANIEL, J. S.; KIM, Y. R. **Laboratory evaluation of fatigue damage and healing of asphalt mixtures**. Journal of Materials in Civil Engineering, v. 13, n. 6, p. 434-440, 2001.

DANIEL, J. S.; KIM, Y. R. **Development of a simplified fatigue test and analysis procedure using a viscoelastic, continuum damage model (with discussion)**. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, v. 71, 2002.

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

DIÓGENES, L.; MAIA, R.; BESSA, I.; CASTELO BRANCO, V. T. F.; NETO, J. N.; SILVA, F. **The influence of crushing processes and mineralogy of aggregates on their shape properties and susceptibility to degradation.** Construction and Building Materials, 284, 122745, 2021;

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT 031/2006-ES: Pavimentos flexíveis – concreto asfáltico – especificação de serviço.** Rio de Janeiro, p.14. 2006.

DNIT - 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.

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT 411/2019-ME: Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Massa específica, densidade relativa e absorção de agregado miúdo para misturas asfálticas – Método de ensaio.** Rio de Janeiro, p.10. 2019

FONSECA, J. F. **Efeitos do resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais e escória de aciaria como fileres na rigidez viscoelástica linear e características de fratura da matriz de agregados finos.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). Vitória. ES, 2016.

FREIRE, R. A. **Evaluation of the coarse aggregate influence in the fatigue damage using fine aggregate matrices with different maximum nominal sizes.** Universidade Federal do Ceará (UFC). Fortaleza, CE, 2015.

FREIRE, R. A.; BABADOPULOS, L. F. A. L.; CASTELO BRANCO, V. T. F.; BHASIN, A. **Aggregate maximum nominal sizes' influence on fatigue damage performance using different scales.** Journal of Materials in Civil Engineering, 2017.

FREIRE, R. A.; COUTINHO, R. P.; CASTELO BRANCO, V. T. F. **Uso do S-VECD para construção de curvas características de dano de misturas asfálticas finas usando ensaios de varredura linear de amplitudes de deformação.** XXIX ANPET: Ouro Preto, Brazil, 2015.

FROSSARD, R M. **Influência da adesividade ligante-agregado nas propriedades de fratura de misturas asfálticas sujeitas ao dano por umidade.** Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). Vitória, ES. 2021.

FROSSARD, R. M.; TEIXEIRA, J. E. S. L.; & KIM, Y. R. **Effects of aggregate/filler characteristics on semi-circular bend fracture parameters of asphalt concrete mixtures subject to moisture damage.** Transportation Research Record, 2022.

GANJEI, M. A.; AFLAKI, E. **Application of nano-silica and styrene-butadiene-styrene to improve asphalt mixture self healing.** International Journal of Pavement Engineering, v. 20, n. 1, p. 89-99, 2019.

GARCÍA, Á. **Self-healing of open cracks in asphalt mastic.** Fuel, v. 93, p. 264-272, 2012.

Horgnies, M.; Darque-Ceretti, E.; Fezai, H.; Felder, E. **Influence of the interfacial composition on the adhesion between aggregates and bitumen: Investigations by EDX, XPS and peel tests.** International Journal of Adhesion and Adhesives, 31(4), 238-247, 2011.

HOU, Y.; JI, X.; LI, J.; LI, X. **Adhesion between asphalt and recycled concrete aggregate and its impact on the properties of asphalt mixture.** Materials, 11(12), 2528, 2018.

HUANG, W.; LV, Q.; XIAO, F. **Investigation of using binder bond strength test to evaluate adhesion and self-healing properties of modified asphalt binders.** Construction and Building Materials, v. 113, p. 49-56, 2016.

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.** 174 f. Tese de Doutorado em Engenharia de Transportes -Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará, 2018.

ISAILOVIĆ, I.; WISTUBA, M. P.; FALCHETTO, A. C. **Investigation on mixture recovery properties in fatigue tests.** Road Materials and Pavement Design, v. 19, n. 5, p. 1230-1240, 2018.

KARKI, P. **An integrated approach to measure and model fatigue damage and healing in asphalt composites**. Tese de doutorado, University of Texas at Austin, Austin, TX. 2014

KARKI, P.; BHASIN, A.; UNDERWOOD, B. S. **Fatigue performance prediction of asphalt composites subjected to cyclic loading with intermittent rest periods**. Transportation Research Record, v. 2576, n. 1, p. 72-82, 2016.

KARKI, P.; LI, R.; BHASIN, A. **Quantifying overall damage and healing behavior of asphalt materials using continuum damage approach**. International Journal of Pavement Engineering, v. 16, n. 4, p. 350-362, 2015.

KAZEMI, M.; GOLI, A.; NASIMIFAR, M. **Evaluation of the self-healing performance of polyurethane-modified bitumen using bitumen bond strength (BBS) test and CT scan**. International Journal of Pavement Research and Technology, v. 14, n. 2, p. 168-173, 2021.

KHIAVI, A. K.; GHANBARI, A.; RASOULI, R. **Self-healing and fatigue performance of poly 2-hydroxyethyl methacrylate modified bitumen**. Construction and Building Materials, v. 273, p. 121688, 2021.

KIM, Y. R.; LITTLE, D. N. **Development of specification-type tests to assess the impact of fine aggregate and mineral filler on fatigue damage**. Texas Transportation Institute, Texas A & M University System, 2005.

KIM, Y. R.; LITTLE, D. N.; LYTTON, R. L. **Fatigue and healing characterization of asphalt mixtures**. Journal of materials in Civil Engineering, v. 15, n. 1, p. 75-83, 2003.

KUTAY, M. E.; LANOTTE, M. **Viscoelastic continuum damage (VECD) models for cracking problems in asphalt mixtures**. International journal of pavement engineering, v. 19, n. 3, p. 231-242, 2018.

LEE, H. J.; DANIEL, J. S.; KIM, Y. R. **Continuum damage mechanics-based fatigue model of asphalt concrete**. Journal of materials in Civil Engineering, 12(2), 105-112, 2000.

LEE, K.; CASTORENA, C.; KIM, Y. R. **Improving the reliability of damage characteristic curves in the simplified viscoelastic continuum damage model**. Transportation Research Record, 2672(28), 493-502, 2018.

LI, R.; KARKI, P.; HAO, P. **Fatigue and self-healing characterization of asphalt composites containing rock asphalts**. Construction and Building Materials, v. 230, p. 116835, 2020.

LUCAS JÚNIOR, J. L. O. **Influência da adesividade agregado-ligante no trincamento por fadiga de misturas asfálticas**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Ceará (UFC). Fortaleza. CE, 2018.

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

LUO, X. **Characterization of fatigue cracking and healing of asphalt mixtures**. Vol. 73, No. 12, 2012.

LV, Q.; HUANG, W.; XIAO, F. **Laboratory evaluation of self-healing properties of various modified asphalt**. Construction and Building Materials, v. 136, p. 192-201, 2017.

LV, Q.; HUANG, W.; ZHU, X.; XIAO, F. **On the investigation of self-healing behavior of bitumen and its influencing factors**. Materials & Design, v. 117, p. 7-17, 2017.

MANNAN, U. A.; AHMAD, M.; TAREFDER, R. A. **Influence of moisture conditioning on healing of asphalt binders**. Construction and Building Materials, v. 146, p. 360-369, 2017.

Match! - Phase Analysis using Powder Diffraction, Version 3.12, Crystal Impact - Dr. H. Putz & Dr. K. Brandenburg GbR, Kreuzherrenstr. 102, 53227 Bonn, Alemanha, <https://www.crystalimpact.de/match>.

MAZZONI, G.; STIMILLI, A.; CANESTRARI, F. **Self-healing capability and thixotropy of bituminous mastics**. International Journal of Fatigue, v. 92, p. 8-17, 2016.

METSO MINERALS. **Manual de britagem**. 6. ed. São Paulo: Metso Brasil Indústria e Comércio Ltda., 2005.

MICAELO, R.; PEREIRA, A.; QUARESMA, L.; CIDADE, M. T. **Fatigue resistance of asphalt binders: assessment of the analysis methods in strain-controlled tests**. Construction and Building Materials, v. 98, p. 703-712, 2015.

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**. 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.; 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, p. 120685, 2020.

MULLAPUDI, R. S.; CHOWDHURY, P. S.; REDDY, K. S. **Fatigue and healing characteristics of RAP binder blends**. Journal of Materials in Civil Engineering, v. 32, n. 8, p. 04020214, 2020.

NG, A. K. Y. **Evaluation of the fatigue damage behavior of fine aggregate matrices prepared with modified asphalt binders**. Tese de doutorado – Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes e Área de Concentração em Infraestrutura de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil, 2017.

NG, A. K. Y.; do VALE, A. C.; GIGANTE, A. C.; FAXINA, A. L. **Determination of the binder content of fine aggregate matrices prepared with modified binders**. Journal of Materials in Civil Engineering. v. 30, n. 4, 2018.

NORAMBUENA-CONTRERAS, J.; GARCIA, A. **Self-healing of asphalt mixture by microwave and induction heating**. Materials & Design, 106, 404-414, 2016.

DE OLIVEIRA, I. C. S.; FAXINA, A. L. **Rejeito de minério de ferro como agregado mineral fino em misturas asfálticas**. TRANSPORTES, 29(3), 2391, 2021. <https://doi.org/10.14295/transportes.v29i4.2391>

OLIVEIRA, L. S. **Efeito dos períodos de repouso no ensaio de fadiga em misturas asfálticas e em ligantes**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Ceará (UFC). Fortaleza. CE, 2019.

PALVADI, S.; BHASIN, A.; LITTLE, D. N. **Method to quantify healing in asphalt composites by continuum damage approach**. Transportation research record, v. 2296, n. 1, p. 86-96, 2012.

PELTONEN, P. V. **Road aggregate choice based on silicate quality and bitumen adhesion**. Journal of Transportation Engineering, v. 118, n. 1, p. 50-61, 1992.

PIVETTA, F. C.; DO NASCIMENTO, L. A. H.; BRITO, L. A. T. **Proposta de protocolo de ensaio para análise de regeneração em misturas asfálticas através do modelo S-VECD**. TRANSPORTES, v. 28, n. 4, p. 38-52, 2020.

QIU, J. **Self healing of asphalt mixtures: towards a better understanding of the mechanism**. Tese de doutorado, 2012.

QUARESMA, L. F. **Relatório Técnico 30 - Perfil de brita para construção civil** Ministério de Minas e Energia, Banco Mundial, Projeto de Assistência Técnica ao Setor de Energia (Belo Horizonte: J. Mendo Consultoria), 2009.

SADEQ, M.; AL-KHALID, H.; MASAD, E.; SIRIN, O. **Comparative evaluation of fatigue resistance of warm fine aggregate asphalt mixtures**. Construction and Building Materials, 109, 8–16. 2016.

SADEQ, M.; HUANG, C. W.; MASAD, E.; AL-KHALID, H.; SIRIN, O. **A framework for the analysis of damage and recovery characteristics of asphalt mixtures**. Road Materials and Pavement Design, p. 1-14, 2020.

SANTAGATA, E; BAGLIERI, O.; TSANTILIS, L.; DALMAZZO, D. **Evaluation of self healing properties of bituminous binders taking into account steric hardening effects**. Construction and Building Materials, v. 41, p. 60-67, 2013

SHAN, L.; TAN, Y.; KIM, Y. R. **Establishment of a universal healing evaluation index for asphalt binder**. Construction and Building Materials, v. 48, p. 74-79, 2013.

SHEN, S.; CHIU, H. M.; HUANG, H. **Characterization of fatigue and healing in asphalt binders**. Journal of Materials in Civil Engineering, v. 22, n. 9, p. 846-852, 2010.

SHEN, S.; LU, X. **Fracture healing properties of asphaltic material under controlled damage**. Journal of materials in civil engineering, v. 26, n. 2, p. 275-282, 2014.

SOUSA, 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*, 41, 216-223, 2013.

SUN, D.; PANG, Q.; ZHU, X.; TIAN, Y.; LU, T.; YANG, Y. **Enhanced self-healing process of sustainable asphalt materials containing microcapsules**. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, v. 5, n. 11, p. 9881-9893, 2017.

SUN, D.; SUN, G.; ZHU, X.; PANG, Q.; YU, F.; LIN, T. **(Identification of wetting and molecular diffusion stages during self-healing process of asphalt binder via fluorescence microscope**. *Construction and Building Materials*, 132, 230-239, 2017.

SUN, D.; SUN, G.; ZHU, X.; GUARIN, A.; LI, B.; DAI, Z.; LING, J. **A comprehensive review on self-healing of asphalt materials: Mechanism, model, characterization and enhancement**. *Advances in colloid and interface science*, v. 256, p. 65-93, 2018.

SURESHA, S. N.; NINGAPPA, A. **Recent trends and laboratory performance studies on FAM mixtures: A state-of-the-art review**. *Construction and Building Materials*, v. 174, p. 496-506, 2018.

TAN, Y.; SHAN, L.; KIM, Y. R.; UNDERWOOD, B. S. **Healing characteristics of asphalt binder**. *Construction and Building Materials*, v. 27, n. 1, p. 570-577, 2012.

THEODORO, S. H. **Cartilha da Rochagem**. Gráfica e Editora Ideal, 2011. 2a edição revisada (online), 2020.

UNDERWOOD, B. S.; BAEK, C.; KIM, Y. R. **Simplified viscoelastic continuum damage model as platform for asphalt concrete fatigue analysis**. *Transportation research record*, v. 2296, n. 1, p. 36-45, 2012.

VASCONCELOS, K. L.; BHASIN A.; LITTLED. N.; SOARES J. B. **Medidas de Adesão entre Agregado e Ligante Asfáltico**. *Transportes*, v. XVI, n. 1, p. 17-24, 2008.

WANG, C.; CHEN, Y.; CAO, W. **A chemo-rheological approach to the healing characteristics of asphalt binders under short-and long-term oxidative aging**. *Construction and Building Materials*, v. 221, p. 553-561, 2019.

WANG, C.; XIE, W.; UNDERWOOD, B. S. **Fatigue and healing performance assessment of asphalt binder from rheological and chemical characteristics**. *Materials and Structures*, v. 51, n. 6, p. 1-12, 2018.

WOOL, R. P. **Self-healing materials: a review**. *Soft Matter*, v. 4, n. 3, p. 400-418, 2008.

WU, D. Y.; MEURE, S.; SOLOMON, D. **Self-healing polymeric materials: A review of recent developments**. *Progress in polymer science*, 33(5), 479-522, 2008.

XIE, W.; CASTORENA, C.; WANG, C.; KIM, Y. R. **A framework to characterize the healing potential of asphalt binder using the linear amplitude sweep test**. *Construction and Building Materials*, v. 154, p. 771-779, 2017.

YUE, M.; YUE, J.; WANG, R.; XIONG, Y. **Evaluating the fatigue characteristics and healing potential of asphalt binder modified with Sasobit® and polymers using linear amplitude sweep test**. *Construction and Building Materials*, 289, 123054, 2021.

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, H.; LI, H.; ABDELHADY, A.; MO, D.; YANG, B.; HARVEY, J. **Optimum filler-bitumen ratio of asphalt mortar considering self-healing property**. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 31, n. 8, p. 04019166, 2019.

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.