

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO**  
**CENTRO TECNOLÓGICO**  
**COLEGIADO DE ENGENHARIA CIVIL**  
**PROJETO DE GRADUAÇÃO**

MARCELLY PIRES DE SOUSA RAMOS

**A INFLUÊNCIA DAS PROPRIEDADES DE AGREGADOS BRITADOS**  
**EMPREGADOS PARA PAVIMENTAÇÃO NA RESISTÊNCIA À**  
**FADIGA DE MATRIZES DE AGREGADOS FINOS:**  
**UMA ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA E EXPERIMENTAL**

VITÓRIA – ES  
OUTUBRO/2021

MARCELLY PIRES DE SOUSA RAMOS

**A INFLUÊNCIA DAS PROPRIEDADES DE AGREGADOS BRITADOS  
EMPREGADOS PARA PAVIMENTAÇÃO NA RESISTÊNCIA À  
FADIGA DE MATRIZES DE AGREGADOS FINOS:  
UMA ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA E EXPERIMENTAL**

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como quesito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Prof.<sup>a</sup> PhD. Jamilla Emi Sudo Lutf Teixeira

VITÓRIA – ES  
OUTUBRO/2021

MARCELLY PIRES DE SOUSA RAMOS

**A INFLUÊNCIA DAS PROPRIEDADES DE AGREGADOS BRITADOS  
EMPREGADOS PARA PAVIMENTAÇÃO NA RESISTÊNCIA À FADIGA DE  
MATRIZES DE AGREGADOS FINOS:  
UMA ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA E EXPERIMENTAL**

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

---

Prof.<sup>a</sup> PhD. Jamilla Emi Sudo Lutf Teixeira  
Universidade Federal do Espírito Santo  
Orientadora

---

Prof. Dr. Patrício Moreira Pires  
Universidade Federal do Espírito Santo  
Examinador

---

Prof. Dr.<sup>a</sup>. Rudiele Aparecida Schankoski  
Universidade Federal do Espírito Santo  
Examinadora

Vitória - ES, 08 de Outubro de 2021

## AGRADECIMENTOS

Aprendi ao longo desta jornada que para o bom desempenho de um pavimento asfáltico é preciso que se tenha uma base forte, com boa capacidade de suporte e ao mesmo tempo flexível. Comigo não foi diferente. Desenvolver este trabalho e concluir a graduação em um curso que exige tanto de nós só foi possível devido à base sólida e compreensiva de pessoas que estão ao meu redor. E é a vocês que dedico este espaço.

Agradeço primeiramente a Deus, por me dar saúde e guiar minhas escolhas até aqui. A fé é poderosa e tem sido meu combustível nesta jornada.

Agradeço à minha família, em especial aos meus pais, Evelline e Marcelo. Eles que fizeram tudo que podiam para me oferecer as melhores oportunidades, que acreditaram em mim e vibraram a cada vitória. Eles que também estavam lá quando as coisas não saíam como o esperado, sempre com palavras de carinho e acolhimento. Eu amo vocês pra sempre.

Agradeço ao meu parceiro de vida, Gabriel, primeiramente por todo amor e definitivamente por ter cultivado em mim a *ousadia* de sonhar. Obrigada por ser meu grande incentivador, por me dar coragem e por me fazer mais forte. Sou muito feliz ao seu lado. Eu te amo.

Minha eterna gratidão às pessoas que tornaram minha experiência na faculdade a melhor possível: Bianca, Catarina, Mari, Angélica, Lenke, Ryan, David, Lincoln e João. Entre muitas risadas, choros, mímicas, estudos em grupo e projetos de extensão, crescemos TANTO juntos! Vocês me inspiram. Foi uma honra passar esses cinco anos dividindo meus dias com vocês.

Agora um agradecimento mais que especial. A ela, sem a qual este trabalho não seria possível: minha orientadora, professora PhD. Jamilla Teixeira. Obrigada por ter me conduzido tão bem até aqui, por ter feito desta jornada tão engrandecedora e por ter acreditado em mim. E, principalmente, obrigada por despertar em mim o interesse pela ciência. Graças à profissional competente e inspiradora que você é, hoje tenho certeza

de onde eu quero chegar. Minha admiração e carinho por você são imensos.

Agradeço muito ao meu parceiro de pesquisa, Miguel, por me animar nos dias difíceis, por dividir comigo seus conhecimentos e por me ajudar tanto ao longo desse ano. Agradeço também ao Rodolpho, Mestre em Engenharia Civil pela UFES e que sempre esteve disponível para me auxiliar nesta pesquisa. Este trabalho não seria o mesmo sem vocês dois!

Gostaria de agradecer ao grupo de pesquisa da SAM, constituído por pesquisadores da USP/São Carlos, UFG e UFES, através do qual foi possível uma rica troca de experiências e conhecimentos relacionados a este trabalho. Obrigada professora Lílian Rezende, professor Adalberto Faxina, Thallyta, João, Andrise e demais membros do grupo por todo o apoio na condução desta pesquisa.

Agradeço aos técnicos do laboratório de Geotecnia e Pavimentação da UFES, Sidineidy e Carolina, por todo o suporte ao longo deste trabalho; Aos laboratórios de Nanometria Fotônica do Centro Tecnológico da UFES, Laboratório Multiusuário de Microscopia de Alta Resolução da UFG, Laboratório de Microscopia Eletrônica do Departamento de Geologia da UFC e à professora Verônica Castelo Branco e seu grupo de pesquisa pela parceria na realização de alguns ensaios; Aos professores Ana Christina Wigneron Gimenes e Luiz Machado Filho, do departamento de Geografia da UFES, pelo auxílio nas análises mineralógicas; e à Vila Betume, à pedreira Brasitália e à pedreira Basalto Campo Redondo por terem fornecido gentilmente os materiais utilizados nesta pesquisa.

Minha gratidão também a todos os professores que fizeram parte da minha formação como Engenheira Civil ao longo destes anos. Em especial aos professores Patrício, que esteve muito presente durante o desenvolvimento deste trabalho e sempre solícito para ajudar; Rudiele e Ronaldo pelos quais tenho muito carinho e admiração; e professora Romarly, um exemplo de profissionalismo e de bondade.

Por fim, gostaria de agradecer à UFES por me proporcionar tanto crescimento profissional e pessoal. Meu carinho por essa instituição será eterno.

## RESUMO

RAMOS, Marcelly Pires de Sousa. **A influência das propriedades de agregados britados empregados para pavimentação na resistência à fadiga de matrizes de agregados finos: uma análise bibliométrica e experimental**. 2021. Projeto de Graduação (Bacharelado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2021.

Uma das manifestações patológicas mais comuns encontradas em pavimentos asfálticos é o trincamento por fadiga. Este estado resulta da propagação e coalescência de trincas que se iniciam em escalas menores, em decorrência principalmente das ações repetitivas do tráfego. O entendimento dos mecanismos de que levam ao desenvolvimento e propagação desse dano é fundamental para prevenir seu aparecimento. Estudos apontam que o dano por fadiga se inicia na parte fina da mistura asfáltica, denominada de Matriz de Agregados Finos (MAF). Diante disso, esta pesquisa se propôs a verificar a influência do uso de diferentes agregados finos na resistência à fadiga de MAFs por meio de uma análise bibliométrica e experimental. A revisão bibliométrica foi realizada por meio da plataforma Scopus, coletando artigos publicados nos últimos 20 anos em periódicos indexados, sendo encontrados preliminarmente um total 3355 artigo no tema *fadiga em misturas asfálticas*, sendo analisados de forma mais individualizada apenas àqueles que avaliaram efeito de agregados em MAFs. Com relação à análise experimental, esta se iniciou pela caracterização morfológica e mineralógica de dois agregados de diferentes proveniências, denominados de ES e RJ, por meio da aplicação de técnicas como Processamento Digital de Imagem (PDI), Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), análise mineralógica com lupa de mão e Difração de Raios-X (DRX). Em seguida, foi estabelecido um procedimento de compactação de MAFs em laboratório e foram confeccionadas MAFs com os agregados ES e RJ. Por fim, foram conduzidos ensaios oscilatórios no Reômetro de Cisalhamento Dinâmico (DSR) para caracterizar o comportamento viscoelástico das MAFs produzidas por meio da construção de curvas mestre e verificar seu desempenho frente ao fenômeno de fadiga considerando a relação entre o módulo dinâmico e ângulo de fase e pelas curvas CxS obtidas pelo modelo S-VECD. Os resultados da revisão bibliométrica mostram que o tópico de pesquisa *fadiga*

em MAFs tem relevância diante do meio científico e apresenta uma tendência de crescimento para os próximos anos, com cerca de 50% das publicações após 2017. Também foi observado que o número de trabalhos publicados ainda é limitado, especialmente quando se trata de verificar a influência dos agregados no desempenho à fadiga das MAFs, sendo menos que 3% dos trabalhos encontrados na plataforma Scopus. Com relação à análise experimental, os agregados se apresentaram bastante semelhantes sob o aspecto da morfologia. Porém, observou-se com relação às características mineralógicas, diferenças no proporcionamento dos minerais que os constituem. Pelos ensaios oscilatórios, observou-se que a MAF\_ES se apresentou mais rígida que a MAF\_RJ (com base nas curvas mestras de módulo dinâmico), o que pode ser explicado pela diferença na composição mineralógica, uma vez que os parâmetros de forma foram similares. Considerando apenas a rigidez e elasticidade das MAFs, avaliando a relação entre as propriedades viscoelásticas de módulo dinâmico e ângulo de fase, espera-se que a MAF\_RJ apresente melhor desempenho à fadiga do que a MAF\_ES. No entanto, a maior concentração de quartzo encontrada no agregado RJ pode contribuir negativamente para a resistência a fadiga da MAF\_RJ. Diante disso, fica evidente o efeito do tipo de agregado nas propriedades das MAFs, bem como importância de um conhecimento mais amplo das características destes materiais para uma melhor compreensão dos fenômenos que ocorrem nesta escala de análise.

**Palavras-chave:** Matrizes de Agregados Finos (MAF). Misturas Asfálticas. Fadiga. Ensaio Oscilatório. Propriedades dos Agregados.

## **ABSTRACT**

One of the most common pathological manifestations found on asphalt pavements is fatigue cracking. This state results from the propagation and coalescence of cracks that start at smaller scales, mainly as a result of repetitive traffic loading conditions. Studies have reported that the fatigue damage begins in the thin part of the asphalt mixture, called the Fine Aggregate Matrix (FAM). Therefore, this research aimed to verify the influence of the use of different fine aggregates on the fatigue resistance of FAMs through a bibliometric and experimental analysis. The bibliometric review was carried out through the Scopus platform, collecting articles published in the last 20 years in indexed journals. A total of 3355 articles were preliminarily found on the topic of fatigue in asphalt mixtures, being analyzed in a more individual way only for those who evaluated the effect of aggregates in FAMs. Regarding the experimental analysis, this began with the morphological and mineralogical characterization of two aggregates from different sources, called ES and RJ, through the application of techniques such as Digital Image Processing (DIP), Scanning Electron Microscopy (SEM), mineralogical analysis with a handheld magnifying glass and X-Ray Diffraction (XRD). Then, a procedure for compacting FAMs in the laboratory was established and FAMs were made with ES and RJ aggregates. Finally, oscillatory tests were carried out in Dynamic Shear Rheometer (DSR) to characterize the viscoelastic behavior of the FAMs produced through the construction of master curves and to verify their performance against the fatigue phenomenon considering the relationship between the dynamic modulus and phase angle and by the CxS curves obtained by the S-VECD model. The results of the bibliometric review show that the research topic fatigue in FAMs is relevant to the scientific community and shows a growing trend for the coming years, with about 50% of publications after 2017. It was also observed that the number of published works is still limited, especially when it comes to verifying the influence of aggregates on the fatigue performance of FAMs, being less than 3% of the works found on the Scopus platform. Regarding the experimental analysis, the aggregates were very similar in terms of morphology. However, it was observed in relation to the mineralogical characteristics, differences in the proportion of the minerals that constitute them. By the

oscillatory tests, it was observed that the FAM\_ES was more rigid than the FAM\_RJ (based on dynamic modulus master curves), which can be explained by the difference in the mineralogical composition, since the shape parameters were similar. Considering only the stiffness and elasticity of the FAMs, evaluating the relationship between the viscoelastic properties of dynamic modulus and phase angle, it is expected that the FAM\_RJ presents better fatigue performance than the FAM\_ES. However, the higher concentration of quartz found in the RJ aggregate can negatively contribute to the fatigue strength of FAM\_RJ. Therefore, the effect of the type of aggregate on the properties of the FAMs is evident, as well as the importance of a broader knowledge of the characteristics of these materials for a better understanding of the phenomena that occur in this scale of analysis.

**Keywords:** Fine Aggregate Matrix (FAM). Asphalt mixtures. Fatigue Cracking. Oscillatory Tests. Aggregate Properties.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 – Evolução da superfície do pavimento em rodovias federais públicas (em km).....                                                                                     | 11 |
| Figura 2 – Evolução da superfície do pavimento em rodovias federais concedidas (em km) .                                                                                      | 12 |
| Figura 3- Trincamento excessivo na camada de revestimento asfáltico devido ao dano por fadiga em (a) Itapemirim-ES e (b) Brejetuba-ES .....                                   | 16 |
| Figura 4 – Representação esquemática dos mecanismos de propagação do dano por fadiga ..                                                                                       | 17 |
| Figura 5- Representação esquemática da massa asfáltica fora de escala .....                                                                                                   | 18 |
| Figura 6- Escalas de análise de materiais asfálticos .....                                                                                                                    | 20 |
| Figura 7- Pesquisas que trouxeram contribuições importantes para o estudo de MAFs.....                                                                                        | 22 |
| Figura 8 - Componentes do Módulo Complexo .....                                                                                                                               | 28 |
| Figura 9 - Exemplo de curvas de $G' \times$ frequência para um CAP 50/70 puro e para um CAP 50/70 modificado com EVA, condicionados à temperatura de 35°C.....                | 29 |
| Figura 10 – Representação do Ângulo de Fase para Sólidos Hookeanos e Fluidos Newtoniados .....                                                                                | 30 |
| Figura 11 - Mudanças no Ângulo de Fase com a variação do (a) módulo de perda (a) e (b) módulo de armazenamento.....                                                           | 31 |
| Figura 12- Exemplo de curvas de $\delta \times$ frequência para um CAP 50/70 puro e para um CAP 50/70 modificado com EVA, condicionados à temperatura de 35°C.....            | 32 |
| Figura 13 - Representação do deslocamento horizontal de uma curva de temperatura qualquer em relação à curva de referência .....                                              | 34 |
| Figura 14 - Exemplo de Curvas $C \times S$ para MAFs com diferentes composições.....                                                                                          | 37 |
| Figura 15 - Teor de ligante da Mistura Asfáltica Completa e das MAFs associadas dosadas a partir dos métodos disponíveis na literatura .....                                  | 44 |
| Figura 16 - Molde para fabricação de amostras de MAFs .....                                                                                                                   | 45 |
| Figura 17- Molde para fabricação de amostras de MAFs: (a) Visão interna (b) Preenchimento do molde com mistura solta e (c) Visão externa .....                                | 45 |
| Figura 18 - Prensa manual utilizada para compactação de MAFs .....                                                                                                            | 46 |
| Figura 19- Procedimento de compactação e extração de amostras de MAFs .....                                                                                                   | 47 |
| Figura 20 - Consumo (em toneladas) de agregados para diferentes aplicações .....                                                                                              | 48 |
| Figura 21 - Propriedades Morfológicas dos Agregados .....                                                                                                                     | 50 |
| Figura 22 - Deposição das partículas na massa asfáltica e distribuição das tensões ao longo de sua estrutura interna (a) partículas esféricas e (b) partículas alongadas..... | 51 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 23 - Influência da morfologia dos agregados no nível de isotropia das misturas asfálticas (a) relação entre a forma e a textura superficial e (b) relação entre a angularidade e a textura superficial .....                                                                                                                                                                 | 52 |
| Figura 24 - Representação esquemática da influência da textura superficial na adesividade física entre o agregado e o ligante asfáltico.....                                                                                                                                                                                                                                        | 53 |
| Figura 25 - Diferenciação entre rochas ígneas de acordo com a composição mineralógica ....                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 55 |
| Figura 26 - Relações entre mineralogia, petrografia e desempenho de agregados com relação ao polimento, à abrasão e à fragmentação .....                                                                                                                                                                                                                                            | 57 |
| Figura 27 - Representação esquemática do mecanismo de adesividade entre um agregado silicoso e o CAP .....                                                                                                                                                                                                                                                                          | 58 |
| Figura 28 – Resultados dos ensaios de BBS e Fadiga da pesquisa de Lucas Júnior (2019) ....                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 59 |
| Figura 29 – Composição Química dos agregados utilizados na pesquisa de Lucas Júnior (2019) .....                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 60 |
| Figura 30 - Distribuição de Rochas ao longo do território do Brasil .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 61 |
| Figura 31 – Identificação dos minerais presentes em um Granito .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 62 |
| Figura 32 – Textura superficial de um agregado granítico obtida por Microscopia Eletrônica de Varredura .....                                                                                                                                                                                                                                                                       | 63 |
| Figura 33 – Representação Esquemática da Metodologia utilizada para o desenvolvimento desta pesquisa .....                                                                                                                                                                                                                                                                          | 64 |
| Figura 34 - Procedimento para determinação da massa específica e absorção dos agregados (a) secagem da amostra (b) teste para determinar se o material se encontra no estado saturado superfície seca (c) enchimento do picnômetro com a amostra (d) pesagem do conjunto picnômetro + amostra + água (e) condicionamento do conjunto à temperatura de $25 \pm 2^{\circ}\text{C}$ .. | 69 |
| Figura 35 - Sistema de captura de imagens do AIMS .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 70 |
| Figura 36 - Variação de forma do agregado miúdo.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 70 |
| Figura 37 - Variação de angularidade do agregado miúdo.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 71 |
| Figura 38 - Amostras do agregado RJ preparadas para envio à UFC para análise no AIMS...                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 72 |
| Figura 39 - Representação esquemática de um Microscópio Eletrônico de Varredura.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 73 |
| Figura 40 - Partículas do agregado RJ selecionadas para inspeção visual .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 74 |
| Figura 41 - Inspeção visual de uma das partículas do agregado RJ .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 75 |
| Figura 42 - Exemplo de difratograma de agregado granítico e identificação das fases dos minerais encontrados .....                                                                                                                                                                                                                                                                  | 75 |
| Figura 43 - Amostras dos agregados ES e RJ para o ensaio de DRX .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 76 |
| Figura 44 - Curva de distribuição granulométrica utilizada para produção das MAFs.....                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 77 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 45 - Preparo da Mistura Solta (a) Pesagem do CAP, (b) recipiente de mistura sobre o fogão, (c) adição dos agregados e (d) homogeneização. ....                                                                                                                         | 80 |
| Figura 46– Procedimento de Compactação (a) Aquecimento da mistura e do molde, (b) moldagem, (c) aquecimento da mistura dentro do molde, (d) compactação. (e) desprendimento da amostra das paredes do molde, (f) abertura do molde, (g) desmolde e (h) amostra compacta ..... | 82 |
| Figura 47 - Reômetro utilizado (a) vista externa (b) vista interna (c) fixada no interior do reômetro.....                                                                                                                                                                    | 83 |
| Figura 48 - Quantidade de artigos publicados relacionados aos tópicos Fadiga, MAF e Influência dos agregados no comportamento do Concreto asfáltico entre os anos de 2000 e 2020 .....                                                                                        | 85 |
| Figura 49 - Evolução do número de publicações referentes aos tópicos MAF e Fadiga em MAFS entre os anos de 2000 e 2020 .....                                                                                                                                                  | 86 |
| Figura 50 - Curvas de Vida de Fadiga x Deformação para MAFs confeccionadas com diferentes fílers .....                                                                                                                                                                        | 89 |
| Figura 51 - Curvas mestras de Módulo Dinâmico (a) e Curvas CxS (b) de MAFs confeccionadas com diferentes fílers.....                                                                                                                                                          | 90 |
| Figura 52 - Curvas CxS (a) e Curvas de Nf x deformação (b) para MAFs produzidas com agregados com diferentes TMN .....                                                                                                                                                        | 91 |
| Figura 53 - Resultados do Índice de Fratura das MAFs (a) e do Número de Ciclos necessários para a redução da rigidez destas aos valores de 15 e 50% em relação à rigidez inicial (b) .....                                                                                    | 92 |
| Figura 54 - Módulo Dinâmico (a) Energia de Deformação (b) e Energia de Adesão das MAFs produzidas com diferentes agregados e sob diferentes temperaturas de usinagem.....                                                                                                     | 93 |
| Figura 55 - Angularidade dos agregados ES e RJ obtida por meio da análise do AIMS e classificação destes segundo Ibiapina (2018).....                                                                                                                                         | 94 |
| Figura 56 - Forma 2D dos agregados ES e RJ obtida por meio da análise do AIMS e classificação destes segundo Ibiapina (2018).....                                                                                                                                             | 95 |
| Figura 57 - Imagens obtidas por Micsocopia Eletrônica de Varredura para o agregado RJ...                                                                                                                                                                                      | 95 |
| Figura 58 - Imagens obtidas por Micsocopia Eletrônica de Varredura para o agregado ES ..                                                                                                                                                                                      | 95 |
| Figura 59 - Difratoograma do agregado ES.....                                                                                                                                                                                                                                 | 97 |
| Figura 60 - Difratoograma do agregado RJ .....                                                                                                                                                                                                                                | 97 |
| Figura 61 - Quantitativo dos minerais presentes nos agregados ES e RJ obtidos por meio do DRX.....                                                                                                                                                                            | 98 |
| Figura 62 - curvas de $ G^* $ x frequência para a MAF_ES e MAF_RJ para as temperaturas de                                                                                                                                                                                     |    |

|                                                                                                                    |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 20, 35 e 50°C .....                                                                                                | 101 |
| Figura 63 - Curvas mestras de Módulo Dinâmico das MAF produzidas à temperatura de referência de 25°C .....         | 102 |
| Figura 64 - Curvas mestras de Ângulo de Fase das MAF produzidas à temperatura de referência de 25°C .....          | 103 |
| Figura 65 – Comparação do parâmetro $ G^*  \times \sin(\delta)$ das MAFs estudadas sob diferentes frequências..... | 104 |
| Figura 66 - Resultado preliminar da Curva C x S da MAF_ES .....                                                    | 105 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                          |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 1 - Especificações do CAP 30/45 utilizado na pesquisa.....                                        | 67  |
| Tabela 2 - Classificação Morfológica dos agregados segundo Ibiapina (2018).....                          | 71  |
| Tabela 3 - Quantidade mínima de partículas a serem analisadas em cada fração granulométrica .....        | 72  |
| Tabela 4 - Minerais identificados nos agregados ES e RJ por meio da Inspeção Visual com Lupa de Mão..... | 97  |
| Tabela 5 - Parâmetros obtidos para ES e utilizados para a dosagem das MAFs.....                          | 99  |
| Tabela 6 - Parâmetros volumétricos das MAFs utilizadas nesta pesquisa .....                              | 100 |

## LISTA DE QUADROS

|                                                                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Quadro 1 - Parâmetros de entrada para os ensaios de varredura de frequência encontrados na literatura.....          | 33 |
| Quadro 2 - Parâmetros de entrada para os ensaios de varredura de tempo encontrados na literaturaFonte: Autora ..... | 36 |
| Quadro 3 – Minerais e suas características principais .....                                                         | 54 |
| Quadro 4 – Classificação da Acidez/Basicidade das rochas .....                                                      | 58 |
| Quadro 5 - Tipos de rochas comumente usados como fonte de agregados para pavimentação no Brasil.....                | 61 |
| Quadro 6 – Conjuntos de Palavras Chave utilizadas para busca na plataforma Scopus .....                             | 65 |
| Quadro 6 – Conjuntos de Palavras Chave utilizadas para busca na plataforma Scopus .....                             | 66 |
| Quadro 7 - Ensaio de caracterização dos agregados, laboratórios onde foram realizados e normatização seguida .....  | 68 |
| Quadro 8 - Autores com maior quantidade de publicações sobre Fadiga em MAFs .....                                   | 87 |
| Quadro 9 - Periódicos onde estão veiculadas as publicações sobre Fadiga em MAFs .....                               | 87 |
| Quadro 10 - Artigos publicados referentes ao tema Fadiga em MAFs .....                                              | 88 |

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas

AIMS Aggregate Image Measurement System

CAP Cimento Asfáltico de Petróleo

DMM Densidade Máxima Medida

DMT Densidade Máxima Teórica

DNER Departamento Nacional de Estradas de Rodagens

DNIT Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes

DRX Difractograma de Raio-X

DSR Reômetro de Cisalhamento Dinâmico

Gmb Densidade Aparente da Mistura

MAF Matriz de Agregados Finos

NBR Norma Brasileira

PDI Processamento Digital de Imagem

PSTT Princípio da Superposição Tempo-Temperatura

REDUC Refinaria Duque de Caxias

S-VECD Modelo Simplificado do Dano Contínuo Viscoelástico

VV Volume de Vazios

$\delta$  Ângulo de Fase

$|G^*|$  Módulo Dinâmico

## SUMÁRIO

|                                                               |           |
|---------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO .....</b>                                    | <b>10</b> |
| 1.1. OBJETIVOS .....                                          | 14        |
| 1.1.1 Objetivo Geral .....                                    | 14        |
| 1.1.2. Objetivos Específicos .....                            | 14        |
| 1.2. ESTRUTURA DO PROJETO DE GRADUAÇÃO .....                  | 15        |
| <b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>                         | <b>16</b> |
| 2.1. FADIGA EM PAVIMENTOS FLEXÍVEIS.....                      | 16        |
| 2.2. MATRIZ DE AGREGADOS FINOS (MAF) .....                    | 19        |
| 2.2.1. Definição .....                                        | 19        |
| 2.2.2. Propriedades Viscoelásticas .....                      | 27        |
| 2.2.3. Ensaio de Varredura de Frequência .....                | 32        |
| 2.2.3.1. Curva mestra.....                                    | 33        |
| 2.2.4. Ensaio de Varredura de Tempo .....                     | 35        |
| 2.2.4.1. S-VECD.....                                          | 36        |
| 2.2.4. Procedimentos de Mistura e Compactação de MAFs.....    | 40        |
| 2.2.5.1. Métodos de Dosagem .....                             | 41        |
| 2.2.5.2. Métodos de Compactação .....                         | 44        |
| 2.3. AGREGADOS .....                                          | 47        |
| 2.3.1. Morfologia .....                                       | 49        |
| 2.3.2. Mineralogia.....                                       | 54        |
| 2.3.3. Agregados empregados para pavimentação no Brasil ..... | 60        |
| <b>3. METODOLOGIA .....</b>                                   | <b>64</b> |

|                                               |            |
|-----------------------------------------------|------------|
| 3.1. ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA .....              | 64         |
| 3.2 ANÁLISE EXPERIMENTAL .....                | 66         |
| 3.2.1. Materiais .....                        | 67         |
| 3.2.2. Métodos .....                          | 68         |
| 3.2.2.1. Caracterização dos Agregados .....   | 68         |
| 3.2.2.2. Dosagem e Compactação das MAFs ..... | 76         |
| 3.2.2.3. Ensaios Oscilatórios .....           | 83         |
| <b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>        | <b>85</b>  |
| 4.1. ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA .....              | 85         |
| 4.2. ANÁLISE EXPERIMENTAL .....               | 94         |
| 4.2.1. Caracterização dos Agregados .....     | 94         |
| 4.2.2. Dosagem e Compactação das MAFs .....   | 99         |
| 4.2.2. Ensaios Oscilatórios .....             | 100        |
| <b>5. CONCLUSÕES .....</b>                    | <b>107</b> |
| 5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....   | 109        |
| <b>REFERÊNCIAS .....</b>                      | <b>110</b> |

## 1. INTRODUÇÃO

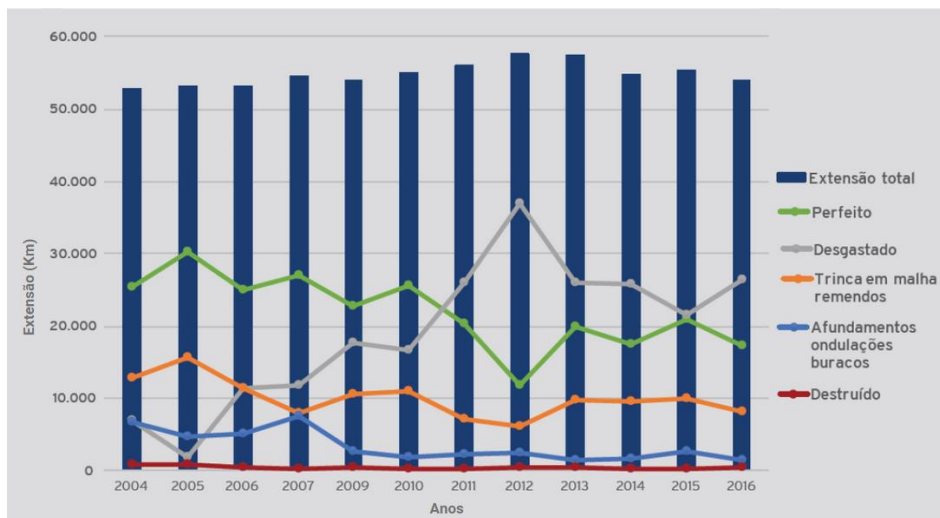
A malha rodoviária brasileira se estende por cerca de 1.720,7 mil quilômetros (CNT, 2019) e desempenha um importante papel no desenvolvimento econômico e social do país. No entanto, somente cerca de 12,4% da extensão total desta é pavimentada (CNT, 2018). A 23ª pesquisa da Confederação Nacional de Transportes (CNT) de Rodovias sugere, ainda, que pelo menos metade dessa extensão não está em boas condições, pois 52% da extensão avaliada apresentou problemas nos pavimentos, sendo estes classificados de regular a péssimo (CNT, 2019).

As condições apresentadas pela infraestrutura viária têm grande impacto na competitividade do Brasil, uma vez que a maior parte de produtos e pessoas são transportados utilizando o modal rodoviário e a qualidade das rodovias tem forte relação com os custos de transporte. Dados do último relatório do Plano Nacional de Logística Integrada elaborado pelo Ministério da Agricultura em 2015 mostram que cerca de 65% de toda a carga transportada no Brasil utiliza o sistema modal rodoviário (Ministério da Agricultura, 2015). Em se tratando de custos de transporte, ressalta-se que há um maior consumo de combustível e maior desgaste dos veículos se as condições das vias não estão adequadas, o que acaba sendo repassado ao preço final do produto transportado. Por exemplo, em 2019, as inadequações do pavimento resultaram em uma elevação do custo operacional do transporte em torno de 28,5% e, em rodovias com pavimento em péssimo estado de conservação, esse acréscimo chegou a ser de 91,5% (CNT, 2019). No mesmo ano foi divulgado o Relatório de Competitividade Global pelo Fórum Econômico Mundial (WEF, 2019), o qual mostra que o Brasil ocupava a 78ª posição entre 141 países em qualidade de infraestrutura de transportes, segundo o Índice de Competitividade Global. Essa posição corrobora a necessidade de investimentos visando a melhoria da infraestrutura de transportes do país, seja com programas de manutenção da malha rodoviária pavimentada, seja com a construção de novas rodovias e/ou investimentos em pesquisa e desenvolvimento buscando soluções mais duradouras.

Das rodovias brasileiras pavimentadas, 99% destas utilizam concreto asfáltico na

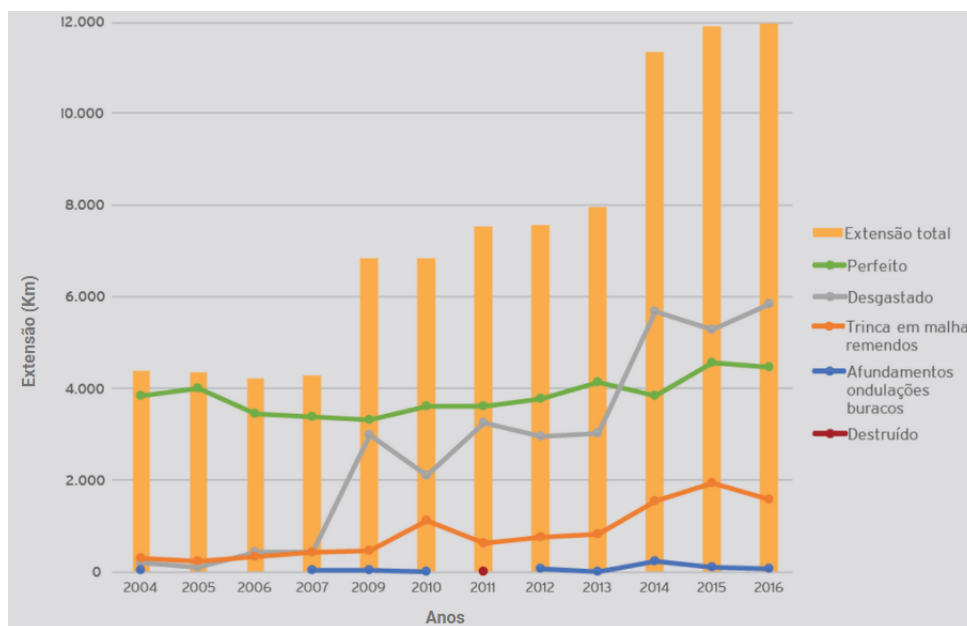
camada de revestimento (CNT, 2017). A camada de revestimento é a superfície sobre a qual trafegam os veículos e que deve apresentar resistência estrutural, ser durável e garantir o conforto e segurança do usuário. O concreto asfáltico é um material compósito, formado a partir da mistura de um ligante asfáltico, normalmente o CAP – Cimento Asfáltico de Petróleo – com agregados graúdos, miúdos e fíler. O desempenho do concreto asfáltico está diretamente relacionado com o projeto de dimensionamento da rodovia, a execução da obra e a seleção de seus materiais constituintes. Alguns dos defeitos mais comuns apresentados na camada de revestimento de concreto asfáltico são: desgaste superficial, afundamentos, ondulações, exsudação, escorregamento, segregação, deslocamento, buracos, trincas térmicas e, por fim, trincamento por fadiga. As Figuras 1 e 2 mostram que, depois do desgaste, o trincamento é o mal que mais acomete os pavimentos das rodovias federais públicas e concedidas do Brasil (CNT, 2017).

Figura 1 – Evolução da superfície do pavimento em rodovias federais públicas (em km)



Fonte: adaptado de CNT (2017)

Figura 2 – Evolução da superfície do pavimento em rodovias federais concedidas (em km)



Fonte: adaptado de CNT (2017)

O aspecto de couro de Jacaré é um estágio avançado de dano devido à propagação e coalescência de trincas que se iniciam em escalas menores, surgindo em decorrência das ações repetitivas do tráfego e representando um colapso estrutural, que compromete também as condições de conforto e segurança do usuário. Para retardar o aparecimento desse problema e consequentemente melhorar o desempenho do pavimento, tornando-o mais durável e prologando sua vida útil, é importante que haja um entendimento sobre os mecanismos de que levam ao desenvolvimento e propagação desse dano.

O dano por fadiga se inicia em escalas menores de análise do concreto asfáltico, com o surgimento de microtrincas. Para avaliar este dano, diversos estudos vêm utilizando a escala intermediária contendo apenas a parte fina da mistura asfáltica, denominada de Matriz de Agregados Finos (MAF), a qual é composta por ligante asfáltico e agregados, em geral, com tamanho nominal máximo inferiores à 2mm, denominados agregados finos. Os estudos com MAF se iniciaram com Kim et al. (2003) e, desde então, vários trabalhos têm sido desenvolvidos investigando o desempenho destas misturas. A utilização de MAFs para a compreensão do desenvolvimento e propagação do dano por fadiga possibilita a investigação do papel de cada um de seus constituintes frente a esse

fenômeno. Segundo Coutinho (2012), o tipo e teor de ligante asfáltico utilizado, as características dos agregados empregados (forma, tamanho e distribuição granulométrica) e as propriedades da interface ligante-agregado afetam diretamente a ocorrência deste tipo de dano. A interação entre o CAP e os agregados pode ter forte ligação com a resistência à fadiga dos materiais asfálticos, pois a capacidade de adesão que existe entre eles pode impactar diretamente na ocorrência de fraturas na matriz asfáltica. A natureza do agregado (mineralogia, morfologia, aspectos físico-químicos, etc) está diretamente relacionada com esta capacidade de adesão (MOURA et al., 2020).

Visando contribuir para o estudo de fadiga em misturas asfálticas com vistas à influência dos agregados e considerando que os estudos apontam a MAF como uma escala onde o início do fenômeno de fadiga pode ser avaliado, este projeto de graduação busca verificar a influência de diferentes agregados finos na resistência à fadiga de MAFs. Por meio de uma análise bibliométrica das temáticas que envolvem este estudo, pretende-se compreender aspectos como a perspectiva de crescimento do número de trabalhos relacionados a estes tópicos de pesquisa, a relevância destes diante do meio científico, onde se concentram os estudos envolvendo estes temas, quem são os maiores pesquisadores que atuam nesta linha de pesquisa e como se tem abordado a influência dos agregados na resistência à fadiga de MAFs nos estudos publicados até o momento. Na sequência, por meio de análises mineralógicas e morfológicas de amostras de agregados miúdos empregados para pavimentação no Brasil, pretende-se compreender quais das suas características interferem na resposta do pavimento ao trincamento por fadiga, avaliada por meio de ensaios oscilatórios em amostras de MAFs. Espera-se que este trabalho contribua com avanços para as pesquisas em MAFs e para o conhecimento da influência dos agregados miúdos constituintes de concretos asfálticos frente ao fenômeno de fadiga, de modo que se faça compreender melhor o comportamento global do revestimento asfáltico diante dessa manifestação patológica e, com isso, a qualidade das rodovias brasileiras possa ser aumentada.

## **1.1 OBJETIVOS**

### **1.1.1 Objetivo Geral**

Este projeto de pesquisa tem como objetivo geral realizar uma análise bibliométrica e experimental da influência das propriedades de agregados britados empregados para pavimentação na resistência à fadiga de matrizes de agregados finos.

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

Para avaliar a influência das propriedades de agregados britados empregados para pavimentação na resistência à fadiga de matrizes de agregados finos, estabeleceram-se os seguintes objetivos específicos:

- Realizar uma análise bibliométrica das temáticas que envolvem este estudo: fadiga em pavimentos asfálticos, matrizes de agregados finos e influência das características dos agregados no comportamento do concreto asfáltico;
- Verificar as diferenças entre as características morfológicas de diferentes tipos de agregados finos empregados para pavimentação para tentar correlacionar estas com a resistência à fadiga de MAFs;
- Verificar as diferenças entre as características mineralógicas de diferentes tipos de agregados finos empregados para pavimentação para tentar correlacionar estas com a resistência à fadiga de MAFs;
- Estabelecer um procedimento de preparação de amostras e realização de ensaios em MAFs que possa ser desenvolvido na Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) com base em procedimentos apresentados na literatura;
- Verificar as diferenças nas características de rigidez e elasticidade das MAFs utilizando diferentes agregados finos por meio da análise dos resultados de ensaios reológicos para obtenção de propriedades viscoelásticas lineares (módulo dinâmico e ângulo de fase);

- Verificar as alterações na resistência à fadiga de MAFs por meio da verificação das curvas características de dano, obtidas pela aplicação do modelo de dano contínuo S-VECD.

## **1.2 ESTRUTURA DO PROJETO DE GRADUAÇÃO**

O presente trabalho está organizado nos seguintes capítulos:

**CAPÍTULO 1:** apresenta a contextualização, justificativa e relevância do tema diante do cenário nacional. São apontados também os objetivos deste trabalho, bem como sua estrutura de organização.

**CAPÍTULO 2:** apresenta uma revisão bibliográfica para o embasamento deste estudo. Nele são abordados conceitos referentes à fadiga em pavimentos flexíveis, a definição de Matriz de Agregados Finos, trabalhos que utilizaram este material para diferentes finalidades, metodologias utilizadas para preparação desse tipo de amostra, definição das propriedades viscoelásticas de MAFs e os ensaios comumente realizados, a teoria do dano contínuo viscoelástico aplicada à análise dos resultados e, por fim, será abordada a influência de diferentes propriedades dos agregados no comportamento do concreto asfáltico, bem como uma relação dos principais agregados empregados para pavimentação no Brasil.

**CAPÍTULO 3:** apresenta a metodologia aplicada para o desenvolvimento deste trabalho. Nele são detalhados os métodos adotados para a realização da análise bibliométrica desenvolvida, bem como os materiais e métodos aplicados no programa experimental.

**CAPÍTULO 4:** apresenta os resultados da análise bibliométrica e dos ensaios realizados, bem como a discussão sobre eles.

**CAPÍTULO 5:** apresenta as conclusões deste trabalho e as sugestões para pesquisas futuras.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 FADIGA EM PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

Os pavimentos flexíveis são estruturas que possuem materiais asfálticos na sua camada de revestimento. Devido a ações repetitivas do tráfego e a variações de temperatura, a camada de revestimento apresenta uma tendência a desenvolver algumas manifestações patológicas, sendo uma das principais o dano por fadiga. Este é um fenômeno complexo e que está associado à propagação e coalescência de microtrincas que se desenvolvem no concreto asfáltico até formarem macrotrincas e eventualmente levarem a ruptura do material. A Figura 3 ilustra o aspecto que os pavimentos adquirem quando se encontram em um estágio avançado de deterioração devido à propagação deste dano.

Figura 3- Trincamento excessivo na camada de revestimento asfáltico devido ao dano por fadiga em (a) Itapemirim-ES e (b) Brejetuba-ES

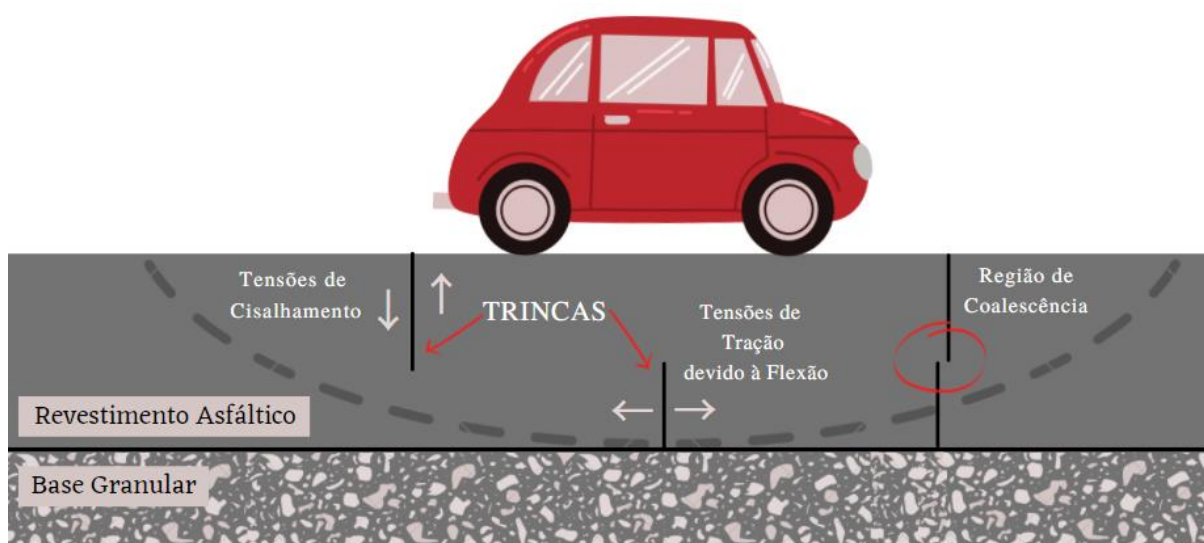


Fonte: CNT (2019)

O aspecto do pavimento retratado na Figura 3 é comumente associado ao aspecto do couro do jacaré, sendo esta a razão pela qual a manifestação do dano por fadiga costuma ser chamada desta forma. Alguns fatores podem acelerar a propagação deste dano, como o subdimensionamento ou má qualidade da estrutura ou de uma das camadas do pavimento, a baixa capacidade de suporte do subleito e o envelhecimento do concreto asfáltico que compõe a camada de revestimento (CNT, 2017).

Segundo Huang (2004), existem dois mecanismos principais de propagação do dano por fadiga em pavimentos asfálticos. São eles: topo-base e base-topo. As solicitações que submetem o pavimento a tensões de cisalhamento geram trincas que têm origem na parte superior da camada de revestimento e que se propagam até a parte inferior por meio do deslizamento das bordas da trinca entre si (mecanismo topo-base). Por outro lado, solicitações que levam à flexão do pavimento originam trincas que se iniciam na parte inferior da camada de revestimento e que se propagam num movimento de abertura até a face superior da camada (mecanismo base-topo). De acordo com Hintz (2012), este seria o modo mais comum de propagação do dano por fadiga. A Figura 4 ilustra os mecanismos de propagação de dano descritos anteriormente.

Figura 4 – Representação esquemática dos mecanismos de propagação do dano por fadiga

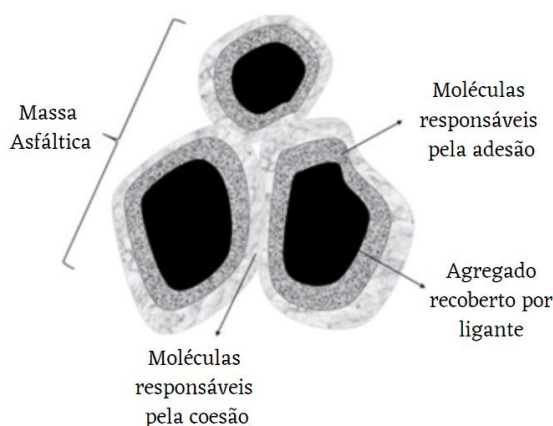


Fonte: Autora

Dentre os fatores que influenciam no desenvolvimento e propagação do dano por fadiga nos pavimentos flexíveis, destaca-se aqui os materiais constituintes do concreto asfáltico. O tipo e teor de ligante asfáltico utilizado, as características dos agregados empregados (forma, tamanho e distribuição granulométrica) e as propriedades da interface ligante-agregado influenciam diretamente a ocorrência desta manifestação patológica (COUTINHO, 2012). A interação entre o CAP e os agregados assume um papel importante na resistência à fadiga dos materiais asfálticos, pois a capacidade de adesão que existe entre esses materiais pode impactar diretamente na ocorrência de fraturas na matriz asfáltica. A natureza do agregado (mineralogia, morfologia, aspectos físico-químicos, etc) tem forte relação com esta capacidade de adesão (MOURA et al., 2020).

As fraturas que podem ocorrer nas matrizes asfálticas são classificadas em dois tipos: fratura adesiva e fratura coesiva. A primeira ocorre na interface entre o agregado e o ligante asfáltico e está diretamente relacionada à adesividade entre esses materiais. Esta adesividade é influenciada por fatores físicos, químicos e termodinâmicos. As fraturas coesivas, por sua vez, ocorrem no próprio ligante asfáltico (BHASIN e LITTLE, 2009). A Figura 5 traz uma representação esquemática das regiões onde ocorre cada um destes tipos de fratura.

Figura 5- Representação esquemática da massa asfáltica fora de escala



Fonte: Moura (2020)

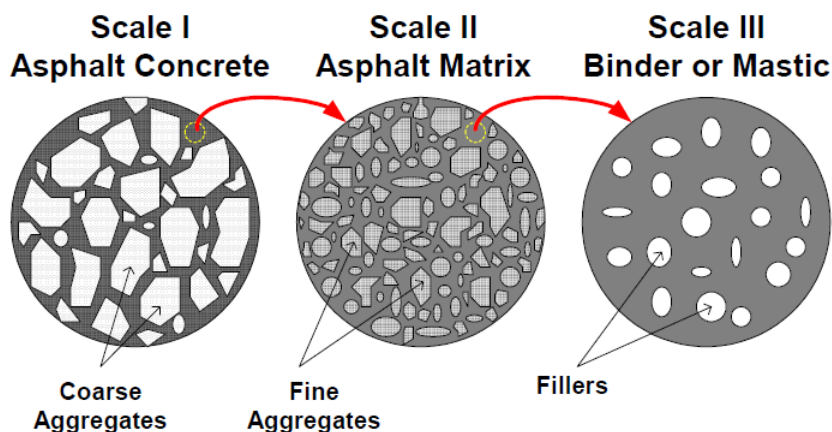
Como o trincamento por fadiga decorre da iniciação, propagação e coalescência de microtrincas em escalas menores, a investigação das misturas na escala da MAF tem sido vista como um passo intermediário para a previsão do comportamento global do concreto asfáltico frente à essa manifestação patológica (COUTINHO, 2012; FONSECA, 2016; RODRIGUES, 2018). Outras vantagens de desenvolver pesquisas nesta escala são: a MAF apresenta uma estrutura interna mais uniforme quando comparada ao concreto asfáltico, o que possibilita uma menor variabilidade nos resultados de ensaios (MASAD et al., 2006); as amostras de MAF apresentam tamanho reduzido, normalmente pequenos cilindros de 12,5 x 50 mm, resultando em economia de material e de tempo para preparo de amostras para o desenvolvimento das pesquisas; e os ensaios realizados em MAFs, tipicamente ensaios oscilatórios em reômetro, apresentam menor duração em relação aos ensaios tradicionais realizados em misturas asfálticas completas. Dessa forma, por meio do conhecimento da resistência ao dano por fadiga das MAFs e do quanto esta parte influencia o comportamento das misturas completas, é possível que se faça uma seleção/combinção de materiais que resultem em misturas mais resistentes ao dano por fadiga (COUTINHO, 2012).

## **2.2 MATRIZ DE AGREGADOS FINOS (MAF)**

### **2.2.1 Definição**

Como mencionado anteriormente, a MAF corresponde à parte fina da mistura asfáltica, que se constitui da combinação do ligante asfáltico, agregados miúdos (em geral assumido como àqueles com tamanho nominal inferior à 2mm), vazios e fíler. A Figura 6 apresenta as diferentes escalas de análise comumente empregadas para o estudo de materiais asfálticos: concreto asfáltico; matriz de agregados finos; e mástique.

Figura 6- Escalas de análise de materiais asfálticos



Fonte: Kim et al. (2006)

Kim et al. (2003) em um estudo pioneiro na escala de MAF fizeram a caracterização do dano por fadiga utilizando um reômetro de cisalhamento dinâmico, comumente chamado pela sigla DSR (*Dynamic Shear Rheometer*). O estudo aplicou o princípio da correspondência elástica-viscoelástica proposto por Schapery (1984) para análise dos resultados, uma vez que a natureza do comportamento da MAF era herdada do comportamento viscoelástico do ligante asfáltico. Foi avaliado, então, o efeito da adição de diferentes fíleres (cal hidratada e fíler calcário) na resistência à fadiga de MAFs, por meio do ensaio de varredura de tempo. Os autores concluíram que há um incremento da vida de fadiga das misturas devido à adição de fíleres, sendo observada uma menor taxa de evolução de dano e maior capacidade de acúmulo de dano das amostras com adição de fíleres em relação às amostras sem fíler. Em relação aos fíleres utilizados, os autores observaram que a cal hidratada promove um melhor desempenho da mistura frente à fadiga do que o fíler calcário. Por fim, os autores verificaram que ao induzir períodos de descanso durante o ensaio de fadiga, houve potencial autorregeneração de trincas na mistura aumentando a vida de fadiga das MAFs em comparação aos ensaios sem período de repouso.

A partir da pesquisa pioneira de Kim et al. (2003), outros autores desenvolveram estudos utilizando matrizes de agregados finos para diferentes finalidades: desenvolver protocolos de dosagem e compactação de amostras de MAFs, uma vez que ainda não existe normatização para estes procedimentos; validar modelos de análises de resultados

para ensaios em MAFs; compreender os mecanismos de evolução de dano em concretos asfálticos por meio da parte fina da mistura; estudar o efeito de diferentes materiais sobre o comportamento global do concreto asfáltico; dentre outros. (ZOLLINGER, 2005; MASAD et al., 2006; CASTELO BRANCO, 2008; KARKI, 2010; SOUSA, 2010; COUTINHO, 2012; UNDERWOOD e KIM, 2013; FONSECA, 2016; GUDIPUDI e UNDERWOOD, 2017; NG, 2017; RODRIGUES, 2018, GRASSON FILHO, 2019; OLIVEIRA, 2020; e outros). A Figura 7 mostra uma linha do tempo com alguns dos trabalhos que trouxeram importantes contribuições para o estudo de MAFs. Em seguida serão apresentados detalhes sobre estas e algumas outras pesquisas desenvolvidas com este tipo de material.

Figura 7- Pesquisas que trouxeram contribuições importantes para o estudo de MAFs



A pesquisa de Zollinger (2005) consistiu no desenvolvimento de um procedimento para avaliar a susceptibilidade ao dano por umidade induzida (DUI) em MAFs. O protocolo incluiu as etapas de preparação de amostra, metodologia de ensaios e análise de resultados. Diferente de Kim et al. (2003), que utilizaram compactação manual para produzir amostras de MAFs de 50 mm de comprimento e 12 mm de diâmetro, Zollinger (2005) propôs um procedimento no qual as amostras de MAFs eram extraídas de um corpo de prova com 152 mm de diâmetro, moldados no compactador giratório Superpave. De posse das amostras, o autor utilizou o DSR para caracterização do dano e as análises se sucederam com a aplicação da mecânica do dano contínuo. Os resultados desta pesquisa mostraram que MAFs com baixa resistência ao DUI apresentam falhas em um nível integridade mais alto do que aquelas com melhor resistência ao DUI. Ou seja, misturas mais resistentes ao dano por umidade também são mais resistentes ao dano por fadiga, uma vez que suportam uma maior redução de rigidez entre o início do carregamento e o momento da falha.

Castelo Branco (2008) verificou a influência de diferentes formas de carregamento – tensão e deformação controladas – na resistência à fadiga de MAFs. Foram conduzidos ensaios de fadiga no DSR por meio da aplicação de tensões e deformações controladas. Para conduzir seus estudos, a autora desenvolveu um novo método de dosagem de MAFs com base na granulometria e no proporcionamento de massas entre as misturas asfálticas completas e sua matriz fina correspondente. Até então Kim et al. (2003) e Zollinger (2005) haviam produzido MAFs com teor de ligante fixado arbitrariamente em 8% com a justificativa de que seria a quantidade necessária para fornecer uma espessura de filme de ligante de aproximadamente 10  $\mu\text{m}$ . Os resultados de Castelo Branco (2008) mostraram que a resistência à fadiga de matrizes de agregados finos independe do modo de carregamento.

Sousa (2010) trouxe avanços com relação à dosagem de misturas asfálticas finas, propondo uma metodologia experimental que tem como objetivo a produção de amostras de MAFs que representem realisticamente a parte fina das misturas asfálticas completas correspondentes. O método se baseia na determinação do teor de ligante a

partir da separação da fase gráuda e fina da mistura asfáltica completa e posterior extração de ligante da parte fina da mistura, utilizando para isso uma estufa de ignição. A ideia da aplicação deste processo é que seja mantida a proporcionalidade de ligante presente em cada uma das duas fases para que seja então obtido o percentual de ligante presente na MAF.

Coutinho (2012) teve como objetivo a obtenção das propriedades viscoelásticas lineares e a avaliação do dano por fadiga em matrizes de agregados finos. O autor fez, ainda, uma adaptação da metodologia de dosagem proposta por Sousa (2010), utilizando o mesmo princípio experimental para a determinação do teor de ligante das MAFs mas fazendo a etapa de extração do ligante da fração fina por meio do uso de um solvente. Confeccionadas as amostras, foram realizados ensaios oscilatórios de dano no DSR de maneira convencional (varredura de tempo) e por meio de uma metodologia adaptada para MAFs: varredura linear de amplitude de deformação e aplicação da teoria de dano contínuo viscoelástico. Observou-se que o método de ensaio adaptado para MAFs culminou em resultados semelhantes aos encontrados na abordagem tradicional, sendo este realizado de forma muito mais rápida que a metodologia convencional. Diante dos resultados, Coutinho (2012) aponta, então, a caracterização da parte fina das misturas asfálticas como passo intermediário para a previsão do comportamento do dano por fadiga em misturas asfálticas completas.

Karki (2010) trabalhou na caracterização experimental e computacional de misturas asfálticas por meio da investigação de seus constituintes, além de propor um método de dosagem semiempírico que estima o teor de ligante das MAFs considerando a existência uma espessura de filme de ligante compartilhada entre os agregados gráudos e miúdos. O autor conduziu o ensaio de varredura de frequência no DSR para determinar as propriedades viscoelásticas lineares das MAFs e também fez testes de nanoindentação quase estática nos agregados gráudos, de forma que os resultados desses ensaios foram utilizados como parâmetros de entrada no modelo computacional para a previsão de características do concreto asfáltico. Foi observado que as simulações computacionais e os resultados de caracterização experimental do concreto asfáltico apresentaram boa

aproximação e que não é apenas o ligante o responsável pelas propriedades viscoelásticas do concreto asfáltico, mas sim toda a parte fina da mistura.

Underwood e Kim (2013) avaliaram a influência de variações volumétricas na rigidez e no desenvolvimento de dano por fadiga em matrizes de agregados finos. Os autores produziram e ensaiaram MAFs com diferentes volumes de vazios, teores de ligantes e tamanho máximo de agregados, constatando então que as propriedades viscoelásticas das amostras são bastante sensíveis às variações de parâmetros volumétricos. Esse é um importante resultado no que diz respeito ao uso de MAFs para previsão do comportamento de misturas asfálticas completas, indicando que para haver uma assertividade nos resultados das previsões é necessário que os parâmetros volumétricos empregados para a confecção das MAFs sejam fiéis aos da porção fina da mistura asfáltica completa correspondente.

Iniciando os estudos em MAFs na Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Fonseca (2016) desenvolveu uma pesquisa com o objetivo de avaliar o uso de Resíduo do Beneficiamento de Rochas Ornamentais (RBRO) e Escória Moída de Aciaria (EMA) como fíler em misturas asfálticas finas. Como este trabalho tratou da influência de agregados nas propriedades viscoelásticas e no comportamento à fadiga de MAFs, maiores detalhes sobre ele serão apresentados nos resultados da análise bibliométrica desenvolvida na presente pesquisa.

Ng (2017) teve como objetivo principal avaliar o efeito de diferentes ligantes modificados e com diferentes níveis de envelhecimento no desenvolvimento de dano por fadiga em três escalas diferentes de misturas asfálticas: ligante asfáltico, mástiques e MAFs. Foram realizados ensaios oscilatórios no DSR e os resultados analisados com base na teoria do dano contínuo viscoelástico. A autora concluiu que o uso de ligantes asfálticos modificados melhorou a resistência à fadiga de MAFs, enquanto o envelhecimento foi prejudicial ao desempenho das amostras. A pesquisa de Ng (2017) trouxe uma importante contribuição no que diz respeito à dosagem de MAFs, apresentando o método mais recente para a obtenção do teor de ligante das matrizes de

agregados finos. O método se baseia no conceito da superfície específica dos agregados e é uma adaptação do procedimento de Arrambide e Duriez (1959) para a determinação do teor de ligante de misturas asfálticas completas.

Rodrigues (2018) conduziu uma pesquisa na UFES utilizando amostras de MAFs para validar um modelo de zona coesiva viscoelástica não linear (ZCNV) para previsão de trincas em MAFs. O modelo considera o comportamento viscoelástico e a resistência à fratura das misturas asfálticas, e é capaz de prever todo o processo de ruptura, desde a nucleação, iniciação e propagação de trincas na microestrutura da mistura asfáltica. Para sua validação foram avaliadas em laboratório dois tipos de MAFs (uma contendo cal hidratada como fíler e a outra contendo escória de aciaria) e os resultados experimentais comparados com os resultados numéricos. Observou-se uma compatibilidade entre os resultados da modelagem numérica e os resultados dos ensaios, o que indica que modelo ZCNV é eficiente para prever a evolução de trincas nas MAFs. O modelo se mostrou uma importante ferramenta para auxiliar na análise da influência de materiais no desempenho de misturas asfálticas, poupando tempo e diminuindo custo das análises.

Dentre os estudos de MAF realizados no último ano, a pesquisa de Du et al. (2020) traz resultados interessantes para o presente trabalho. Os autores utilizaram MAF para estabelecer um modelo de elementos finitos para investigar o início das fraturas adesivas e coesivas e seus efeitos no pavimento. Este modelo engloba tanto aspectos microestruturais das misturas asfálticas, obtidos por meio de processamento digital de imagem, quanto aspectos macroestruturais dos pavimentos asfálticos. Os resultados encontrados nesta pesquisa mostraram que a medida em que se diminui a adesividade entre ligante e agregado, maior é a quantidade de pontos de iniciação de dano, e que a heterogeneidade das misturas asfálticas resulta numa alta concentração de tensões em alguns pontos. Os autores concluíram então que a iniciação de microtrincas no concreto asfáltico têm grande relação com estes dois fatores.

Diante do apresentado, nota-se a variedade de tipos de pesquisas que podem ser desenvolvidas utilizando matrizes de agregados finos. Esse tipo de amostra pode ser

utilizada para avaliar os efeitos da incorporação de novos materiais às misturas, para o entendimento dos mecanismos de falha e para a previsão do desempenho do concreto asfáltico correspondente. É impossível compreender melhor o comportamento de misturas asfálticas sem investigar os mecanismos de transferência de carga e de resistência desenvolvidos nas escalas menores (LITTLE, ALLEN e BHASIN, 2018).

Nas próximas sessões, serão apresentados alguns conceitos iniciais sobre as propriedades viscoelásticas de materiais asfálticos, alguns ensaios comumente empregados para caracterização de MAFs e suas aplicações para verificação das características de rigidez e resistência à fadiga de MAFs bem como procedimentos utilizados para dosagem e compactação destas misturas.

### **2.2.2. Propriedades Viscoelásticas**

Os materiais asfálticos apresentam comportamento viscoelástico, característica herdada do cimento asfáltico de petróleo (CAP). Isso significa que esse tipo de material apresenta um comportamento intermediário entre um sólido Hookeano (elástico) e um fluido Newtoniano (viscoso). A resposta final às solicitações vai se aproximar mais de um ou de outro a depender a taxa de carregamento aplicada e da temperatura à qual é exposto. A análise quantitativa do comportamento de materiais viscoelásticos está associada à determinação das suas propriedades viscoelásticas, as quais indicam o quão viscoso e o quão elástico o material se apresenta sob determinadas condições de temperatura e taxa de carregamento. Duas propriedades viscoelásticas são mensuradas por meio da realização dos ensaios oscilatório no DSR, sendo elas: o Módulo Dinâmico ( $|G^*|$ ) e ângulo de fase ( $\delta$ ). Estas duas propriedades, de forma combinada, vão indicar a resistência à fadiga e deformação permanente das MAFs.

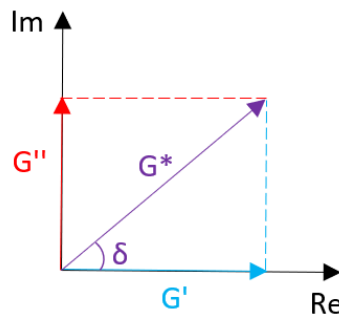
O módulo dinâmico está para os materiais viscoelásticos assim como o módulo de elasticidade está para os materiais elásticos. Ele representa uma medida de rigidez e é calculado como a relação entre a amplitude da tensão ( $\tau_0$ ) e a amplitude deformação ( $\gamma_0$ ) para uma dada condição de carregamento, conforme mostra a Equação 1. Diante

disso é fácil perceber que quanto maior for o módulo complexo, mais rígido o material se apresenta para aquela condição.

$$|G^*| = \frac{\tau_0}{\gamma_0} \quad (1)$$

O módulo dinâmico representa o valor absoluto do módulo complexo ( $G^*$ ). Este é composto por duas parcelas (Figura 8), e é matematicamente descrito pela Equação 2. Suas componentes são denominadas módulo de armazenamento ( $G'$ ) e módulo de perda ( $G''$ ), as quais são descritas segundo as Equações 3 e 4, respectivamente, em termos do ângulo de fase,  $\delta$ . Este último será tratado em mais detalhes no próximo item desta seção. O módulo de armazenamento diz respeito ao comportamento elástico do material, enquanto o o módulo de perda está associado à parcela viscosa. Dessa forma, quando se analisa o módulo complexo em termos de componentes, o comportamento do material é tão mais de um líquido viscoso quanto maior seu módulo de perda e tão mais de um sólido elástico quanto maior seu módulo de armazenamento.

Figura 8 - Componentes do Módulo Complexo



Fonte: Autora

$$G^* = G' + i \cdot G'' \quad (2)$$

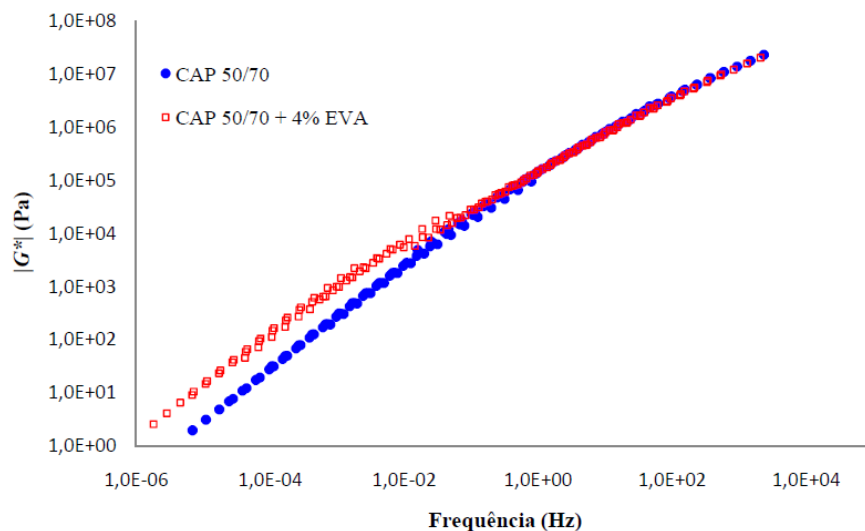
$$G' = G^* \cos \delta \quad (3)$$

$$G'' = G^* \sin \delta \quad (4)$$

$$|G^*| = \sqrt{(G')^2 + (G'')^2} \quad (5)$$

Como destacado anteriormente, o comportamento de materiais viscoelásticos é dependente da taxa de carregamento e temperatura à qual é exposto. A rigidez é uma das características do material que se altera conforme mudam as condições de carregamento. Isso significa que para cada frequência de solicitação em uma dada temperatura o material apresenta um valor absoluto de módulo complexo diferente, o que é representado graficamente por uma curva do módulo dinâmico por frequência (Figura 9). Nesta curva observa-se que a relação é direta: a rigidez do material aumenta diante de um incremento de frequência. Quando são analisadas curvas do mesmo material a diferentes temperaturas constata-se que o valor módulo dinâmico também varia com a temperatura, mas agora de maneira inversa: a rigidez aumenta a medida em que a temperatura do material diminui.

Figura 9 - Exemplo de curvas de  $|G^*|$  x frequência para um CAP 50/70 puro e para um CAP 50/70 modificado com EVA, condicionados à temperatura de 35°C



Fonte: Coutinho (2012)

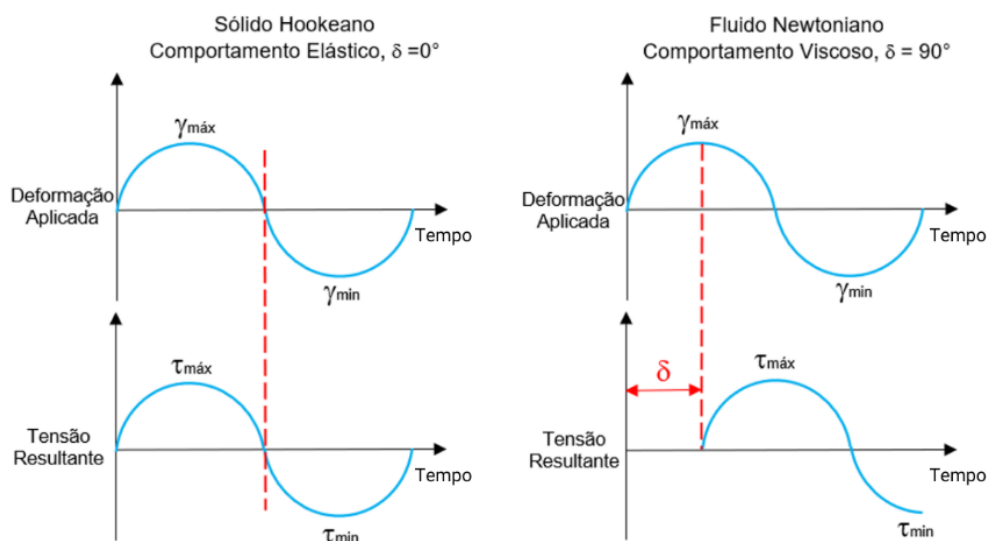
Embora a magnitude do módulo dinâmico varie de acordo com o material ensaiado, a tendência desta curva é sempre a mesma: a rigidez do material aumenta com o aumento da frequência do carregamento, conforme mostra a Figura 6. Diante do apresentado, percebe-se que o módulo dinâmico é uma propriedade fundamental para descrição do comportamento de materiais viscoelásticos.

Uma outra propriedade tão importante quanto é o ângulo de fase. O ângulo de fase é uma propriedade que permite a quantificação da elasticidade dos materiais viscoelásticos. Quando se aplica a estes materiais uma deformação senoidal  $\gamma$ , de amplitude máxima  $\gamma_0$ , a uma velocidade angular  $\omega$ , ao longo de um tempo  $t$  (Equação 6), estes apresentam como resposta uma tensão de cisalhamento  $\tau$  de amplitude  $\tau_0$  (Equação 7). Em um sólido Hookeano, esta tensão resultante é proporcional à amplitude da deformação aplicada e, quando isso acontece, o ângulo de fase é zero (diz-se que a tensão e a deformação estão em fase). Para fluidos Newtonianos essa proporcionalidade não acontece, existindo uma defasagem de  $90^\circ$  entre o início da aplicação da carga e o início da resposta do material (Figura 10). Materiais viscoelásticos apresentam um comportamento intermediário entre sólidos elásticos e líquidos viscosos, de forma que o ângulo de fase para uma dada condição de carregamento apresenta valores entre  $0^\circ$  e  $90^\circ$ . Assim, quanto mais próximo de  $0^\circ$  for o ângulo de fase mais o material exibe um comportamento elástico, enquanto que para valores próximos de  $90^\circ$  a natureza viscosa se destaca.

$$\gamma = \gamma_0 \times \sin \omega t \quad (6)$$

$$\tau = \tau_0 \times \sin(\omega t + \delta) \quad (7)$$

Figura 10 – Representação do Ângulo de Fase para Sólidos Hookeanos e Fluidos Newtonianos

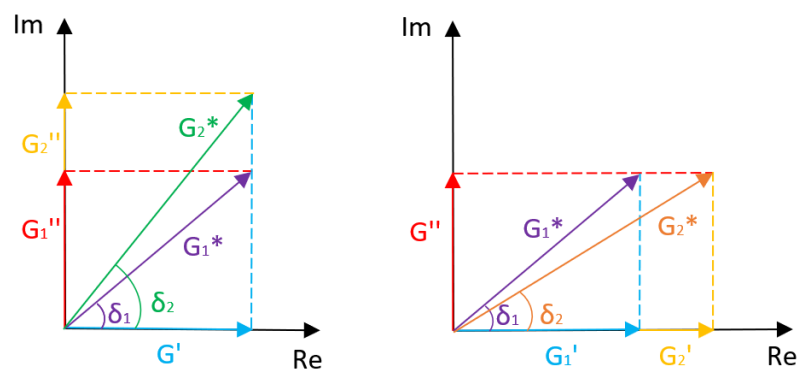


Fonte: Autora

O ângulo de fase também tem relação com o módulo de armazenamento e módulo de perda, como já havia sido ilustrado na Figura 8. Essa relação pode ser expressa pela Equação 8. Dessa forma, quanto maior o módulo de perda maior é o ângulo de fase e o comportamento do material se apresenta mais próximo de um líquido viscoso. Analogamente, o aumento do módulo de armazenamento resulta na diminuição do ângulo de fase, o que se traduz num comportamento mais próximo ao de um sólido elástico. Essas tendências estão representadas na Figura 11.

$$\tan \delta = \frac{G''}{G'} \quad (8)$$

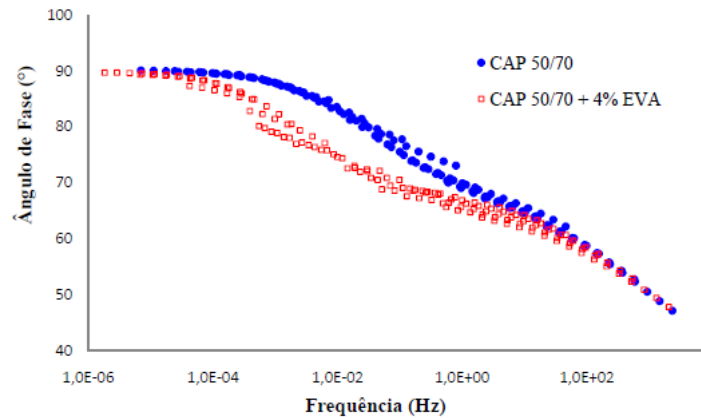
Figura 11 - Mudanças no Ângulo de Fase com a variação do (a) módulo de perda (a) e (b) módulo de armazenamento



Fonte: Autora

Assim como o módulo complexo, o ângulo de fase também se altera a depender das condições de carregamento, o que significa que o material pode se apresentar mais ou menos elástico dependendo da taxa de sollicitação e da temperatura à qual está submetido. Essa dependência pode ser representada graficamente por uma curva de ângulo de fase por frequência. A Figura 12 mostra um exemplo desta curva, onde se pode observar que o material tende a apresentar um comportamento tão mais viscoso quanto maior seja a taxa de carregamento aplicada.

Figura 12- Exemplo de curvas de  $\delta$  x frequência para um CAP 50/70 puro e para um CAP 50/70 modificado com EVA, condicionados à temperatura de 35°C



Fonte: Coutinho (2012)

Como já mencionado, o concreto asfáltico é um material viscoelástico, portanto seu desempenho está associado às suas propriedades viscoelásticas, sendo fundamental sua determinação em diferentes condições de carregamento e temperatura para que se avalie o desempenho do pavimento quando sollicitado. Na escala de MAF, as propriedades viscoelásticas podem ser determinadas em laboratório por meio de ensaios oscilatórios, tais como varredura de frequência e varredura de tempo.

### 2.2.3. Ensaio de Varredura de Frequência

O ensaio de varredura de frequência é um ensaio oscilatório conduzido no DSR, através do qual é possível obter as propriedades viscoelásticas lineares (sem dano) do material para uma faixa de frequência de interesse. Este ensaio é conduzido à temperatura e amplitude de carregamento (tensão ou deformação) controladas. A tensão ou deformação aplicada durante a realização deste ensaio deve pertencer à região viscoelástica linear, i.e., região na qual o módulo dinâmico se mantém praticamente constante (em geral assume-se uma variação máxima de 10% em relação ao seu valor inicial). Isso é necessário para que a resposta do material não esteja sujeita a mecanismos de danos que causem não linearidade, como altas deformações ou início de processos de fratura. Dessa forma, a resposta do material será independente da magnitude do carregamento aplicado fixadas as condições de temperatura e frequência.

Com relação à temperatura, este ensaio geralmente é realizado em diferentes temperaturas e, aplicando o Princípio de Superposição Tempo-Temperatura (PSTT), é possível construir a chamada curva mestra, a qual descreve o comportamento do material para uma ampla faixa de temperaturas e frequências. O Quadro 1 apresenta alguns parâmetros de entrada adotados por diferentes autores para a realização deste ensaio em MAFs.

Quadro 1 - Parâmetros de entrada para os ensaios de varredura de frequência encontrados na literatura

| Autor               | Tipo de Carregamento  | Magnitude do Carregamento | Frequência   | Temperatura               |
|---------------------|-----------------------|---------------------------|--------------|---------------------------|
| Kim et al (2006)    | Deformação Controlada | $<90 \mu\epsilon$         | 0,1 a 10 Hz  | 10 a 40°C                 |
| Coutinho (2012)     | Deformação Controlada | $65 \mu\epsilon$          | 0,01 a 25Hz  | 5, 15, 35 e 50°C          |
| Freire et al (2015) | Deformação Controlada | $65 \mu\epsilon$          | 0,1 A 25 Hz  | 10, 20, 30, 40, 50 e 60°C |
| Fonseca (2016)      | Deformação Controlada | $65 \mu\epsilon$          | 0,01 a 25Hz  | 25, 40 e 55°C             |
| Ng (2017)           | Tensão Controlada     | 15 kPa                    | 0,05 a 30 Hz | 25°C                      |

Fonte: Autora

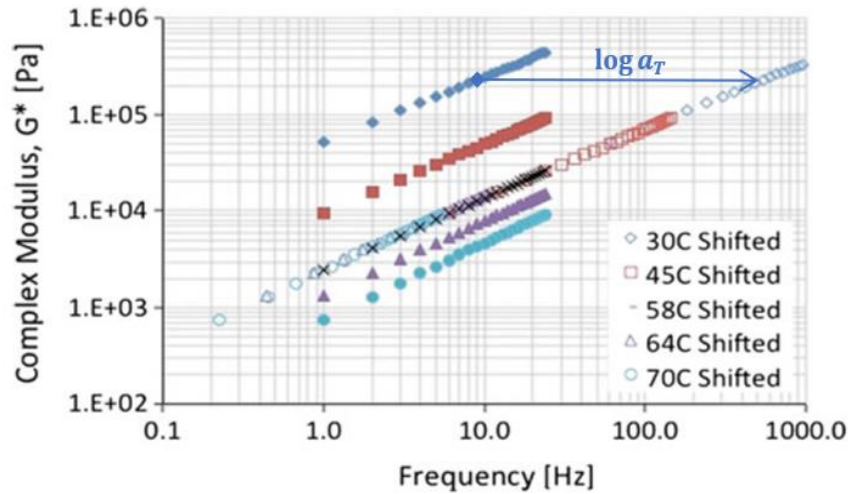
### 2.2.3.1. Curvas Mestras

As curvas mestras representam graficamente a variação de uma propriedade viscoelástica do material, por exemplo o ângulo de fase ( $\delta$ ) ou módulo complexo ( $G^*$ ), em função da frequência do carregamento aplicado, descrevendo assim o comportamento reológico do material para uma temperatura de referência. A partir da translação horizontal das curvas mestras, ao longo do eixo da frequência, é possível obter novas curvas que representam o comportamento reológico do material em diferentes temperaturas. Assim, através das curvas mestras é possível descrever o comportamento do material para uma ampla faixa de temperaturas e frequências.

A construção de uma curva mestra e a translação desta para a obtenção das características do material em diferentes temperaturas baseia-se no Princípio da Superposição Tempo-Temperatura. O PSTT é um método analítico que estabelece uma equivalência de comportamentos entre as variáveis de tempo (ou frequência de carregamento) e temperatura, de forma que as propriedades mecânicas que o material apresenta quando submetido a altas temperaturas equivale às aquelas apresentadas quando

este está sujeito a baixas frequências de carregamento e vice versa. Sendo assim, a aplicação do PSTT permite que as curvas de *propriedade reológica do material x frequência de carregamento*, obtidas para diferentes temperaturas por meio do ensaio de varredura de frequência, possam ser superpostas em uma única curva, a curva mestra, e que esta possa ser deslocada ao longo do eixo das frequências para descrever o comportamento do material em diferentes temperaturas (COUTINHO, 2012). A Figura 13 apresenta um exemplo do deslocamento das curvas obtidas em um ensaio de varredura de frequência para a obtenção da curva mestra para uma temperatura de referência.

Figura 13 - Representação do deslocamento horizontal de uma curva de temperatura qualquer em relação à curva de referência



Fonte: adaptado de Little, Allen e Bhasin (2018)

O deslocamento horizontal partindo de uma curva de temperatura  $T$  qualquer até a curva mestra corresponde a  $\log a_T$ , como indicado na Figura 13. A dependência desse fator de deslocamento com a temperatura pode ser ajustada segundo alguns modelos disponíveis na literatura, como o modelo de Arrhenius, apresentado na Equação 9, e o modelo de Williams-Landel-Ferry (WLF) apresentado na Equação 10.

$$\log a_T = C \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_R} \right) \quad (9)$$

$$\log a_T = \frac{C_1(T-T_R)}{C_2+(T-T_R)} \quad (10)$$

Os parâmetros  $C$ ,  $C1$  e  $C2$  presentes nos modelos apresentados correspondem a constantes características de cada material viscoelástico e podem ser obtidos da curva de regressão gerada com os dados experimentais. A escolha por um ou outro modelo de ajuste depende da diferença entre a temperatura de referência e a temperatura a ser analisada, de forma que se esta diferença for menor ou igual a 20°C a equação de Arrhenius é a mais indicada, caso contrário o recomendado é utilizar o modelo de WLF para o ajuste de dados (CHEUNG, 1995).

Feitos os ajustes, é possível então calcular  $\log a_T$  para qualquer temperatura  $T$  e, a partir da Equação 11, encontrar a propriedade viscoelástica de interesse do material nessa temperatura para qualquer frequência.

$$\log a_T = \log f_r - \log f_T \quad (11)$$

Onde:  $f_r$ : frequência da curva de referência correspondente a uma propriedade viscoelástica qualquer, conhecida como *frequência reduzida*;  $f_T$ : frequência da curva de uma temperatura  $T$  qualquer correspondente à mesma propriedade viscoelástica associado à  $f_r$ .

É importante ressaltar que a aplicação do PSTT para a caracterização reológica do material sob quaisquer condições de carregamento não nos fornece um resultado exato, mas sim uma boa aproximação da realidade.

#### 2.2.4. Ensaio de Varredura de Tempo

O ensaio de varredura de tempo é um tipo de ensaio de fadiga conduzido no DSR, à temperatura e frequência constantes, e que consiste na aplicação de um carregamento (deformação ou tensão controlada) de forma cíclica senoidal sobre o corpo-de-prova. Durante o ensaio a resposta a estas solicitações é monitorada, obtendo como dados de saída os valores de tensão de cisalhamento, deformação, ângulo de fase, módulo

dinâmico, entre outros. O ensaio de varredura de tempo normalmente é conduzido à temperaturas intermediárias, uma vez que é nessa faixa de temperaturas que se desenvolve o mecanismo de dano por fadiga. O Quadro 2 apresenta alguns parâmetros de entrada adotados por diferentes autores para a realização deste ensaio em MAFs.

Quadro 2 - Parâmetros de entrada para os ensaios de varredura de tempo encontrados na literatura

| Autor                     | Tipo de Carregamento            | Magnitude do Carregamento           | Frequência | Temperatura |
|---------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|------------|-------------|
| Kim et al (2006)          | Deformação Controlada           | 2000 a 8500 $\mu\epsilon$           | 10 Hz      | 25°C        |
| Castelo Branco (2008)     | Tensão e Deformação Controladas | <107 kPa 2000 $\mu\epsilon$         | 10 Hz      | 25°C        |
| Coutinho (2012)           | Tensão e Deformação Controladas | 442 kPa e 430 $\mu\epsilon$         | 10 Hz      | 25°C        |
| Fonseca (2016)            | Tensão Controlada               | 300 kPa                             | 10 Hz      | 25°C        |
| Ng (2017)                 | Tensão Controlada               | 150, 300 e 400 kPa                  | 1 Hz       | 25°C        |
| Ningappa e Suresha (2020) | Deformação Controlada           | 600, 900, 1200 e 1500 $\mu\epsilon$ | 10 Hz      | 25°C        |

Fonte: Autora

Com essas informações é possível aplicar o modelo simplificado do dano contínuo viscoelástico (S-VECD), detalhado posteriormente, para analisar a evolução do dano por fadiga gerado no material durante a aplicação do carregamento.

#### 2.2.4.1. S - VECD

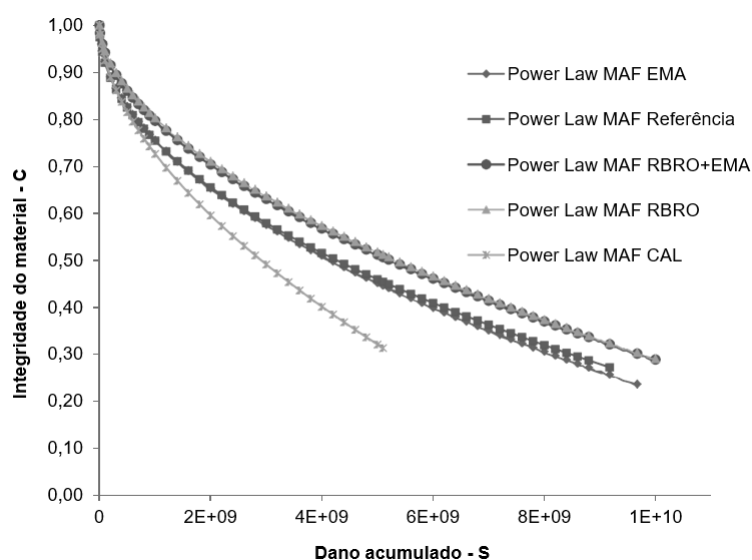
O modelo simplificado de dano contínuo viscoelástico (S-VECD) têm sido utilizado para previsão de dano relacionado à fadiga em misturas asfálticas, ligantes asfálticos e mais recentemente em MAFs (KARKI, 2014; BABADOPULOS, 2014; FREIRE, 2015; FONSECA, 2016). O S-VECD é uma simplificação proposta por Underwood et al. (2012) do modelo de dano contínuo viscoelástico (VECD) que já vinha sendo utilizado para previsão do desempenho de pavimentos asfálticos. Os modelos se baseiam na Teoria do trabalho potencial e no Princípio da correspondência elástica-viscoelástica propostos por Schapery (1984).

Dois parâmetros são quantificados no modelo S-VECD, que são: a pseudo-rigidez (C), que está relacionada com a integridade do material, e o dano (S), que é encontrado a partir de mudanças na microestrutura causadas pela perda da

integridade do material. A curva característica do dano ( $C \times S$ ) representa a relação entre esses dois parâmetros e é única para cada tipo de material. Ou seja, ela representa uma propriedade fundamental do material, sendo sempre a mesma independente do ensaio ser conduzido à tensão ou deformação controlada, do modo de carregamento aplicado ou da variação de frequência e temperatura utilizada (KARKI, 2014; FREIRE, 2015). Dessa forma, a avaliação da curva característica de dano de diferentes materiais permite que se entenda a diferença do comportamento de cada um destes diante do fenômeno de fadiga.

A Figura 14 ilustra um exemplo de curvas características de dano para diferentes matrizes de agregados finos. Pode-se observar, por exemplo, que as amostras de MAF com RBRO e RBRO+EMA são as que possuem o maior valor para a integridade do material diante de um mesmo nível de dano, seguidas das amostras com EMA e de Referência. Já a amostra de MAF com CAL, estas são as misturas que têm sua integridade mais reduzida para pequenas quantidades de dano, o que indica que uma menor tolerância ao dano por fadiga para estes materiais.

Figura 14 - Exemplo de Curvas  $C \times S$  para MAFs com diferentes composições



Fonte: Fonseca (2016)

A curva característica de dano de um material é construída a partir de técnicas de regressão aplicadas aos pares ( $C, S$ ), sendo estes parâmetros calculados para cada

ciclo de carregamento ao qual o material é submetido no ensaio de fadiga. A seguir são dados detalhes a respeito da realização destes cálculos.

A obtenção da pseudo-rigidez ( $C(S)$ ) se dá pela relação entre a tensão entre picos para cada ciclo de carregamento do ensaio ( $\tau_{pp}$ ) e a pseudo-deformação do material também entre picos ( $\gamma_{pp}^R$ ), sendo esta relação corrigida por um fator denominado de Dynamic Modulus Ratio (**DMR**), utilizado para corrigir a dispersão obtida de amostra para amostra. A Equação 12 demonstra essa relação.

$$C(S) = \frac{\tau_{pp}}{\gamma_{pp}^R \times DMR} \quad (12)$$

A pseudo-deformação ( $\gamma^R$ ) representa a relação entre a tensão viscoelástica linear obtida de um carregamento arbitrário ( $\tau_{LVE}$ ) pelo seu correspondente módulo de referência ( $G_R$ ), que geralmente é definido como unitário (Equação 13). A pseudo-deformação entre picos, por sua vez, é calculada por meio da Equação 14, sendo  $|G^*|_{LVE}$  o módulo dinâmico obtido na região viscoelástica linear do material e mesma frequência e temperatura em que o ensaio de fadiga é realizado.

$$\gamma^R = \frac{\tau_{LVE}}{G_R} \quad (13)$$

$$\gamma_{pp}^R = \frac{1}{G_R} (\gamma_{pp} \times |G^*|_{LVE}) \quad (14)$$

A obtenção de  $|G^*|_{LVE}$  pode ser feita de duas formas. A primeira é aplicando a Equação 15, utilizando coeficientes da série de Prony fitados dos dados do ensaio experimental. A segunda é por meio da aplicação de pequena deformação de cisalhamento senoidal na amostra, por determinado período de tempo, na frequência e temperatura em que seria realizado o teste de fadiga, utilizando o DSR. As amplitudes de tensão ( $\tau_0$ ) e de deformação ( $\gamma_0$ ) computadas ao longo do ensaio seriam então utilizadas para cálculo do  $|G^*|_{LVE}$  (Equação 16).

$$|G^*|_{LVE} = \sqrt{\left[ G_{\infty} + \sum_{m=1}^N \frac{G_m \omega_R^2 \rho_m^2}{\omega_R^2 \rho_m^2 + 1} \right]^2 + \left[ \sum_{m=1}^N \frac{G_m \omega_R \rho_m}{\omega_R^2 \rho_m^2 + 1} \right]^2} \quad (15)$$

$$|G^*| = \frac{\tau_0}{\gamma_0} \quad (16)$$

Onde  $\omega_R$  é a frequência angular reduzida, obtida a partir da frequência angular utilizada no ensaio de fadiga e do fator de deslocamento tempo-temperatura para a temperatura do ensaio de fadiga.

O parâmetro **DMR**, por sua vez, pode ser determinado por meio da relação do módulo dinâmico obtido no ensaio de fadiga ( $|G^*|_{\text{fingerprint}}$ ) pelo ( $|G^*|_{LVE}$ ), como mostra a Equação 17.

$$DMR = \frac{|G^*|_{\text{fingerprint}}}{|G^*|_{LVE}} \quad (17)$$

Na sequência, o cálculo do acúmulo de dano para cada ciclo de carregamento envolve as variáveis apresentadas anteriormente: a integridade do material ao longo do ensaio, o coeficiente DMR, a pseudo-deformação entre picos e, adicionalmente, os tempos de início e término de cada ciclo ( $t_i$  e  $t_{i-1}$ ) e o expoente alfa ( $\alpha$ ), que representa o expoente de evolução de dano e pode ser obtido através da curva mestra do módulo de relaxação do material. Assim, o acúmulo de dano pode ser calculado pela Equação 18.

$$S = \sum_{i=1}^N \left[ \frac{DMR}{2} (\gamma_{pp}^R)^2 (C_{1-i}^* - C_i^*) \right]^{\frac{\alpha}{1+\alpha}} \cdot [t_i - t_{i-1}]^{\frac{\alpha}{1+\alpha}} \quad (18)$$

De posse dos pares (C, S) para cada ciclo de carregamento do ensaio, pode-se então aplicar técnicas de regressão para a construção da curva C x S. Esta pode ser ajustada segundo as equações 19 e 20. O modelo apresentado na Equação 19 corresponde a um ajuste exponencial, enquanto o apresentado na equação 20

corresponde a uma função denominada “Power Law” (FONSECA, 2016).

$$C(S) = e^{aS^b} \quad (19)$$

$$C(S) = 1 - C_{11}S^{C_{12}} \quad (20)$$

### 2.2.5. Procedimentos de Mistura e Compactação de MAFs

Para a fabricação de amostras de MAFs as seguintes etapas devem ser cumpridas: seleção de materiais, dosagem da mistura e compactação dos corpos de prova. Com relação à seleção de materiais não existe consenso na literatura sobre o tamanho nominal máximo dos agregados que compõem as misturas. Nos Estados Unidos é comum que as MAFs sejam produzidas com material passante na peneira # 16 (1,18 mm). Algumas pesquisas desenvolvidas com esse critério foram as de Kim et al. (2003), Zollinger (2005), Masad et al. (2006), Castelo Branco (2008), Sousa et al. (2013); Karki (2014) e Freire et al. (2017). No Brasil, como a peneira #16 não faz parte da série padrão para composição de misturas asfálticas, os autores têm trabalhado com a peneira #10 (2,00 mm) como limite para a fabricação de MAFs (COUTINHO, 2012; FREIRE, 2015; FONSECA, 2016; NG, 2017; GRASSON FILHO, 2018; RODRIGUES, 2018; OLIVEIRA, 2020).

Freire, Castelo Branco e Vasconcelos (2014) conduziram ensaios de fadiga em amostras com ambos os tamanhos nominais máximos de agregados citados (1,18 mm e 2,00 mm) e concluíram o desenvolvimento de dano por fadiga não é afetado por essa diferença no tamanho máximo das partículas. Dessa forma, tanto o material passante na peneira #16 quanto o passante na peneira #10 podem representar satisfatoriamente a parte fina das misturas asfálticas para a caracterização do dano por fadiga. Com relação à dosagem e compactação das MAFs, algumas metodologias foram desenvolvidas desde que os estudos se iniciaram com Kim et al. (2003). A seguir são apresentados os principais métodos de dosagem e compactação de matrizes de agregados finos.

### **2.2.5.1. Métodos de Dosagem**

As primeiras pesquisas desenvolvidas com MAFs não tiveram um preciosismo muito grande quanto à dosagem das misturas. Os autores adotaram arbitrariamente um teor de ligante de 8%, que seria o necessário para garantir um recobrimento dos agregados com um filme de 10  $\mu\text{m}$  de espessura. O teor fixado não apresentava qualquer relação com a dosagem da mistura asfáltica completa correspondente (KIM et al., 2003; ZOLLINGER, 2005).

Com o aumento do número de estudos envolvendo MAFs, principalmente com o objetivo de utilizá-las para previsão de desempenho de concretos asfálticos, surge então a necessidade de desenvolver procedimentos que resultassem em amostras que fossem capazes de representar com máxima precisão a parte fina das misturas asfálticas completas. Diante dessa demanda, nos últimos anos foram desenvolvidas cinco principais metodologias para dosagem de MAFs: Castelo Branco (2008), Karki (2010), Coutinho (2012) adaptado por Freire (2015), Sousa et al. (2012) e Ng (2017). A maioria das pesquisas desenvolvidas com MAFs utiliza algum desses procedimentos, reproduzindo-os fielmente ou com adaptações, uma vez que ainda não existe normatização para preparação desse tipo de amostras.

O método proposto por Castelo Branco (2008) parte do princípio de que toda a massa de ligante da mistura asfáltica completa está presente na parte fina da mistura. Dessa forma, o teor de ligante é calculado por meio da divisão da massa de ligante da mistura completa pela soma da massa de ligante com a massa de agregados passante na peneira de corte – no caso da pesquisa de Castelo Branco (2008) a peneira #16 (1,18 mm). A autora também estabelece que a curva granulométrica da MAF deve ser equivalente à da mistura completa correspondente, de forma que seja mantida a proporção do material passante na peneira de corte utilizada.

Karki (2010) propôs um método de dosagem semiempírico que estima o teor de ligante das MAFs considerando a existência uma espessura de filme de ligante compartilhada

entre os agregados graúdos e miúdos. O teor de ligante é obtido a partir da subtração da massa de ligante que envolve os agregados graúdos da massa total de ligante presente na mistura. A massa de ligante que recobre os agregados graúdos pode ser estimada com base nas propriedades dos materiais envolvidos e algumas simplificações. As propriedades dos materiais utilizadas neste método são: densidades real e efetiva dos agregados retidos na peneira de corte; densidade do ligante e; área de superfície específica dos agregados retidos na peneira de corte. Com relação às simplificações, Karki (2010) considerou uma espessura de filme de ligante arbitrária ( $12\mu\text{m}$ ) e que os vazios da superfície dos agregados graúdos são preenchidos por ligante, de forma que o agregado passe a apresentar um volume efetivo (média entre o volume real e o volume aparente). A massa de ligante que envolve os agregados graúdos consiste, então, no filme de ligante somado à quantidade de ligante que penetrou os vazios superficiais do agregado.

Sousa et al. (2012) desenvolveram um procedimento experimental para dosagem de MAFs. O método consiste no preparo de misturas asfálticas completas e separação entre as fases graúda e fina, que posteriormente passam por um processo de extração de ligante que permite determinar qual teor estaria associado à cada uma dessas fases. As fases são separadas por peneiramento e a extração de ligante é feita por meio de uma estufa de ignição. Assim, por diferença de massas é possível calcular o teor de ligante presente em cada uma das frações. Assim como no procedimento desenvolvido por Castelo Branco (2008), para Sousa et al. (2012) a curva granulométrica da MAF deve ser proporcional à da mistura completa correspondente, com a diferença de que os autores estabelecem a normalização dos valores em relação à peneira de corte (também foi usada a peneira #16 neste estudo).

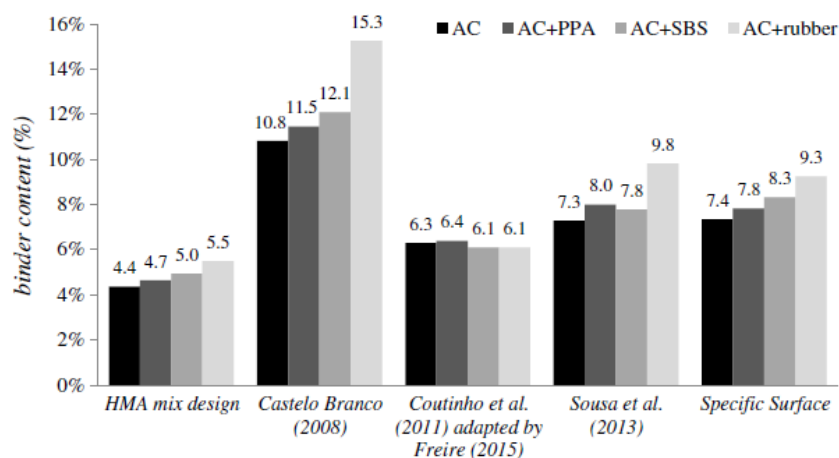
A metodologia sugerida por Coutinho (2012) e adaptada por Freire (2015) é bem parecida com a de Sousa et al. (2012). O procedimento também se baseia na determinação do teor de ligante a partir da extração de ligante da parte fina da mistura asfáltica completa. As diferenças são que neste método a extração é feita com uso de um solvente ao invés da estufa de ignição e que é levada em consideração a porção de

MAF que envolve os agregados graúdos e acaba ficando retida na peneira de corte durante o processo de separação de fases.

Ng (2017) ao estudar MAFs produzidas com asfalto modificado constatou que o processo de dosagem pode ser mais complexo quando se trabalha com esse tipo de material. A autora submeteu suas misturas – uma com asfalto puro e três com asfalto modificado – a quatro procedimentos de dosagem: Castelo Branco (2008), Coutinho et al. (2011) adaptado por Freire (2015), Sousa et al. (2013) e um novo método proposto por ela, baseado no conceito da superfície específica dos agregados. O método proposto por Ng (2017) consiste em três etapas: determinação da superfície específica dos agregados presentes na MAF, levando em consideração sua distribuição granulométrica e massa específica; determinação do módulo de riqueza da MAF - este é um parâmetro que relaciona a espessura do filme de ligante que envolve as partículas na mistura ao nível de tráfego ao qual será submetida – que é obtido por uma relação com o módulo de riqueza da mistura asfáltica correspondente; e, de posse dos dois parâmetros anteriores, determinação do teor de ligante da MAF, fazendo uma correção com relação à absorção do agregado.

No estudo feito por Ng (2017), os resultados dos métodos de dosagem que mais se aproximaram foram os do método de Sousa et al. (2013) e de Ng (2017), como mostra a Figura 15. A autora verificou que as MAFs dosadas pelo método de Castelo Branco (2008) apresentaram os maiores teores de ligante e problemas durante a extração das amostras, que ela atribuiu a um possível excesso de ligante. Enquanto isso, as amostras dosadas pelo procedimento de Coutinho (2012) adaptado por Freire (2015) apresentaram os menores teores e, durante o processo de mistura, foi observado que as partículas de agregado não estavam completamente recobertas por asfalto, o que indica que o método leva a teores de ligante insuficientes.

Figura 15 - Teor de ligante da Mistura Asfáltica Completa e das MAFs associadas dosadas a partir dos métodos disponíveis na literatura



Fonte: Ng (2018)

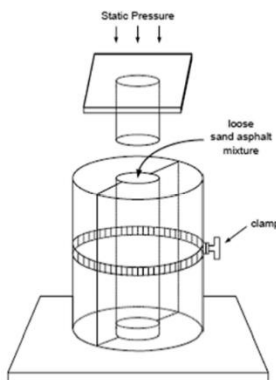
#### 2.2.5.2. Métodos de Compactação

A forma final das amostras de MAFs consiste em um pequeno cilindro com geralmente 12,5 mm de diâmetro e 50 mm de altura. Devido à falta de normatização essas dimensões não são padronizadas e podem variar de acordo com o equipamento no qual serão ensaiadas as amostras (comumente o reômetro de cisalhamento dinâmico). Para chegar na configuração final as amostras precisam ser compactadas e, atualmente, existem duas formas de fazer isso: compactar as amostras diretamente em um molde com seu tamanho definitivo (KIM et al., 2003; FONSECA, 2016; RODRIGUES, 2018; KOMMIDI e KIM 2019; OLIVEIRA, 2020; KOMMIDI et al., 2020 e outros) ou compactar corpos de prova em tamanhos maiores dos quais serão extraídas as amostras de MAFs no tamanho desejado (ZOLLINGER, 2005; CASTELO BRANCO, 2008; SOUSA, 2010; FREIRE, 2015; NG, 2017; GRASSON FILHO, 2019 e outros).

As primeiras MAFs foram compactadas por Kim et al. (2003) em um molde fabricado para este fim, conforme ilustra a Figura 16. Os corpos de prova confeccionados apresentavam as seguintes características: massa de 11,5 g, volume de vazios de 17% e dimensões de 12,0 x 50 mm (diâmetro e altura). O processo de compactação se deu por meio das etapas: mistura dos materiais constituintes, obedecendo à temperatura de mistura do ligante utilizado; aquecimento da mistura solta até a temperatura de

compactação do asfalto; e, por fim, aplicação de pressão estática para compactação da amostra.

Figura 16 - Molde para fabricação de amostras de MAFs

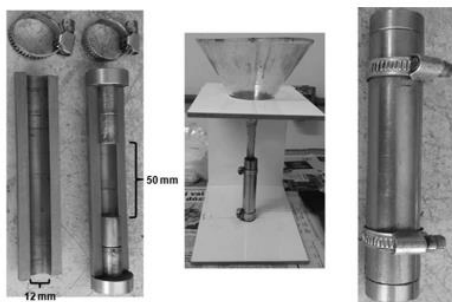


Fonte: Kim et al. (2003)

Outras pesquisas que sucederam à de Kim (2003) utilizaram o mesmo procedimento para preparação de amostras de MAFs, por vezes com alguma adaptação do molde ou da forma de aplicação de carga (FONSECA, 2016; RODRIGUES, 2018; KOMMIDI e KIM 2019; OLIVEIRA, 2020; KOMMIDI et al., 2020; e outros).

Na Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Fonseca (2016) e Rodrigues (2018) utilizaram o mesmo molde para compactação de suas amostras, ilustrado na Figura 17. Enquanto Fonseca (2016) realizou a aplicação de carga de forma manual, pressionando as peças de extremidade do molde, Rodrigues (2018) utilizou uma prensa mecânica para compactar suas amostras, exibida na Figura 18. As amostras de Fonseca (2016) atingiram volume de vazios de  $9 \pm 0,5\%$  e as de Rodrigues (2018)  $4 \pm 0,5\%$ .

Figura 17- Molde para fabricação de amostras de MAFs: (a) Visão interna (b) Preenchimento do molde com mistura solta e (c) Visão externa



Fonte: Fonseca (2016)

Figura 18 - Prensa manual utilizada para compactação de MAFs



Fonte: Rodrigues (2018)

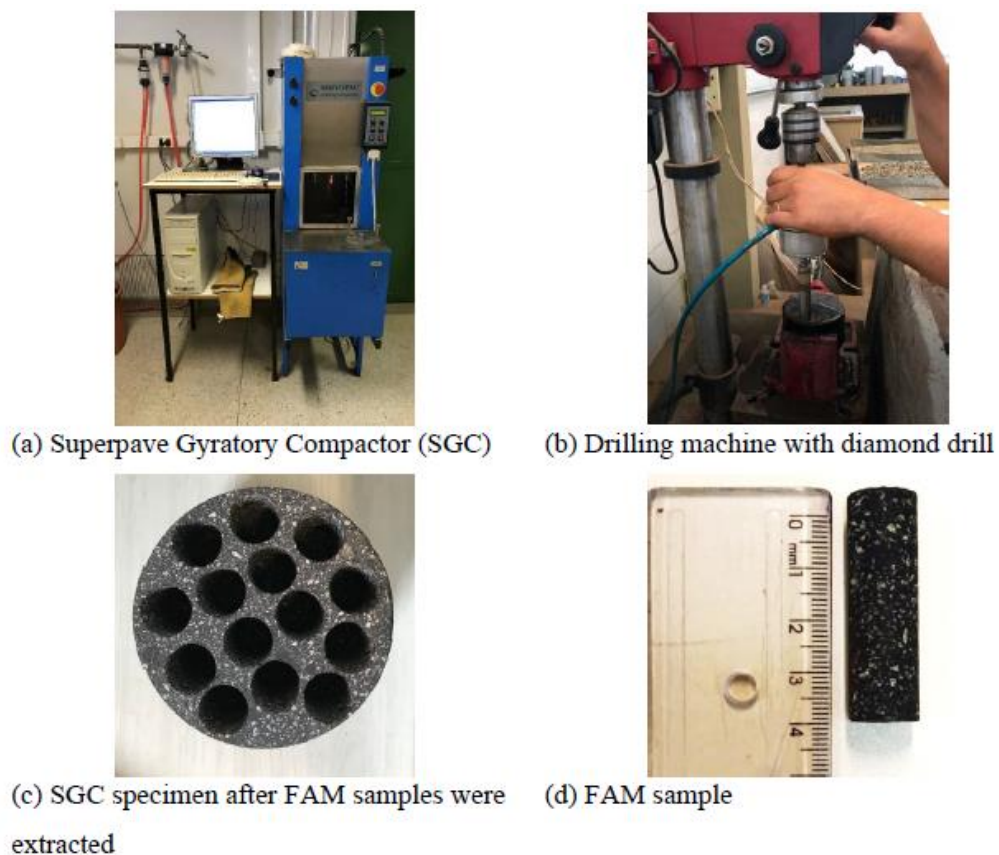
Kommidi et al. (2020) também seguiram o procedimento proposto por Kim et al. (2003) com a utilização de um molde específico para compactação de amostras com 12,5 mm de diâmetro e 50 mm de altura. Os autores utilizaram, no entanto, um equipamento capaz de controlar a magnitude da carga aplicada à amostra durante a compactação. Não foram apresentados os volumes de vazios atingidos pelas amostras neste estudo.

Zollinger (2005) propôs procedimento diferente do realizado por Kim et al. (2003) para confecção das amostras de MAFs. No método desenvolvido pelo autor são moldados corpos de prova de 152 mm de diâmetro e 85 mm de altura utilizando o compactador giratório Superpave e, destes, são extraídas amostras menores de MAFs nas dimensões desejadas. A extração é feita da seguinte forma: primeiro, o topo e a base do corpo de prova maior são serrados para que as amostras atinjam a altura desejada e, em seguida, utiliza-se o cilindro de perfuração para extração de amostras cilíndricas. O autor justifica que este procedimento possibilita um maior controle no volume de vazios das amostras e que é realizado em menos tempo quando comparado ao método utilizado por Kim et al. (2003).

Várias pesquisas utilizaram o procedimento proposto por Zollinger (2005) para a compactação de MAFs nos últimos anos (CASTELO BRANCO, 2008; SOUSA, 2010; FREIRE, 2015; NG, 2017; GRASSON FILHO, 2019 e outros). A Figura 19 mostra as

etapas da metodologia, apresentadas no trabalho de Grasson Filho (2019). O Autor utilizou o compactador giratório Superpave para fabricar corpos de prova de 100 mm de diâmetro, submetendo-os a uma pressão de  $600 \pm 18$  kPa e ângulo giratório de  $1,25 \pm 0,02^\circ$ . A extração das amostras foi feita com o auxílio de uma broca de diamante acoplada à uma máquina de perfuração. O volume de vazios atingido pelas amostras ficou em torno de  $4 \pm 1\%$ .

Figura 19- Procedimento de compactação e extração de amostras de MAFs



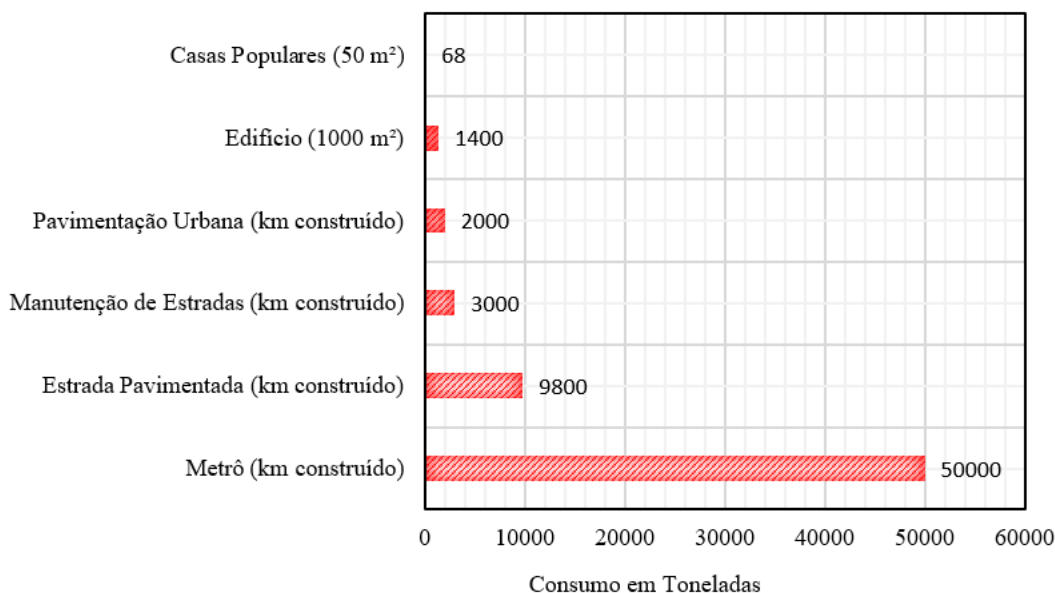
Fonte: Grasson Filho (2019)

### 2.3. AGREGADOS

Os agregados são materiais granulares, naturais ou artificiais, sem forma e volume definidos, de dimensões e propriedades estabelecidas para as mais diversas aplicações da engenharia civil. Podem ser classificados como grãos, quando apresentam tamanho máximo nominal entre 152 mm e 4,8 mm, ou miúdos, sendo estes menores que 4,8 mm

e maiores do que 0,075 mm. A Figura 20 mostra o consumo médio (em toneladas de agregados) para algumas das aplicações mais clássicas desse tipo de material.

Figura 20 - Consumo (em toneladas) de agregados para diferentes aplicações



Adaptado de ANEPAC (2015)

Pode-se observar que o setor de infraestrutura é o maior responsável pela demanda de agregados minerais. Estes materiais são utilizados para compor lastros de ferrovias, camadas granulares de pavimentos flexíveis, sistemas de drenagem e constituem ainda cerca de 80% do volume e 95% do peso das misturas asfálticas aplicadas em camadas de revestimento (LITTLE, ALLEN e BHASIN, 2018).

A importância dos agregados para as misturas asfálticas utilizadas em camadas de revestimento de pavimentos flexíveis vai além do grande volume que ocupam em sua composição. Estes materiais são responsáveis por conferir capacidade de suporte à estrutura e promover a estabilidade mecânica e a integridade do concreto asfáltico. Sendo assim, as características dos agregados utilizados para a produção de misturas asfálticas têm forte influência no desempenho destas ao longo de sua vida útil (VALDÉS-VIDAL et al., 2015; MORENO e RUBIO, 2013; ÖZGAN et al., 2013; GOLALIPOUR et al., 2012; MILLER et al., 2011; CHEN, CHANG e LIN 2005; MONISMITH, 1970).

Para cumprir com seu papel diante do comportamento global do concreto asfáltico os agregados selecionados devem apresentar algumas características como resistência à compressão, ao impacto, ao desgaste, ao intemperismo, entre outras. Também é fundamental que os agregados apresentem características que promovam boa adesividade ao CAP, de forma a minimizar a ocorrência de fraturas na matriz asfáltica, o que pode retardar o aparecimento de manifestações patológicas como o dano por umidade e o trincamento devido ao dano por fadiga.

Algumas das características dos agregados que influenciam em sua adesividade ao CAP são suas propriedades químicas e físicas. Propriedades como textura superficial, porosidade, absorção, área superficial e tamanho da partícula são responsáveis por promover a adesividade mecânica entre o ligante e os agregados (LUCAS JÚNIOR, 2021; MOURA, 2020; PACKHAM, 2003; TERREL e AL-SWAILMI, 1994). Já as características mineralógicas destes materiais, que têm relação com sua constituição química, determinam a carga elétrica superficial das partículas, a qual está intimamente ligada com a adesividade química entre o CAP e os agregados (LUCAS JÚNIOR, 2021; MOURA, 2020; HEFER e LITTLE, 2005; HICKS, 1991).

Nas sessões seguintes serão apresentados detalhes sobre dois tipos de propriedades dos agregados que estão sendo investigadas neste estudo: as propriedades morfológicas e mineralógicas. Também será discutida a influência destas no comportamento mecânico do concreto asfáltico e nos mecanismos de adesividade ao ligante betuminoso.

### **2.3.1. Morfologia**

A morfologia dos agregados é definida por três propriedades: forma, angularidade e textura superficial. Estas são propriedades independentes entre si e estão relacionadas a diferentes escalas de análise. A forma trata das relações entre as três dimensões da partícula, podendo esta apresentar geometria plana, alongada, lamelar, cúbica ou esférica. A angularidade se relaciona aos ângulos existentes ao longo da superfície das

partículas. A textura superficial, por sua vez, está ligada às irregularidades superficiais dos grãos (MASAD, 2005; DIÓGENES, 2018; LITTLE, ALLEN e BHASIN, 2018). A Figura 21 mostra uma representação dessas três propriedades.

Figura 21 - Propriedades Morfológicas dos Agregados



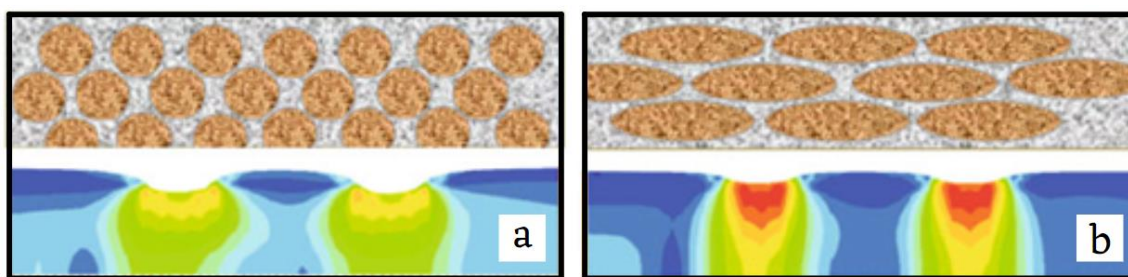
Fonte: Diógenes (2018)

Vários estudos têm demonstrado que as propriedades de forma dos agregados têm influência sobre o comportamento mecânico das misturas asfálticas. A susceptibilidade à deformação permanente, a resistência ao trincamento por fadiga, a rigidez e a estabilidade das misturas são algumas das propriedades que são afetadas pela morfologia dos agregados (VALDÉS-VIDAL et al., 2015; MORENO e RUBIO, 2013; ÖZGAN et al., 2013; GOLALIPOUR et al., 2012; MILLER et al., 2011; CHEN, CHANG e LIN 2005; MONISMITH, 1970).

Pesquisas como a de Liu et al. (2017), Ahmed et al. (2014) e a de Chen, Chang e Lin (2005) trouxeram conclusões a respeito da influência da forma do agregado em propriedades de misturas asfálticas. Os resultados obtidos por estes autores mostram que a incorporação de partículas cúbicas melhoram o desempenho das misturas com relação à estabilidade Marshall, à deformação permanente e ao trincamento por fadiga. Segundo Little, Allen e Bhasin (2018) estes resultados podem ser explicados pelo fato de que agregados com maior grau de esfericidade se depositam de maneira mais uniforme na massa asfáltica quando esta é compactada, o que resulta numa distribuição de tensões mais homogênea ao longo de sua estrutura interna (Figura 22a). De forma contrária,

partículas lamelares ou alongadas tendem a assumir uma orientação preferencial dentro da mistura, o que acaba lhe conferindo propriedades anisotrópicas e tornando o plano horizontal da massa asfáltica menos resistente que o vertical (Figura 22b). Além do problema da anisotropia, a orientação preferencial que as partículas lamelares ou alongadas assumem as torna propensas à fragmentação durante o processo de compactação. A fragmentação dessas partículas resulta em mudanças indesejadas na composição granulométrica das misturas e consequente alteração de suas propriedades mecânicas, por exemplo a redução de sua integridade e estabilidade (VALDÉS-VIDAL et al., 2015; GOLALIPOUR et al., 2012; CHEN, CHANG e LIN 2005; TOPAL e SENGOZ, 2005).

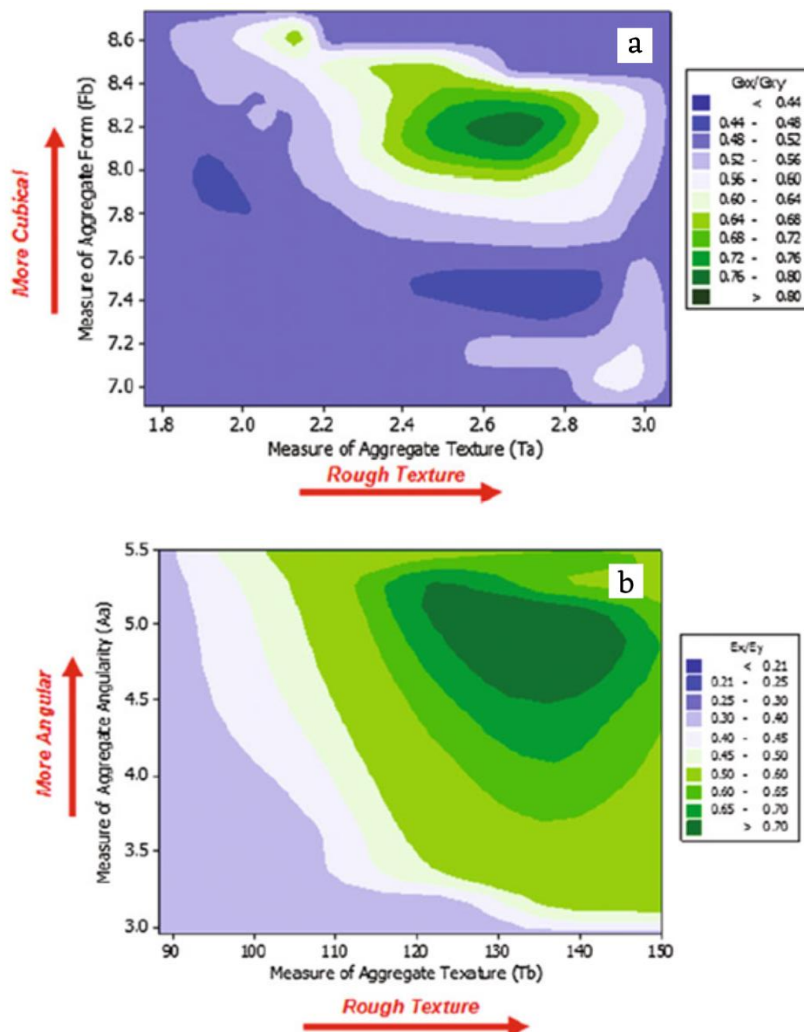
Figura 22 - Deposição das partículas na massa asfáltica e distribuição das tensões ao longo de sua estrutura interna (a) partículas esféricas e (b) partículas alongadas



Fonte: adaptado de Little, Allen e Bhasin (2018)

A distribuição das tensões na estrutura interna da massa asfáltica também é influenciada pelas demais propriedades de forma dos agregados, sendo esta mais homogênea tanto quanto os agregados se apresentarem mais rugosos e angulares. Isso acontece porque essas características conferem à mistura asfáltica um caráter mais isotrópico. Esse nível de isotropia pode ser mensurado pela relação entre o módulo dinâmico horizontal e o módulo dinâmico vertical das misturas (LITTLE, ALLEN e BHASIN, 2018). A Figura 23 mostra o impacto de cada uma das propriedades de forma na isotropia das misturas asfálticas e consequentemente na distribuição das tensões ao longo desta.

Figura 23 - Influência da morfologia dos agregados no nível de isotropia das misturas asfálticas (a) relação entre a forma e a textura superficial e (b) relação entre a angularidade e a textura superficial



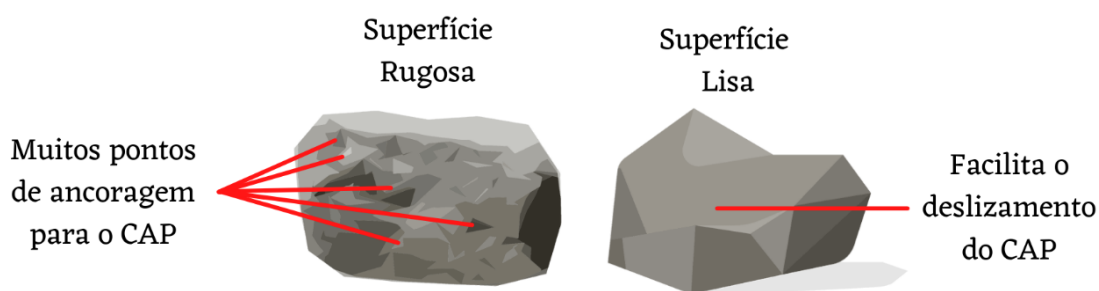
Fonte: Ashtiani e Little (2010)

A influência da angularidade nas propriedades das misturas asfálticas se dá pelo fato de que esta é a propriedade responsável pelo intertravamento mecânico entre as partículas presentes na massa asfáltica. Assim, a angularidade possibilita a formação de uma rede interconectada de grãos que é capaz de fazer a distribuição ortogonal das cargas atuantes na estrutura e que eleva o atrito interno da mesma, promovendo assim um aumento da resistência do material compósito. Diante disso, utilização de agregados mais angulosos tende a favorecer o desempenho das misturas asfálticas (LITTLE, ALLEN e BHASIN, 2018). A estabilidade, a resistência a tração e ao dano por fadiga e a adesividade ao ligante betuminoso são algumas das propriedades das misturas asfálticas que são melhoradas pelo uso de agregados com maior angularidade (GOUVEIA, JÚNIOR E

SOARES, 2007; SOUZA, 2012; LIU et al., 2017; MORENO e RUBIO, 2012; CUI et al., 2018).

Como já havia sido mencionado, as propriedades morfológicas dos agregados também têm relação com a adesividade mecânica que existe entre estes e o CAP, uma vez que são responsáveis por promover um intertravamento físico entre as partículas e o ligante asfáltico (CUI et al., 2018). Este mecanismo de adesividade é influenciado principalmente pela textura superficial dos grãos, sendo favorecido quando o agregado apresenta uma superfície mais rugosa e mais porosa (LUCAS JÚNIOR, 2021; MOURA, 2020; CUI et al., 2018; PACKHAM, 2003; TERREL E AL-SWAILMI, 1994). A Figura 24 ilustra a influência da textura superficial no mecanismo de adesividade descrito.

Figura 24 - Representação esquemática da influência da textura superficial na adesividade física entre o agregado e o ligante asfáltico



Fonte: Autora

Com relação especificamente ao fenômeno de fadiga, objeto de estudo do presente trabalho, a pesquisa de Valdes-Vidal et al. (2019) traz resultados a respeito da influência das propriedades de forma dos agregados neste mecanismo de deterioração dos pavimentos. Três agregados foram utilizados nesta pesquisa, dois de origem fluvial, denominados AF1 e AF2, e um agregado britado. O autor determinou o Índice de Partícula (PI) dos agregados miúdos, parâmetro este que caracteriza a angularidade e a textura dos grãos e é determinado pela norma ASTM-D3398, e em seguida conduziu ensaios de fadiga nas misturas asfálticas produzidas com cada um dos três de agregados. Os resultados mostraram que agregados miúdos com maior PI (AF1, AF2 e AC, respectivamente) melhoram o desempenho das misturas asfálticas frente ao fenômeno de fadiga.

Além das propriedades de forma dos agregados, outras características que são de particular interesse deste estudo são suas propriedades mineralógicas. Estas serão apresentadas no tópico a seguir, bem como será discutido como essas propriedades influenciam no comportamento das misturas asfálticas.

### 2.3.2. Mineralogia

Os minerais são as unidades constituintes das rochas, e consequentemente dos agregados, sejam eles naturais ou britados. São substâncias naturais, inorgânicas e homogêneas, que apresentam estrutura atômica e composição química bem definidas, e que possuem uma série exclusiva de propriedades físicas: dureza, clivagem, fratura, brilho, cor, traço, densidade e hábito cristalino (DIÓGENES, 2018). Segundo Press et al. (2006), milhares de minerais são conhecidos, mas só pouco mais de 30 predominam na constituição da maioria das rochas. Estes são conhecidos como minerais formadores de rochas. O Quadro 3 apresenta uma descrição de alguns destes minerais e suas principais características.

Quadro 3 – Minerais e suas características principais

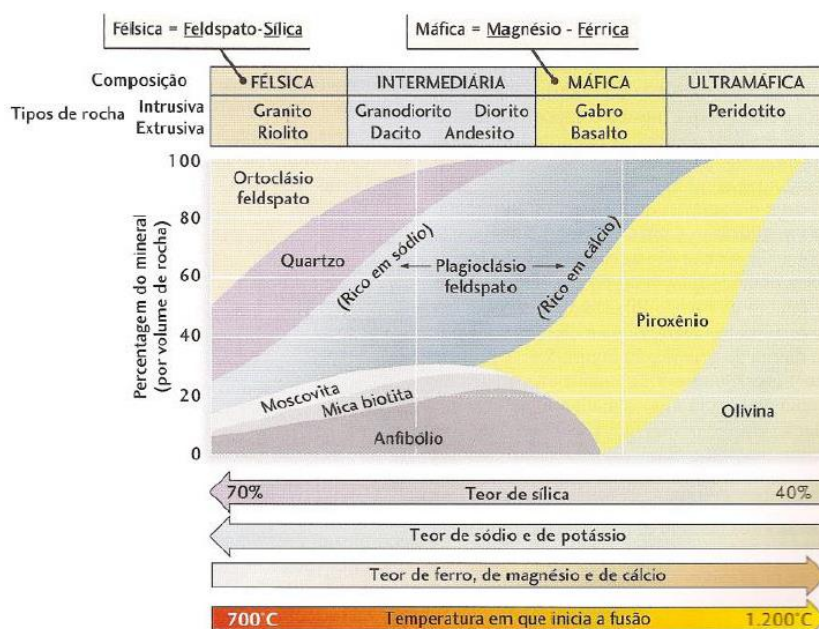
| Mineral    | Grupo                    | Fórmula química                  | Dureza  | Clivagem                                                      | Outras informações                                                                                                |
|------------|--------------------------|----------------------------------|---------|---------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Biotita    | Micas                    | $K(Mg,Fe)_3(AlSi_3O_{10})(OH)_2$ | 2,5 a 3 | Perfeita em uma direção                                       | Folhas flexíveis e elásticas. Sob ação do intemperismo, tornam-se lixiviadas de seus álcalis, perdem elasticidade |
| Albita     | Feldspatos plagioclásios | $NaAlSi_3O_8$                    | 6       | Duas direções, sendo uma perfeita e uma boa                   | O feldspato cálcico tende a se alterar para uma mistura complexa de minerais, dentre os quais: calcita e epidoto  |
| Anortita   |                          | $CaAl_2Si_2O_8$                  |         |                                                               |                                                                                                                   |
| Quartzo    | Grupo da sílica          | $SiO_2$                          | 7       | Pelo menos uma direção bem desenvolvida                       | Estabilidade química e mecânica                                                                                   |
| Microclina | Feldspatos potássicos    | $KAlSi_3O_8$                     | 6       | Duas direções, sendo uma perfeita e uma boa (89°30' entre si) | Quando atacados por águas ligeiramente ácidas, se alteram, dando lugar a argilo-minerais ou a muscovita           |
| Ortoclásio |                          | $KAlSi_3O_8$                     | 6       | Duas direções, sendo uma perfeita e uma boa (90° entre si)    |                                                                                                                   |
| Sanidina   |                          | $KAlSi_3O_8$                     | 6       | Duas direções, sendo uma perfeita e uma boa                   |                                                                                                                   |
| Nefelina   | Feldspatoides            | $(Na,K)AlSiO_4$                  | 6       | Imperfeita em uma direção                                     | Nas superfícies de rochas alteradas, tende a ser corroída, o que a distingue do feldspato e do quartzo            |

Fonte: Diógenes (2018)

A combinação dos minerais em diferentes tipos e proporções através de um processo geológico definido e sob determinadas condições de temperatura e pressão dá origem às rochas (OLIVEIRA E BRITO, 1998). Estas podem ser agrupadas em três grandes categorias: rochas ígneas ou magmáticas; rochas metamórficas; e rochas sedimentares. Segundo Diógenes (2018) os dois primeiros grupos são aqueles mais explorados para a produção de agregados utilizados na construção civil.

As rochas ígneas originam-se do resfriamento e solidificação do magma, e é possível distingui-las entre si por diferenças nos tamanhos dos cristais e em sua composição química e mineralógica. Com relação à mineralogia, as rochas ígneas podem ser classificadas como félsicas, máficas ou intermediárias, de acordo com as proporções dos minerais de cor clara (félsicos) e de cor escura (máficos) que estão presentes em sua composição (Figura 25). São exemplos de rochas ígneas amplamente conhecidas o granito e o basalto.

Figura 25 - Diferenciação entre rochas ígneas de acordo com a composição mineralógica



Fonte: Press et al. (2006)

As rochas metamórficas, por sua vez, originam-se do metamorfismo de qualquer tipo de rocha, devido à ação das altas pressões e temperaturas do interior da Terra. Assim como nas rochas ígneas, na constituição mineralógica das rochas magmáticas há predomínio

de silicatos: quartzo, feldspato, mica, piroxênio... Além destes minerais, as rochas metamórficas também podem apresentar em sua constituição alguns minerais exclusivos como a cianita, a estauroлита e algumas variedades de granadas (PRESS et al., 2006). O mármore e o gnaiss são alguns exemplos deste tipo de rocha.

A identificação da rocha que originou os agregados selecionados para compor uma mistura asfáltica, assim como seu grau de alteração, é de extrema importância para que se tenha conhecimento da influência que este material exercerá no concreto asfáltico resultante. Isso porque as propriedades dos minerais que compõem os agregados têm impacto sobre o comportamento mecânico destes (BÉRUBÉ, 2001) e sua composição química afeta diretamente a adesividade dos agregados ao ligante betuminoso (BERNUCCI et al., 2008; ZHANG, APEAGYEI E AIREY, 2015). A identificação da rocha pode ser feita por meio da determinação de algumas das suas propriedades, como a textura, a granulação e propriedades microestruturais. Uma técnica bastante empregada para este fim é a análise petrográfica de lâminas delgadas produzidas com a rocha de interesse. Outras técnicas mais acessíveis também podem ser utilizadas, como a análise das partículas individuais dos agregados utilizando um microscópio óptico ou lupa de mão, sendo estas análises muitas vezes complementadas com o ensaio de Difração de Raios-X. A utilização destas técnicas para descrever o grau de alteração da rocha também é importante para avaliar a influência do agregado na mistura asfáltica pois, ainda que a mineralogia de um certo agregado seja uniforme, fatores como oxidação, intemperismo e lixiviação podem alterar o seu comportamento (BERNUCCI et al., 2008).

Com relação à influência do tipo de rocha no desempenho mecânico dos agregados, Bérubé (2001) relaciona propriedades como resistência ao polimento, à abrasão e à fragmentação à composição mineralógica e outras características petrográficas das partículas. De acordo com o autor, a resistência ao polimento de um agregado é função das durezas dos minerais presentes neste e da relação entre elas. A susceptibilidade à abrasão, por sua vez, relaciona-se à dureza dos minerais presentes, aos aspectos de textura da rocha e à sua porosidade. Por fim, a resistência à fragmentação associa-se a

propriedades como tenacidade e clivagem dos minerais que constituem as partículas e a características da rocha como sua estrutura, descontinuidades e aspectos de textura. A Figura 28 apresenta uma síntese das relações que Berubé (2001) determinou entre mineralogia, petrografia e desempenho mecânico dos agregados.

Figura 26 - Relações entre mineralogia, petrografia e desempenho de agregados com relação ao polimento, à abrasão e à fragmentação

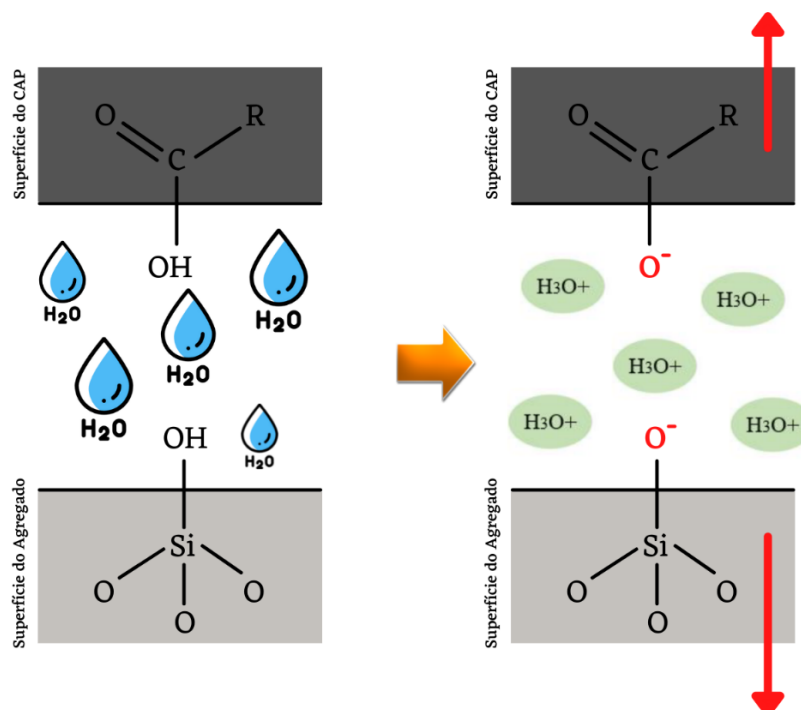


Fonte: adaptado de Bérubé (2001)

Com relação à influência da mineralogia na adesividade entre o agregado e o ligante betuminoso, esta se dá principalmente por uma questão de adsorção química. A presença de minerais silicatados nas rochas conferem a estas um caráter ácido (neste contexto o termo ácido não corresponde ao utilizado na química, mas sim indica a presença de carga elétrica superficial negativa), o que acaba prejudicando sua interação com o ligante betuminoso (D'ANGELO E ANDERSON, 2003; BERNUCCI et al., 2008; MOURA, 2020). Isso acontece porque estes minerais apresentam em sua constituição o composto silanol ( $\text{SiOH}$ ), que tende a reagir com a água liberando o cátion hidrogênio ( $\text{H}^+$ ) e ficando, assim, com carga superficial negativa. Da mesma forma, os grupos ácidos do ácido carboxílico ( $-\text{COOH}$ ) presente no ligante asfáltico também reagem com a água, liberando um cátion hidrogênio ( $\text{H}^+$ ) e deixando o ligante também com carga superficial negativa ( $-\text{COO}^-$ ). Cria-se, portanto, uma força de repulsão entre as rochas que contém minerais silicosos e o ligante asfáltico (DIÓGENES, 2018). A Figura 27

ilustra o mecanismo de adesividade descrito.

Figura 27 - Representação esquemática do mecanismo de adesividade entre um agregado silicoso e o CAP



Fonte: Autora, baseada em Diógenes (2018) e Moura (2020)

Diante da influência da presença de silicatos neste mecanismo de adesividade entre os agregados e o ligante betuminoso, é comum no ramo da pavimentação que as rochas sejam classificadas segundo os termos “ácida” e “básica” para indicar a presença de sílica em sua composição. Como mencionado anteriormente, o sentido destes termos nesse contexto se relaciona à carga elétrica superficial das rochas (BERNUCCI et al., 2008). O Quadro 4 mostra a relação entre a denominação da rocha e o teor de sílica presente em sua composição.

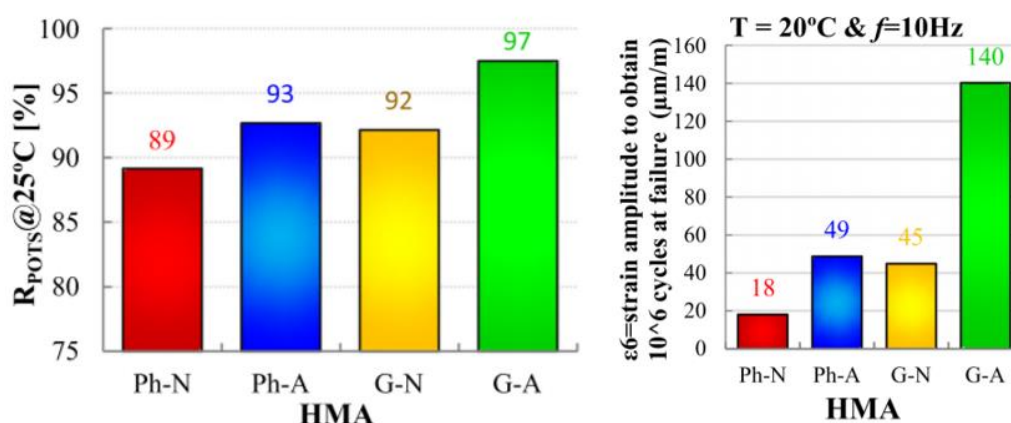
Quadro 4 – Classificação da Acidez/Basicidade das rochas

| Classificação | %Sílica | Quartzo              | Exemplo            |
|---------------|---------|----------------------|--------------------|
| Ácida         | >65     | Presente             | Granito, quartzito |
| Neutra        | 52 a 65 | Pouco ou inexistente | Sienito, diorito   |
| Básica        | 45 a 52 | Raríssimo            | Basalto, gabro     |
| Ultrabásica   | <45     | Inexistente          | Piroxenito         |

Fonte: adaptado de Metso Minerals (2005)

A pesquisa de Lucas Júnior (2019) ilustra bem a influência da adesividade ligante-agregado na resistência à fadiga de misturas asfálticas. O autor produziu quatro misturas com dois tipos de agregados, um de origem fonolítica e outro de origem granítica, sendo duas delas com emprego do ligante natural (Ph-N e G-N) e duas delas com ligante modificado (Ph-A e G-A). Realizou-se então nas misturas o *ensaio Binder Bond Strength* (BBS) para avaliar a adesividade ligante-agregado e, em seguida, o ensaio de fadiga para caracterizar a resistência á fadiga das misturas asfálticas. A Figura 28 mostra que aquelas misturas que apresentaram melhor interação entre o ligante e o agregado (maior  $R_{POTS}$ ) apresentaram também uma maior amplitude de deformação necessária para que ocorresse a falha do material em um número de ciclos fixado no ensaio de fadiga.

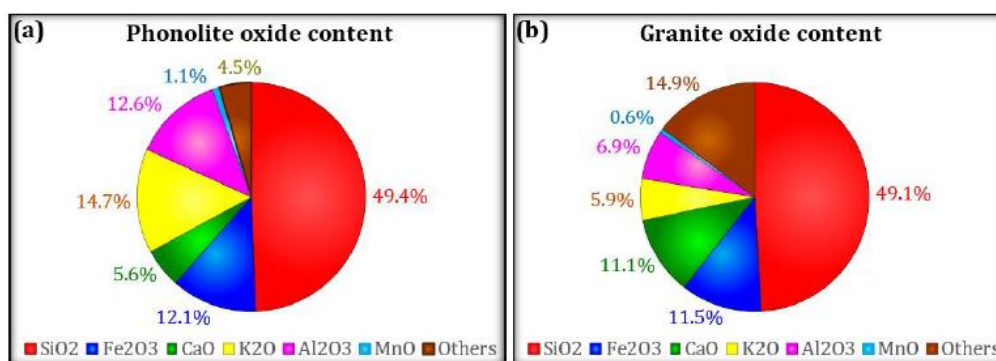
Figura 28 – Resultados dos ensaios de BBS e Fadiga da pesquisa de Lucas Júnior (2019)



Fonte: Lucas Júnior (2019)

Dando continuidade à pesquisa, Lucas Júnior (2021) investigou a composição química dos agregados utilizados no estudo anterior. A Figura 29 mostra que o fonólito e o granito utilizados apresentavam teores de sílica muito semelhantes. A concentração de óxido de cálcio, por outro lado, era duas vezes maior no agregado granítico, o que explica os resultados de adesividade encontrados no trabalho anterior. Isso porque, o óxido de cálcio atua em favor da adesividade (JAMIESON et al., 1995; PASANDÍN e PÉREZ, 2015; SAKANLOU et al., 2018), motivo pelo qual a cal hidratada é muitas vezes acrescentada às misturas asfálticas como melhorador de adesividade.

Figura 29 – Composição Química dos agregados utilizados na pesquisa de Lucas Júnior (2019)



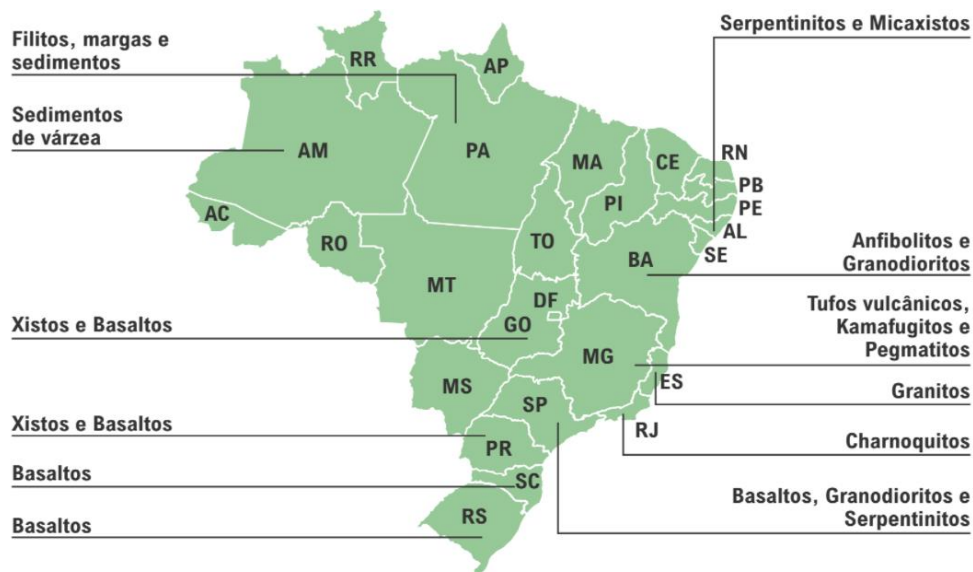
Fonte: Lucas Júnior (2021)

Diante do apresentado, pode-se perceber o quanto é importante que se conheça as características petrográficas e mineralógicas dos agregados selecionados para compor misturas asfálticas. Estas propriedades, bem como as propriedades de forma apresentadas na subseção anterior, podem afetar diretamente o desempenho do concreto asfáltico ao longo de sua vida útil.

### 2.3.3. Agregados empregados para pavimentação no Brasil

Embora as propriedades dos agregados empregados em misturas asfálticas tenham grande influência sobre o comportamento do concreto asfáltico ao longo de sua vida útil, a escolha do tipo de agregado a ser utilizado em uma obra de pavimentação muitas vezes é feita com base na disponibilidade do material na região da obra. Assim, devido à heterogeneidade da formação geológica do Brasil, existe uma variedade de tipos de agregados no território nacional que costumam ser empregados para pavimentação. A Figura 30 mostra a distribuição de alguns tipos de rochas encontradas ao longo do território nacional e a o Quadro 5 apresenta alguns dos agregados comumente empregados para pavimentação no País.

Figura 30 - Distribuição de Rochas ao longo do território do Brasil



Fonte: Theodoro (2020)

Quadro 5 - Tipos de rochas comumente usados como fonte de agregados para pavimentação no Brasil

| Denominação Petrográfica | Descrição                                                                                                               |
|--------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Andesito                 | Variedade de diorito vulcânico, de granulação fina                                                                      |
| Basalto                  | Rocha básica de granulação fina, usualmente vulcânica                                                                   |
| Conglomerado             | Rocha constituída de blocos arredondados ligados por cimento natural                                                    |
| Diorito                  | Rocha plutônica intermediária, constituída de plagioclásio com hornblenda, augita ou biotita                            |
| Gabro                    | Rocha plutônica básica de granulação grossa, constituída de plagioclásio cálcico e piroxênio, algumas vezes com olivina |
| Gnaisse                  | Rocha riscada, produzida por condição metamórfica intensa                                                               |
| Granito                  | Rocha plutônica ácida, constituída principalmente de feldspatos alcalinos e quartzo                                     |
| Calcário                 | Rocha sedimentar, constituída principalmente de carbonato de cálcio                                                     |
| Quartzito                | Rocha metamórfica ou sedimentar constituída quase que totalmente por grãos de quartzo                                   |
| Riolito                  | Rocha ácida, de granulação fina, usualmente vulcânica                                                                   |
| Sienito                  | Rocha plutônica intermediária, constituída de feldspatos alcalinos com plagioclásios, hornblenda, biotita ou augita     |
| Traquito                 | Variedade de sienito de granulação fina, usualmente vulcânico                                                           |

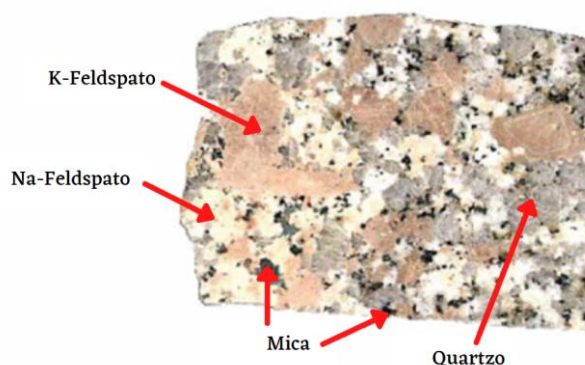
Fonte: Bernucci (2008)

Dentre as rochas apresentadas na Figura 30 e no Quadro 5, uma delas merece destaque: o Granito. Segundo Quaresma (2009) cerca de 85% dos agregados produzidos no Brasil têm origem granito-gnáissica. Este é também o tipo de rocha predominante no estado do Espírito Santo, local onde o presente trabalho foi desenvolvido, tornando esta,

portanto, uma rocha de particular interesse para este estudo.

O granito é uma rocha ígnea intrusiva, ou seja, origina-se da atividade vulcânica e se solidifica no interior da crosta terrestre, de forma lenta, formando minerais cristalinos com grãos médios e grossos. Os principais minerais presentes nesta rocha são o quartzo, os feldspatos e a mica (Figura 31). Devido à alta concentração de quartzo, rochas graníticas apresentam teores de sílica elevados, geralmente acima de 65% (MOGHADAS et al., 2012; JI et al., 2020; XU et al., 2020), o que indica que agregados originados deste tipo de rocha costumam apresentar uma má adesividade ao ligante asfáltico.

Figura 31 – Identificação dos minerais presentes em um Granito



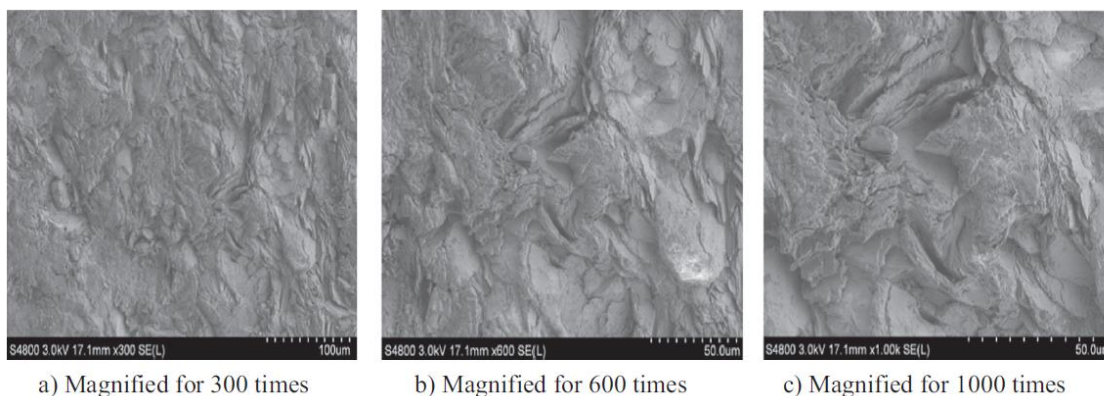
Fonte: Autora

Com relação às propriedades físicas, agregados provenientes de granito geralmente apresentam uma baixa absorção de água, com valores na faixa de 0,4 a 1%, e uma massa específica real variando entre 2,6 e 2,9 g/cm<sup>3</sup> (ONOFRE et al., 2011; COUTINHO, 2012; CHEN et al., 2014; SCHUMACHER, 2018; MOURA, 2020). A Abrasão Los Angeles, deste material, por sua vez, é uma característica que pode variar bastante. As pesquisas de Xu et al. (2020) e Hamed et al. (2020) mostram agregados graníticos com perda de massa por abrasão de 18,2 e 19%, respectivamente, enquanto as pesquisas de Moura (2020), Nepomuceno (2019) e Schumacher (2018) apresentam agregados graníticos com valores de abrasão em torno de 40%.

Com relação às propriedades morfológicas, o trabalho de Diógenes (2018) sugere que a angularidade e a forma dos agregados têm mais relação com o processo de britagem do

que com a mineralogia destes. Em termos de textura superficial, agregados graníticos geralmente se apresentam rugosos. A Figura 32 apresenta imagens da superfície de um agregado granítico geradas por microscopia eletrônica de varredura, onde é possível observar a rugosidade deste material.

Figura 32 –Textura superficial de um agregado granítico obtida por Microscopia Eletrônica de Varredura



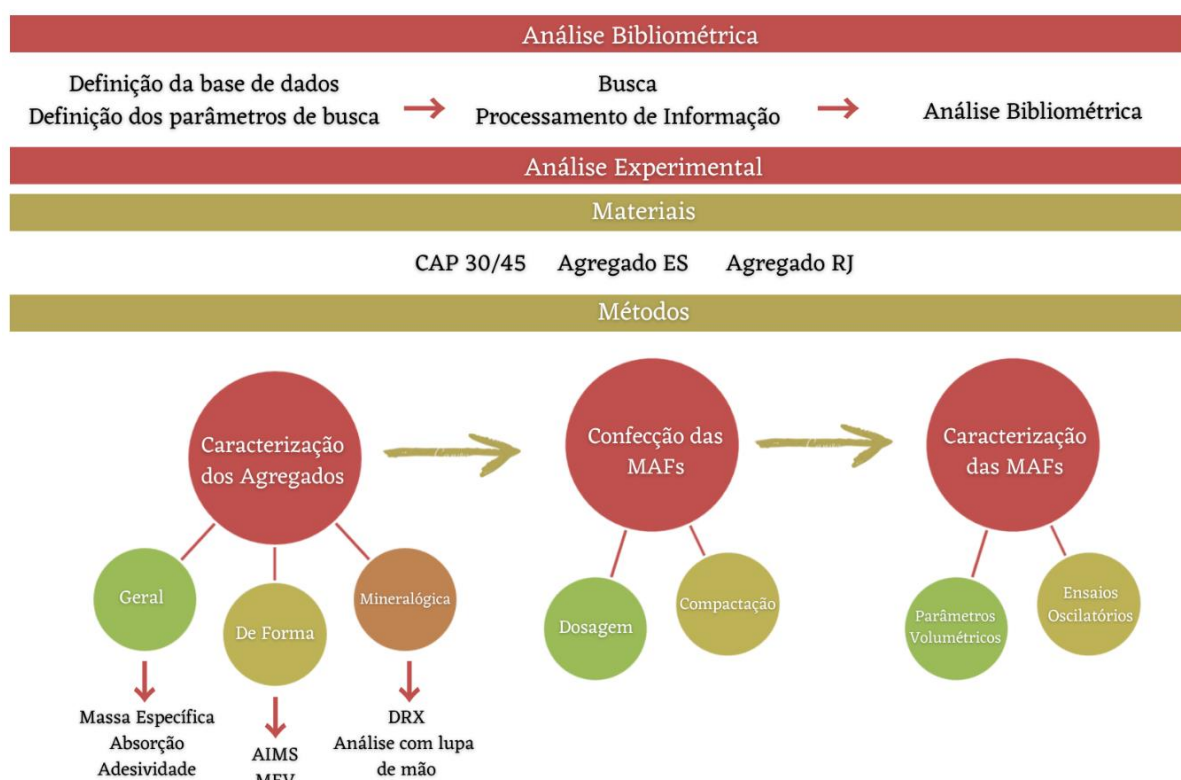
Fonte: Kuang et al. (2016)

Além dos agregados naturais apresentados, muito se tem estudado sobre o emprego de coprodutos siderúrgicos como agregados para pavimentação no Brasil. Esta é vista como uma alternativa mais sustentável para suprir a alta demanda das obras de infraestrutura rodoviária. Diante disso, pesquisas estão avançando na caracterização de escórias da produção do aço e na influência das propriedades deste tipo de material no comportamento do concreto asfáltico (FROSSARD, 2021; MOURA, 2020; IZOTON, 2020; SCHUMACHER, 2018).

### 3. METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentada a metodologia utilizada na condução deste projeto de conclusão de curso. São detalhados os métodos adotados para a realização da análise bibliométrica desenvolvida, bem como são apresentados os materiais e métodos utilizados no programa experimental. A Figura 34 apresenta um esquema geral da metodologia aplicada neste trabalho.

Figura 33 – Representação Esquemática da Metodologia utilizada para o desenvolvimento desta pesquisa



Fonte: Autora

#### 3.1. ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

A análise bibliométrica consiste em uma análise quantitativa da produção científica sobre um tema de interesse. É, portanto, uma metodologia capaz de quantificar e mapear a evolução de um determinado conhecimento científico. Neste trabalho realizou-se uma análise bibliométrica dos tópicos de *Fadiga*, *MAF* e *Influência dos agregados no comportamento do concreto asfáltico*. Para tanto, as seguintes etapas foram executadas:

- a) Definição da base de dados: foi feita uma análise preliminar das bases Web of Science (WoS) e Scopus, onde constatou-se que as duas apresentavam praticamente os mesmos trabalhos indexados diante dos temas de interesse. Optou-se, então, por dar continuidade a esta pesquisa utilizando somente a base Scopus. Esta é uma base de dados da editora holandesa Elsevier e conta com mais de 24.000 arquivos indexados.
- b) Definição dos parâmetros de busca: neste passo foram definidas as palavras chaves utilizadas e os filtros que seriam aplicados durante a busca. Sete conjuntos de palavras chaves foram utilizados, estes estão indicados no Quadro 7. Com relação aos filtros, estes ficaram definidos: somente devem ser exibidos artigos publicados em periódicos, com data de publicação entre 2000 e 2020 e pertencentes às áreas de *Engenharia e Ciência dos Materiais*.

Quadro 6 – Conjuntos de Palavras Chave utilizadas para busca na plataforma Scopus

(Continua)

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Combinação: C1 – Tópico: Fadiga – Palavras Chave:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| fatigue AND asphalt                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Combinação: C2 – Tópico: MAF – Palavras Chave:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| (fine aggregate matrix; sand asphalt) AND asphalt                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Combinação: C3 – Tópico: Influência dos agregados no concreto asfáltico – Palavras Chave:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| (effect of aggregate; types of aggregates; influence of aggregate; shape properties of aggregates; mechanical properties of aggregates; chemical properties of aggregates; aggregate chemistry; aggregate mineralogy; morphological characteristics of aggregates; chemical characteristics of aggregates; physical characteristics of aggregates; adhesion between aggregate and asphalt; asphalt-aggregate adhesion; asphalt-aggregate interface; nature of aggregate; aggregate-binder adhesion; aggregate-binder adhesiveness; asphalt-aggregate adhesiveness; filler effect; filler influence; aggregate effect; aggregate influence) AND asphalt. |

Quadro 6 – Conjuntos de Palavras Chave utilizadas para busca na plataforma Scopus

(Conclusão)

|                                                                                                             |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Combinação: C4 – Tópico: Influência dos agregados no concreto asfáltico + Fadiga –<br>Palavras Chave:       |
| C1 + C3                                                                                                     |
| Combinação: C5 – Tópico: Influência dos agregados no concreto asfáltico + MAF –<br>Palavras Chave:          |
| C2 + C3                                                                                                     |
| Combinação: C6 – Tópico: MAF + Fadiga – Palavras Chave:                                                     |
| C1 + C2                                                                                                     |
| Combinação: C7 – Tópico: Influência dos agregados no concreto asfáltico + Fadiga + MAF<br>– Palavras Chave: |
| C1+ C2 + C3                                                                                                 |

Fonte: Autora

- c) Busca: uma vez definidos os parâmetros de busca e a base de dados, a busca em si pôde ser realizada.
- d) Processamento de Informação: esta etapa consistiu na coleta dos dados e preparação dos gráficos e tabelas para apresentação dos resultados. Os aspectos da produção científica avaliados no desenvolvimento desta análise bibliométrica foram: quantidade de trabalhos publicados ao longo dos anos; periódicos nos quais estes trabalhos foram publicados; países onde as pesquisas têm sido desenvolvidas, bem como as principais instituições de ensino que têm contribuído em cada um dos tópicos; autores que mais publicam sobre esses temas; e, por fim, os artigos mais citados no que tange as temáticas pesquisadas.
- e) Análise Bibliométrica: por fim, diante dos resultados encontrados foi possível fazer uma análise e discussão acerca dos aspectos quantitativos da produção científica relacionada aos tópicos de pesquisa contemplados na busca.

### 3.2. ANÁLISE EXPERIMENTAL

### 3.2.1 Materiais

A fim de avaliar os efeitos de diferentes agregados nas propriedades reológicas de MAFs, foram empregados nesta pesquisa um tipo de CAP e dois agregados de diferentes proveniências. Os agregados utilizados foram fornecidos pelas pedreiras Brasitália (Cariacica – ES) e Basalto Campo Redondo (São Pedro da Aldeia – RJ), sendo denominados nesta pesquisa de ES e RJ, respectivamente. O CAP utilizado é classificado como CAP 30/45 e é proveniente da refinaria Duque de Caxias (REDUC), localizada no estado do Rio de Janeiro. Este material foi fornecido pela empresa Vila Betume, situada em Cariacica-ES, e a Tabela 1 apresenta sua ficha de especificação.

Tabela 1 - Especificações do CAP 30/45 utilizado na pesquisa

| <b>Características</b>                       | <b>Método</b> | <b>Especificação</b> | <b>Resultado</b> | <b>Unidade</b> |
|----------------------------------------------|---------------|----------------------|------------------|----------------|
| Penetração                                   | D 5           | 30 a 45              | 35               | 0,1 mm         |
| Ponto de amolecimento                        | D 36          | 52 min               | 52,0             | °C             |
| Viscosidade Brookfield 135 GC-SP21<br>20 RPM | D 4402        | 374 min              | 508              | cP             |
| Viscosidade Brookfield 150 GC-SP21           | D 4402        | 203 in               | 246              | cP             |
| Viscosidade Brookfield 177 GC-SP21           | D 4402        | 76 a 285 min         | 88               | cP             |
| RTFOT Penetração Retida                      | D 5           | 60 min               | 66               | %              |
| RTFOT - Aumento do Ponto de Amolecimento     | D 36          | 8 máx                | 4                | °C             |
| RTFOT - Ductilidade a 25GC                   | D 113         | 10 min               | >150             | cm             |
| RTFOT Variação em % Massa                    | D 2872        | -0,5 a 0,5           | 0,1              | %              |
| Ductilidade a 25 GC                          | D 133         | 60 min               | >150             | cm             |
| Solubilidade no Tricloroetileno              | D 2042        | 99,5 min             | 100,0            | % massa        |
| Ponto de Fulgor                              | D 92          | 235 min              | >360             | °C             |
| Índice de Suscetibilidade Térmica            | X 018         | -1,5 a 0,7           | -1,5             | N/A            |
| Densidade Relativa a 20/4 Graus Celsius      | D 70          | -                    | 1,054            | N/A            |
| Aquecimento a 177 GC                         | X 215         | NESP*                | NESP             | N/A            |

**Local: TQ 230258**

Data/hora amostragem: 17/05/2020 13:00

**NESP = Não Espuma**

Fonte: Adaptado de Laboratório REDUC

A norma ABNT NBR 15184:2004 especifica que o ligante asfáltico deve ser aquecido de modo a apresentar viscosidade de  $(0,17 \pm 0,02)$  Pa.s para mistura e  $(0,28 \pm 0,03)$  Pa.s para compactação. De posse dos resultados dos ensaios de viscosidade apresentados na ficha técnica fornecida pelo fabricante, traçou-se a curva de viscosidade do CAP empregado nesta pesquisa, através da qual foi possível a determinação de suas faixas de temperaturas de usinagem e compactação. Os valores encontrados foram de  $165 \pm 2^\circ\text{C}$  para usinagem e  $150 \pm 2^\circ\text{C}$  para compactação.

### 3.2.2 Métodos

#### 3.2.2.1 Caracterização dos Agregados

Os agregados utilizados nesta pesquisa foram caracterizados por meio dos procedimentos indicados no Quadro 7. Detalhes sobre cada ensaio serão apresentados nos tópicos seguintes.

Quadro 7 - Ensaio de caracterização dos agregados, laboratórios onde foram realizados e normatização seguida

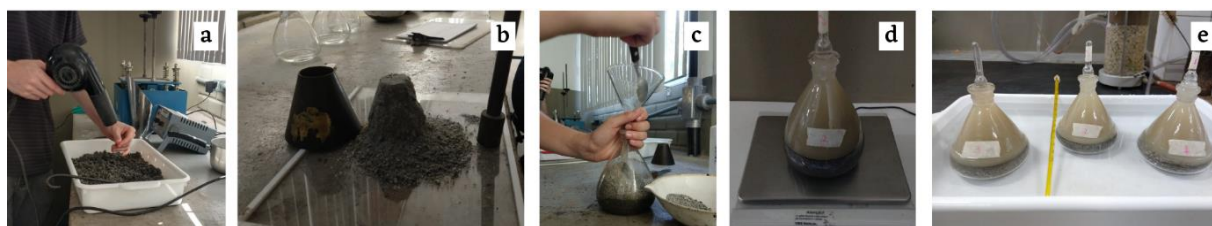
| ENSAIO                                                                                    | NORMA              | LABORATÓRIO                                                              |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| Massa específica e absorção de água                                                       | DNIT 411/2019 – ME | Laboratório de Geotecnia e Pavimentação – LGP/CT - UFES                  |
| Análise Mineralógica com lupa de mão                                                      | -                  |                                                                          |
| Difração de Raios-X                                                                       | -                  | Laboratório de Nanometria Fotônica – LNF/CT - UFES                       |
| Determinação das propriedades de forma por meio do Processamento Digital de Imagens (PDI) | DNIT 432/2020–ME   | Laboratório de Microscopia Eletrônica/<br>Departamento de Geologia – UFC |
| MEV                                                                                       | -                  | Laboratório Multiusuário de Microscopia de Alta Resolução – LabMic – UFG |

Fonte: Autora

### a) Massa específica e absorção

A determinação da massa específica real e da absorção dos agregados utilizados foi feita conforme instrui a norma DNIT 411/2019 – ME: Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Massa específica, densidade relativa e absorção de agregado miúdo para misturas asfálticas – Método de Ensaio. A Figura 34 ilustra algumas das etapas do procedimento realizado. Os resultados obtidos foram de 2,83 g/cm<sup>3</sup> para a massa específica e 0,72% para a absorção do agregado ES e 2,64 g/cm<sup>3</sup> para a massa específica e 0,20% para a absorção do agregado RJ.

Figura 34 - Procedimento para determinação da massa específica e absorção dos agregados (a) secagem da amostra (b) teste para determinar se o material se encontra no estado saturado superfície seca (c) enchimento do picnômetro com a amostra (d) pesagem do conjunto picnômetro + amostra + água (e) condicionamento do conjunto à temperatura de 25 ± 2°C



Fonte: Autora

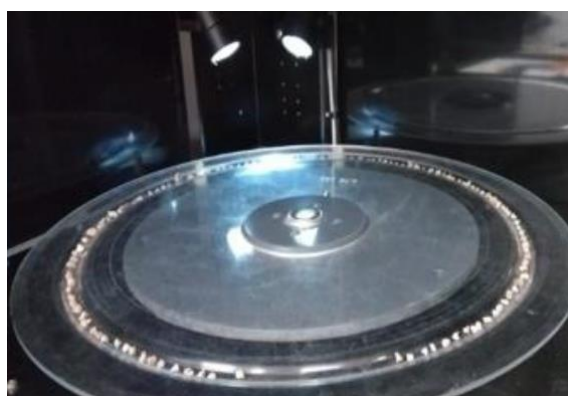
### b) Análise de forma por meio do AIMS

Uma das técnicas utilizadas para a caracterização da forma dos agregados empregados neste estudo foi a do Processamento Digital de Imagens (PDI). Amostras dos dois agregados foram enviadas para o Laboratório de Microscopia Eletrônica do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Ceará (UFC), onde foi utilizando o sistema AIMS (*Aggregate Image Measurement System*) para obter informações acerca da forma 2D e angularidade destes.

O sistema AIMS é capaz de caracterizar forma e angularidade de partículas miúdas (menores que 4,75 mm) e forma, angularidade e textura superficial de partículas graúdas

(maiores que 4,75 mm). O sistema de captação de imagens é formado por uma câmera e por dois modos de iluminação (Figura 35). Ele captura imagens em preto e branco tanto para partículas miúdas quanto para as graúdas e também captura imagens em escala de cinza para partículas graúdas (DIÓGENES, 2018). Neste estudo o foco é a caracterização dos agregados menores que 2,00 mm, pois são estes que compõem as amostras de MAF.

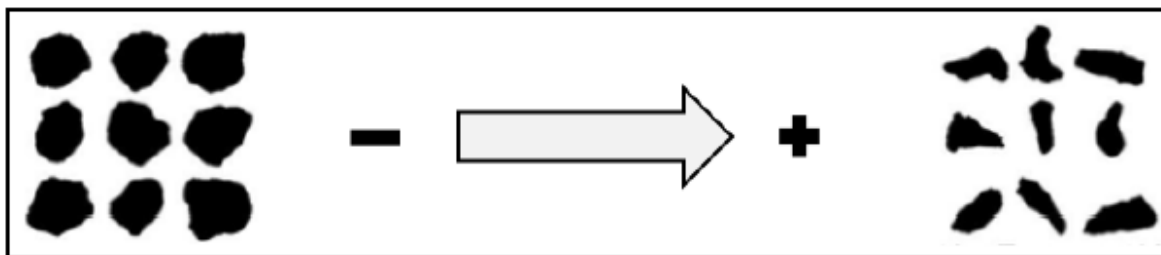
Figura 35 - Sistema de captura de imagens do AIMS



Fonte: Moura (2020)

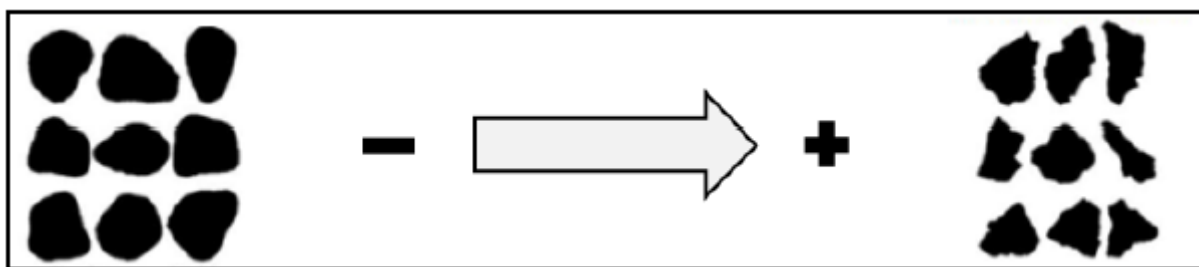
Segundo Bessa et al. (2015), a quantificação da propriedade de forma dos agregados miúdos é feita de acordo com a forma relativa das imagens capturadas e seu valor varia de 0 a 20: valores próximos de 0 correspondem à forma próxima de um círculo perfeito. A angularidade, por sua vez, mede as variações de contorno da partícula numa escala de 0 a 10000, sendo a partícula mais arredondada à medida em que seu valor de angularidade se aproxima de 0. As Figuras 36 e 37 ilustram a forma 2D e a angularidade máxima e mínima para os agregados miúdos, respectivamente.

Figura 36 - Variação de forma do agregado miúdo



Fonte: Moura (2020) adaptado do arquivo de Stockpile do Programa AIMS

Figura 37 - Variação de angularidade do agregado miúdo



Fonte: Moura (2020) adaptado do arquivo de Stockpile do Programa AIMS

A partir dos resultados obtidos pelo AIMS, é possível classificar os agregados quanto a sua forma 2D como circular, semicircular, semialongado ou alongado, e quanto à sua angularidade como arredondado, subarredondado, subangular ou angular. O sistema de classificação dos agregados utilizado neste trabalho foi proposto por Ibiapina (2018) e os valores limites adotados por este são exibidos na Tabela X.

Tabela 2 - Classificação Morfológica dos agregados segundo Ibiapina (2018)

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

Fonte: Ibiapina (2018)

A caracterização da forma dos agregados pelo sistema AIMS é normatizada pela norma DNIT 432/2020–ME: Agregados - Determinação das propriedades de forma por meio do Processamento Digital de Imagens (PDI) - Método de ensaio. A norma apresenta uma tabela com a quantidade de partículas que deve ser analisada em cada fração granulométrica utilizada (Tabela 3). Como as misturas produzidas para esta pesquisa continham apenas agregados menores que 2,00 mm, foram enviadas para análise amostras de material retido nas peneiras de no. 16 (1,18 mm) , no. 30 (0,60 mm) , no.50 (0,30 mm), no. 100 (0,15 mm) e no. 200 (0,075 mm). Figura 38 mostra as amostras do agregado RJ separadas para envio à UFC.

Tabela 3 - Quantidade mínima de partículas a serem analisadas em cada fração granulométrica

| Abertura da peneira que a retém a fração | Massa aproximada de amostra | Quantidade mínima de partículas |
|------------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| 25,0 mm (1")                             | 5 kg                        | 50                              |
| 19,0 mm (3/4")                           | 2 kg                        | 50                              |
| 12,5 mm (1/2")                           | 2 kg                        | 50                              |
| 9,5 mm (3/8")                            | 2 kg                        | 50                              |
| 4,75 mm (# 4)                            | 2 kg                        | 50                              |
| 2,36 mm (# 8)                            | 200 g                       | 150                             |
| 1,18 mm (# 16)                           | 200 g                       | 150                             |
| 0,6 mm (# 30)                            | 200 g                       | 150                             |
| 0,3 mm (# 50)                            | 200 g                       | 150                             |
| 0,15 mm (# 100)                          | 200 g                       | 150                             |
| 0,075 mm (# 200)                         | 200 g                       | 150                             |

Fonte: DNIT (2020)

Figura 38 - Amostras do agregado RJ preparadas para envio à UFC para análise no AIMS



Fonte: Autora

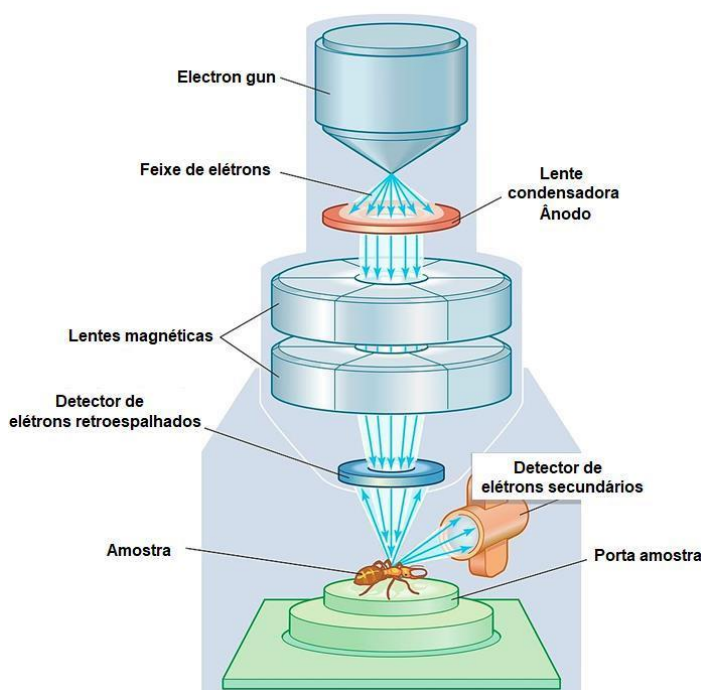
### c) Análise de forma por microscopia eletrônica de varredura

Além da utilização do AIMS para a investigação das propriedades de forma dos agregados utilizados neste estudo, empregou-se também a técnica de microscopia eletrônica de varredura para a caracterização morfológica destes. Amostras dos dois agregados foram enviadas para o Laboratório Multiusuário de Microscopia de Alta Resolução (LabMic) da Universidade Federal de Goiás (UFG), onde foi utilizado um microscópio eletrônico de varredura (MEV) para a obtenção de imagens em alta

resolução do material enviado.

O princípio de funcionamento de um MEV consiste em utilizar um feixe de elétrons de pequeno diâmetro para explorar a superfície da amostra, ponto a ponto. Quando este feixe atinge a amostra, esta emite de volta outros elétrons, os quais são captados pelos detectores e convertidos em imagens de alta resolução (DEDAVID, GOMES e MACHADO, 2007). A Figura 39 apresenta uma representação esquemática do funcionamento de um MEV.

Figura 39 - Representação esquemática de um Microscópio Eletrônico de Varredura



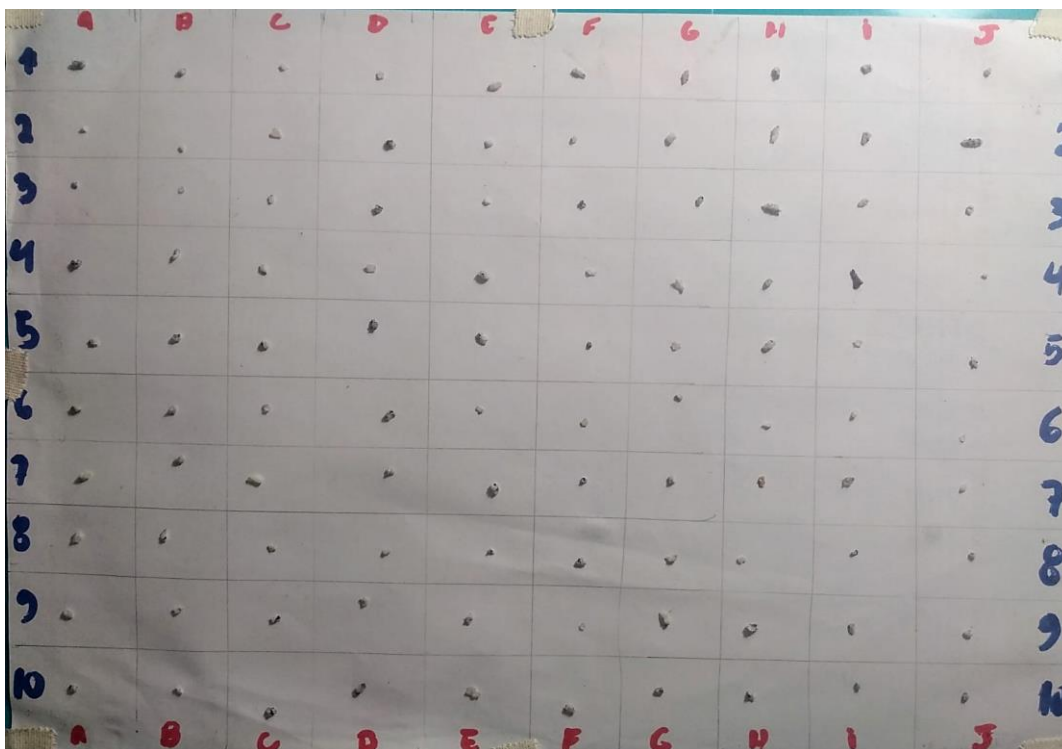
Fonte: INSTITUTO DE QUÍMICA DE SÃO CARLOS - USP (2019)

Para a realização deste ensaio foram enviadas ao LabMic da UFG uma amostra de cada agregado, contendo cerca de 20 g de material passante na peneira de no. 10, pois esta é peneira de corte utilizado para a confecção das MAFs.

#### d) Análise mineralógica com lupa de mão

Para caracterizar os agregados quanto a sua mineralogia fez-se primeiramente uma inspeção visual com lupa de mão. Selecionou-se para este fim uma amostra representativa cada um dos agregados, sendo este material passante na peneira de no.10 (2,00 mm) e retido na peneira de no. 16 (1,18 mm). Desta amostra foram retiradas então 100 partículas de agregado, selecionadas aleatoriamente. A partir de então fez-se uma inspeção visual utilizando uma lupa de mão com capacidade de 30 x de aumento em cada uma das partículas. Por meio da observação de características como cor, brilho e planos de clivagem foi possível então identificar os minerais presentes em cada um dos grãos e fazer uma análise quantitativa aproximada da composição mineralógica dos agregados estudados. A Figura 40 apresenta as 100 partículas do agregado RJ selecionadas para análise e, na sequência, a Figura 41 mostra uma delas sendo examinada com a lupa de mão.

Figura 40 - Partículas do agregado RJ selecionadas para inspeção visual



Fonte: Autora

Figura 41 - Inspeção visual de uma das partículas do agregado RJ

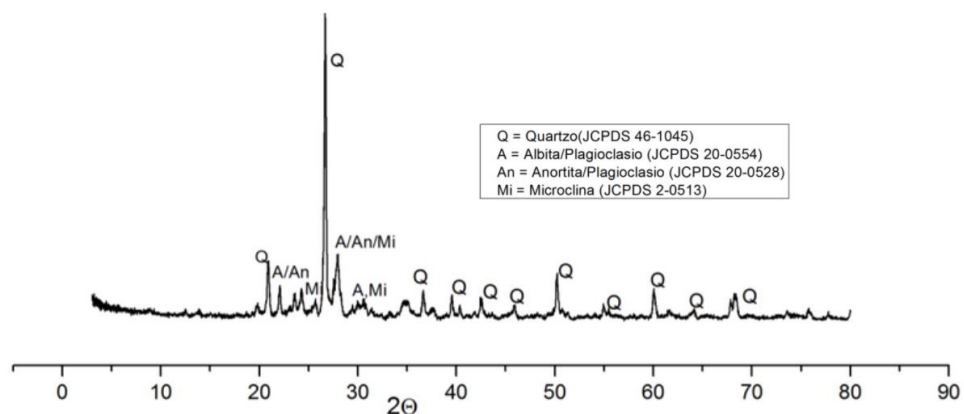


Fonte: Autora

### e) Análise mineralógica por Difração de Raios-X

Além da análise mineralógica feita com lupa de mão, amostras dos dois agregados foram submetidas à técnica de Difração de Raios-X, realizada pelo Laboratório de Nanometria Fotônica – LNF/CT – da UFES. Esta é uma técnica que consiste na aplicação de radiação sobre uma amostra e na mensuração dos ângulos e intensidades dos feixes de fótons difratados. Os resultados são apresentados por meio de um gráfico, o difratograma, que relaciona o ângulo de espalhamento dos feixes ( $2\theta$ ) e a intensidade dos picos de incidência. Através do difratograma e da consulta a um banco de dados é possível então identificar as fases cristalinas do sólido ensaiado, uma vez que a intensidade dos picos as posições em que se encontram no gráfico são característicos de cada material. A Figura 42 apresenta um exemplo de difratograma de um agregado de origem granítica com a respectiva identificação das fases dos minerais encontrados.

Figura 42 - Exemplo de difratograma de agregado granítico e identificação das fases dos minerais encontrados



Fonte: Gomes Neto (2014)

Neste trabalho foi utilizado o banco de dados do software *Match!* para a análise dos resultados. Com relação à preparação das amostras, é necessário que os agregados estejam na forma de pó com tamanho nominal máximo de  $63\mu\text{m}$  (material passante na peneira no. 230) e secos em estufa a  $105 \pm 5^\circ\text{C}$ . Faz-se então uma pasta que é colocada sobre uma lâmina de vidro, com o auxílio de uma espátula. Com outra lâmina o material é friccionado até que se forme uma película fina e, feito isso, este material deve secar à temperatura ambiente. Uma vez seca, a amostra está pronta para ser levada ao difratograma. A Figura 43 mostra as amostras preparadas para esta pesquisa.

Figura 43 - Amostras dos agregados ES e RJ para o ensaio de DRX

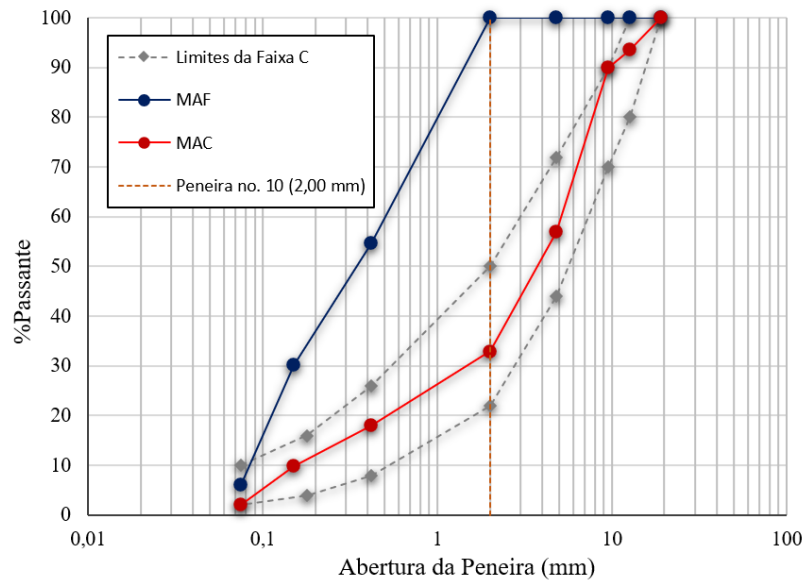


Fonte: Autora

### 3.3.2.2. Dosagem e Compactação das MAFs

Neste trabalho optou-se por remover o efeito da granulometria dos agregados no desempenho das MAFs. Para tanto, os dois agregados foram fracionados e enquadrados na mesma curva de distribuição granulométrica (Figura 44). Esta curva foi determinada a partir da composição granulométrica de uma mistura asfáltica completa, excluindo os agregados retidos na peneira de no. 10 (2,00 mm). A distribuição granulométrica da composição de agregados da mistura completa selecionada atendia aos limites da faixa C do DNIT, recomendada pela norma DNIT 031/2006 ES para emprego em camadas de revestimento de rodovias. Assim, a composição adotada nas MAFs estudadas representa uma matriz fina de uma mistura asfáltica típica.

Figura 44 - Curva de distribuição granulométrica utilizada para produção das MAFs



Fonte: Autora

### a) Dosagem das MAFs

A metodologia de dosagem aplicada neste trabalho foi proposta por Ng et al. (2018), que adaptou para as MAFs um procedimento de dosagem aplicado a misturas completas desenvolvido por Arrambide e Duriez (1959). Este procedimento consiste em três etapas: determinação da superfície específica dos agregados presentes na MAF, levando em consideração sua distribuição granulométrica e massa específica; determinação do módulo de riqueza da MAF, obtido por uma relação com o módulo de riqueza da mistura asfáltica correspondente; e, de posse dos dois parâmetros anteriores, a determinação do teor de ligante da MAF.

A determinação da superfície específica dos agregados ( $S_s$ ) é feita por meio da soma das superfícies específicas das partículas em cada intervalo de peneiras ( $S_i$ ). A superfície específica das partículas retidas em um intervalo de peneiras é dada pelo produto entre o coeficiente de superfície específica do intervalo ( $C_i$ ) e a porcentagem de partículas contida nele ( $P_i$ ), conforme ilustra a Equação 21. A porcentagem de partículas contida no intervalo em análise é dada de acordo com a distribuição granulométrica utilizada para a produção das misturas.

$$S_i = \frac{(C_i \times P_i)}{100} \quad (21)$$

O coeficiente de superfície específica para cada intervalo de peneiras é obtido levando em consideração a área ( $A_i$ ), o volume ( $V_i$ ) e a massa específica das partículas ( $\rho$ ), por meio da aplicação da Equação 22.

$$C_i = \frac{A_i}{V_i \times \rho} \quad (22)$$

Arrambide e Duriez (1959) assumiram o formato das partículas sendo perfeitamente cúbico, de forma que sua área e volume podem ser calculados então pelas Equações 23 e 24. O lado do cubo que representa as partículas contidas em um intervalo de peneiras ( $a_i$ ) pode ser obtido por meio da Equação 25, onde a diagonal do cubo ( $d_i$ ) é definida como a média do tamanho máximo nominal do intervalo de peneiras.

$$A_i = 6 \times a_i^2 \quad (23)$$

$$V_i = 6a_i^3 \quad (24)$$

$$d_i = a_i \times \sqrt{3} \quad (25)$$

O módulo de riqueza da MAF ( $K_{MAF}$ ) é função do módulo de riqueza da mistura asfáltica completa correspondente ( $K_{MAC}$ ) e da massa específica das partículas ( $\rho_{agg}$ ), podendo ser obtido por meio da Equação 26.

$$K_{MAF} = 1,51 \times K_{MAC} \times \frac{\rho_{agg}}{2,65} \quad (26)$$

De posse dos valores do módulo de riqueza da mistura e da superfície específica das partículas pode-se calcular, então, o teor de ligante da MAF ( $T_{MAF}$ ) utilizando a Equação 27. Esse teor de ligante deve, ainda, ser corrigido em função da absorção do agregado utilizado (Equação 28), assim obtém-se por fim a dosagem final da mistura com o teor de ligante a ser adotado ( $T'_{MAF}$ ).

$$T_{MAF} = \left( \frac{100 \times K_{MAF} \times \sqrt[5]{S_S}}{100 + (K_{MAF} \times \sqrt[5]{S_S})} \right) \quad (27)$$

$$T'_{MAF} = T_{MAF} \times (1 + \%Abs) \quad (28)$$

## b) Compactação das MAFs

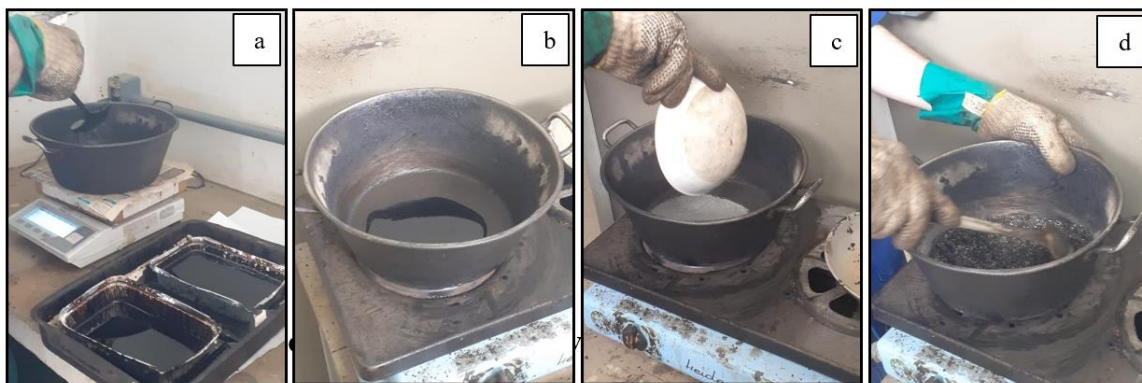
Uma vez realizado o procedimento de dosagem, foi possível então seguir com a confecção dos corpos de prova. Para tanto, foi estabelecido um protocolo de compactação de MAFs em parceria com as Universidades de Goiás (UFG) e Universidade de São Paulo (USP/São Carlos), composto pelas seguintes etapas: preparação dos agregados; preparação da mistura; compactação dos corpos de prova; e procedimentos pós-compactação. O parâmetro de controle adotado para verificar a eficácia do método foi o volume de vazios dos corpos de prova obtidos. Neste trabalho, definiu-se que as amostras produzidas deveriam apresentar um volume de vazios de  $4 \pm 1\%$ , sendo este o volume de vazios recomendado pela norma DNIT 031/2006 - ES para misturas asfálticas aplicadas em camadas de revestimento de rodovias.

O procedimento tem início com a preparação dos agregados. Deve-se secá-los em estufa a uma temperatura entre  $105^\circ\text{C}$  e  $110^\circ\text{C}$ , até que se atinja a constância de massa. Após esfriar, os agregados são então separados por peneiramento seco nas frações desejadas. Caso esteja previsto o uso de alguma adição como parte do fíler da mistura, estes componentes também devem ser pesados e adicionados aos agregados minerais. Feita a preparação prévia dos agregados, é possível então seguir com o preparo da mistura solta (Figura 45) conforme descrito nas etapas a seguir:

- a) Pesar em recipientes separados a quantidade de cada fração de agregados necessária para produzir uma quantidade total de pelo menos 250 g de agregados;
- b) Misturar as quantidades pesadas, de forma a se obter uma composição homogênea de agregados e fíler;

- c) Colocar o recipiente com a composição de agregados e fíler em uma estufa e aquecer a uma temperatura maior do que a temperatura de mistura do ligante, sem excedê-la em mais de  $10,0^{\circ}\text{C}$ , por um tempo de 30 minutos. Simultaneamente e na mesma estufa, aquecer todos os utensílios utilizados no processo de mistura e também o ligante (em quantidade um pouco maior do que a que será acrescida à mistura).
- d) Colocar o recipiente de mistura sobre a balança, tará-la e em seguida acrescentar, com auxílio de uma concha, a quantidade de ligante especificada pelo procedimento de dosagem;
- e) Levar o recipiente de mistura à placa aquecida/fogão na temperatura de mistura, acrescentar os agregados e misturar até que se obtenha uma composição homogênea, resultando assim na mistura solta;
- f) Pesar e armazenar a quantidade de material referente a cada corpo de prova, mantendo-os à temperatura ambiente e protegidos de exposição ao sol ou umidade até que seja iniciado o procedimento de compactação.

Figura 45 - Preparo da Mistura Solta (a) Pesagem do CAP, (b) recipiente de mistura sobre o fogão, (c) adição dos agregados e (d) homogeneização.



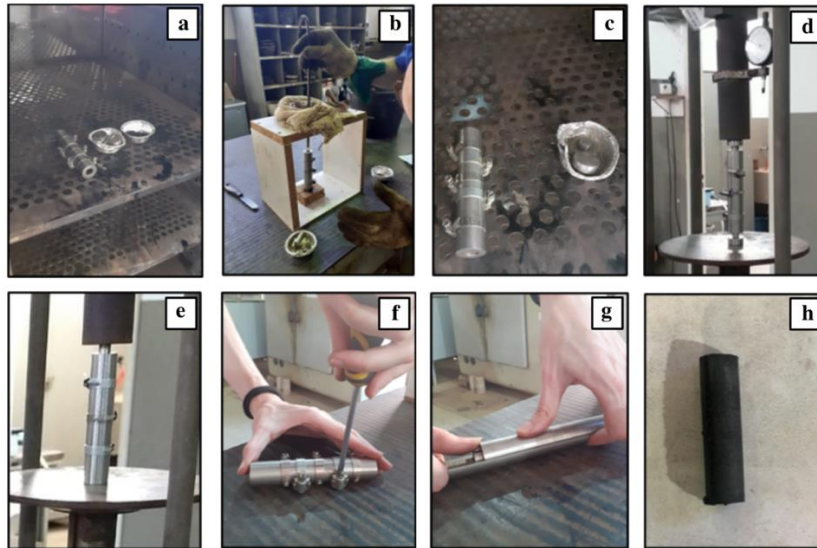
Fonte: Autora

O procedimento de compactação (Figura 46) pode então ser realizado como descrito a seguir:

- a) Adicionar a quantidade de mistura solta referente a um corpo de prova a um recipiente metálico para ir à estufa e aquecer o material e o molde de compactação por 30 minutos na temperatura de mistura;

- b) Transferir o material do recipiente metálico para o molde de compactação, com auxílio de um funil e haste metálica e aquecer o conjunto mistura+molde por 15 minutos na temperatura de compactação;
- c) Colocar o molde sobre a prensa de compactação manual do Mini CBR, posicionando as peças de extremidade do molde, conforme ilustra a Figura 4-d, e em seguida girar a alavanca do equipamento em velocidade constante até que as peças de extremidade se encaixem perfeitamente no molde, promovendo a compactação da mistura;
- d) Manter o molde prensado por 5 minutos para que seja resfriado à temperatura ambiente, de forma que seja evitada a expansão do material antes da consolidação da compactação;
- e) Desprender o molde e retirar as peças de extremidade e, em seguida, inserir a peça metálica auxiliar, conforme ilustra a Figura 46-e, para auxiliar no desprendimento do corpo de prova das paredes do molde.
- f) Girar a alavanca no sentido de prensar o corpo de prova até a peça intermediária encaixar perfeitamente no molde, em seguida desprendê-lo, retirar a peça intermediária e colocá-la na outra extremidade do molde para repetir o procedimento do outro lado;
- g) Esperar 3 minutos para o resfriamento do conjunto e em seguida iniciar o processo de desmolde, i.e.: Afrouxar as abraçadeiras do molde com chave de fenda e, em seguida, deslizar as faces do molde uma sobre a outra cuidadosamente; Verter, cuidadosamente, a face em que se encontra o corpo de prova sobre uma das mãos. Caso o corpo de prova se mostre preso em uma das paredes do molde, empurrar manualmente com a peça intermediária para desprendê-lo. Por experiência prática durante este processo, recomenda-se nunca puxar a amostra para cima durante o processo.

Figura 46– Procedimento de Compactação (a) Aquecimento da mistura e do molde, (b) moldagem, (c) aquecimento da mistura dentro do molde, (d) compactação. (e) desprendimento da amostra das paredes do molde, (f) abertura do molde, (g) desmolde e (h) amostra compacta



Fonte: Autora

Após a compactação, são executados os procedimentos seguintes com o corpo de prova à temperatura ambiente:

- a) Registrar sua altura e seu diâmetro com precisão de 0,1 mm;
- b) Determinar sua massa seca ( $m_{seca}$ ) com precisão de 0,1 g;
- c) Utilizar a balança hidrostática para determinar sua massa submersa ( $m_{sub}$ ), com precisão de 0,1 g;
- d) Determinar sua densidade aparente ( $Gmb$ ), por meio da Equação 29:

$$Gmb = \left( \frac{m_{seca}}{m_{seca} - m_{sub}} \right) \times 0,9971 \quad (29)$$

- e) Determinar seu volume de vazios por meio da Equação 30:

$$Vv = \left( \frac{DMM - Gmb}{DMM} \right) \quad (30)$$

Caso não seja possível realizar o ensaio para determinação da densidade máxima medida da mistura (**DMM**), esta pode ser substituída pela **DMT** (Densidade Máxima Teórica)

nos cálculos. A **DMT** é determinada por meio da Equação 31:

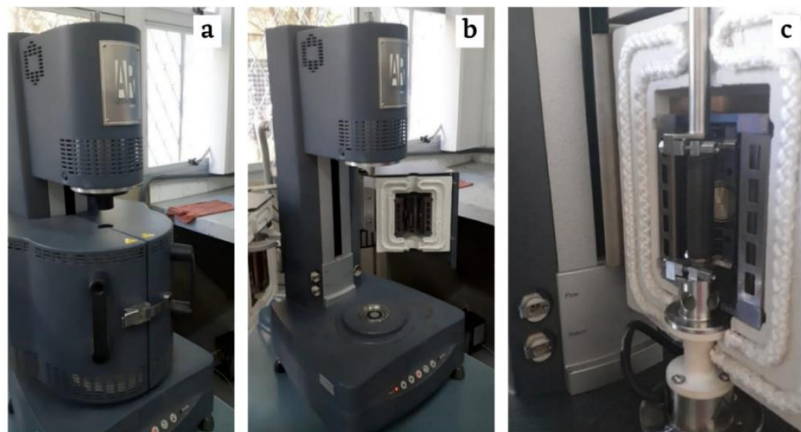
$$DMT = \frac{100}{\frac{\%a}{G_a} + \frac{\%Am}{G_{Am}} + \frac{\%f}{G_f}} \quad (31)$$

Onde: %a = porcentagem de ligante asfáltico, expressa em relação à massa total da matriz de agregados finos; %Am e %f = porcentagens de agregado miúdo e fíler, respectivamente, expressa em relação à massa total da matriz de agregados finos;  $G_a$ ,  $G_{Am}$  e  $G_f$  = massas específicas reais do ligante asfáltico, agregado miúdo e fíler, respectivamente.

### 3.2.2.3 Ensaios Oscilatórios

Foram compactadas cinco amostras de cada MAF para a realização do ensaio de varredura de frequência e obtenção de suas propriedades viscoelásticas, e a mesma quantidade para a realização do ensaio de varredura de tempo e obtenção dos dados para a construção de suas curvas características de dano (CxS). Os ensaios foram realizados utilizando um DSR modelo AR 2000ex da TA Instruments (Figura 47a e b). Nas extremidades das amostras de MAF foram coladas peças metálicas de aço para fixação das amostras no interior do reômetro (Figura 47c).

Figura 47 - Reômetro utilizado (a) vista externa (b) vista interna (c) fixada no interior do reômetro



Fonte: Autora

O ensaio de varredura de frequência foi conduzido entre 0,01 e 25 Hz, nas temperaturas de 20, 35 e 50°C. O procedimento foi realizado à deformação controlada e com amplitude de deformação igual a 65 $\mu$ . Tal nível de deformação é baixo o suficiente para garantir que a amostra não sofra dano durante o ensaio e foi escolhido com base em outros trabalhos desenvolvidos com MAFs (FONSECA, 2016; FREIRE, 2015; SOUSA et al., 2013; SOUSA, 2010; ZOLLINGER, 2005; KIM et al., 2003). Após a realização deste ensaio, curvas mestre do módulo dinâmico e do ângulo de fase foram construídas e comparadas.

Para o ensaio de varredura de tempo, os seguintes parâmetros foram definidos: realização do ensaio à tensão controlada e igual a 300 kPa, sob uma frequência de 10 Hz e temperatura de 25°C. Estes parâmetros foram escolhidos com base na literatura (KIM et al., 2006; CASTELO BRANCO, 2008; COUTINHO, 2012; FONSECA, 2016). Antes da realização da varredura de tempo propriamente dita, a amostra passa por uma etapa preliminar, conhecida como *fingerprint test*. Esta etapa consiste em uma varredura de frequência, neste trabalho realizada entre 0,01 a 25 Hz, a 25°C e sob uma taxa de deformação de 65 $\mu$ , para a obtenção do módulo dinâmico da amostra sem dano e do parâmetro  $\alpha$ , parâmetros que são necessários para a construção das curvas CxS do material ensaiado. Então, de posse dos dados coletados no *fingerprint test* e no ensaio de varredura de tempo, com auxílio do Excel podem ser calculados os parâmetros do modelo S-VECD e, por fim, pode-se construir as curvas características de dano do material.

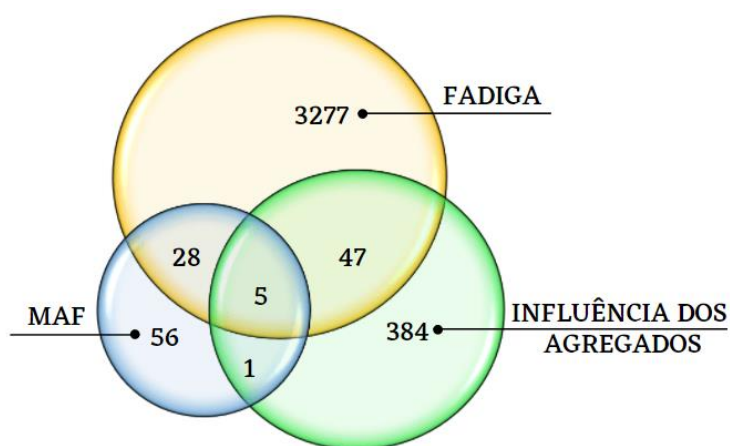
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados da análise bibliométrica, de ensaios de caracterização morfológica, microestrutural e mineralógica realizados nos agregados selecionados e dos ensaios reológicos realizados nas MAFs.

### 4.1. ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

Como mencionado, a revisão bibliométrica se iniciou com uma busca na plataforma Scopus por conjuntos de palavras chaves que relacionassem os tópicos de *Fadiga*, *MAF* e *Influência dos agregados no comportamento do concreto asfáltico*. Os resultados encontrados para a pesquisa de cada um dos tópicos separadamente mostram que ao longo dos últimos 20 anos foram publicados cerca de 3355 artigos abordando o fenômeno de fadiga em materiais asfálticos, 437 artigos com vistas ao efeito dos agregados em misturas asfálticas e 90 artigos que abordaram MAFs. A Figura 48 mostra como estas quantidades de publicações têm relação entre si.

Figura 48 - Quantidade de artigos publicados relacionados aos tópicos Fadiga, MAF e Influência dos agregados no comportamento do Concreto asfáltico entre os anos de 2000 e 2020

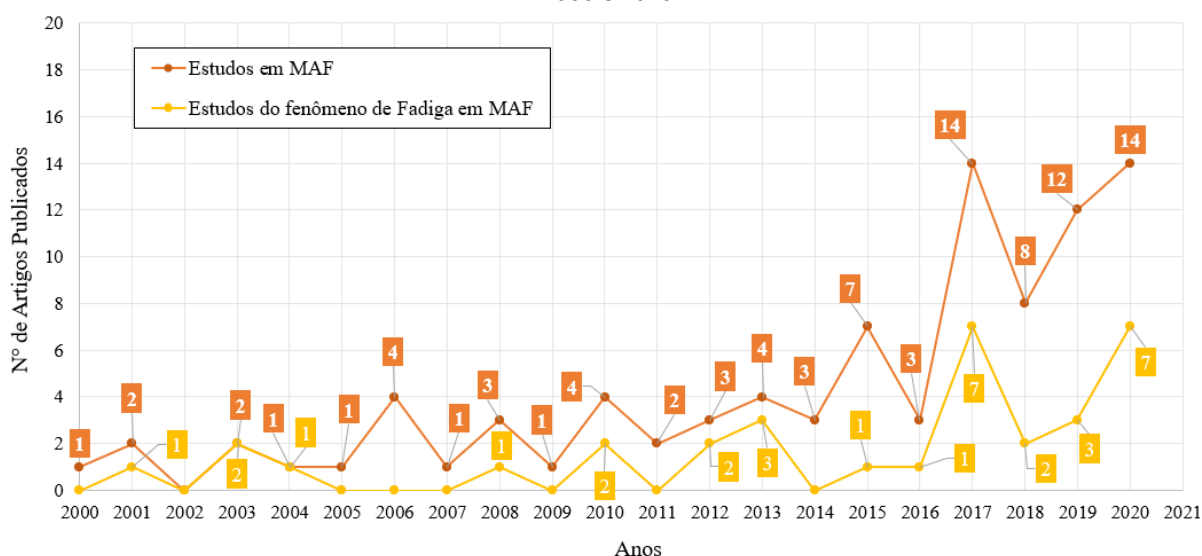


Fonte: Autora

Da Figura 48 percebe-se que boa parte dos estudos em MAFs abordaram também o fenômeno de fadiga. Cerca de 40% das pesquisas conduzidas em matrizes de agregados finos investigaram a ocorrência deste tipo de dano no material. A Figura 49 ilustra a

evolução do número de publicações envolvendo MAFs e fadiga em MAFs ao longo do período analisado e aponta a tendência de crescimento destes tópicos de pesquisa para os próximos anos, sendo cerca de 50% dos estudos publicados a partir do ano de 2017.

Figura 49 - Evolução do número de publicações referentes aos tópicos MAF e Fadiga em MAFS entre os anos de 2000 e 2020



Fonte: Autora

A fim de se entender melhor o estado da produção científica acerca do fenômeno de fadiga em MAFs buscou-se entender onde se concentram os estudos neste tópico de pesquisa. A busca na plataforma Scopus mostrou que 70% das publicações têm contribuição dos Estados Unidos, 18% da China e 15% têm contribuição do Brasil, sendo estes três os maiores polos de pesquisa referentes a este tópico. Corroborando estes dados, os maiores estudiosos da propagação do dano por fadiga em MAFs atualmente se encontram vinculados a instituições de ensino pertencentes a estes países, como mostra o Quadro 8.

Quadro 7 - Autores com maior quantidade de publicações sobre Fadiga em MAFs

| Ranking | Autor                  | Vínculo                                                          | Nº de Artigos | % do Total |
|---------|------------------------|------------------------------------------------------------------|---------------|------------|
| 1       | Little, D.N.           | Texas A&M University, College Station, United States             | 9             | 27%        |
|         | Kim, Y.R.              | University of Nebraska–Lincoln, Lincoln, United States           | 7             | 21%        |
| 3       | Bhasin, A.             | The University of Texas at Austin, Austin, United States         | 6             | 18%        |
| 4       | Harvey, J.             | University of California, Davis, Davis, United States            | 4             | 12%        |
| 5       | Castelo Branco, V.T.F. | Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brazil                 | 3             | 9%         |
|         | Gudipudi, P.P.         | Flatirons Engineering, Inc., Broomfield, United States           |               |            |
|         | Underwood, B.S.        | NC State University, Department of Civil, Raleigh, United States |               |            |
| 6       | Alavi, M.Z.            | University of Tehran, School of Civil Engineering, Tehran, Iran  | 2             | 6%         |
|         | Aragão, F.T.S.         | Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brazil   |               |            |
|         | Jones, D.              | University of California, Davis, Davis, United States            |               |            |
|         | Li, G.                 | Nanjing Forestry University, Nanjing, China                      |               |            |
|         | Li, Q.                 | Nanjing Forestry University, Nanjing, China                      |               |            |
|         | Lytton, R.L.           | Texas A&M University, College Station, United States             |               |            |
|         | Masad, E.              | Texas A&M University at Qatar, Doha, Qatar                       |               |            |
|         | Palvadi, S.            | The University of Texas at Austin, Austin, United States         |               |            |
|         | Zhang, S.              | Jiangsu Polaris Transportation Industry Group, China             |               |            |

Fonte: Autora

Um outro parâmetro importante de se analisar é a relevância das publicações relacionadas a este tópico de pesquisa. Para tanto, fez-se um levantamento dos periódicos nos quais as publicações sobre fadiga em MAFs foram veiculadas e da classificação desses periódicos segundo o *Qualis CAPES* (Quadro 9). A busca mostrou que 58% dos artigos foram publicados em periódicos classificados como A1 e que 90% estão veiculados em periódicos com nível de pelo menos B1, ou seja, periódicos de alto fator de impacto, o que indica que o tópico de pesquisa em questão apresenta relevância diante do meio científico.

Quadro 8 - Periódicos onde estão veiculadas as publicações sobre Fadiga em MAFs

| Ranking | Periódico                                                    | Qualis CAPES | Nº de Artigos | % do Total |
|---------|--------------------------------------------------------------|--------------|---------------|------------|
| 1       | Construction And Building Materials                          | A1           | 11            | 33%        |
| 2       | Transportation Research Record                               | B1           | 8             | 24%        |
| 3       | Journal Of Materials In Civil Engineering                    | A1           | 4             | 12%        |
| 4       | Road Materials And Pavement Design                           | A1           | 3             | 9%         |
| 5       | Rilem Bookseries                                             | -            | 2             | 6%         |
| 6       | Fatigue and Fracture Of Engineering Materials and Structures | A2           | 1             | 4%         |
|         | International Journal Of Pavement Engineering                | B1           |               |            |
|         | Journal Of Testing And Evaluation                            | B1           |               |            |
|         | Journal Of Rehabilitation In Civil Engineering               | -            |               |            |
|         | Materials                                                    | A1           |               |            |

Fonte: Autora

Por fim, o Quadro 10 apresenta a lista das publicações encontradas na plataforma Scopus que abordam o fenômeno de fadiga em MAFs bem como o alcance destas pesquisas em

função do número de citações. Os artigos destacados em verde são de particular interesse deste estudo, uma vez que apresentam resultados acerca da influência dos agregados na resistência à fadiga de MAFs, e serão discutidos com mais detalhes a seguir.

Quadro 9 - Artigos publicados referentes ao tema Fadiga em MAFs

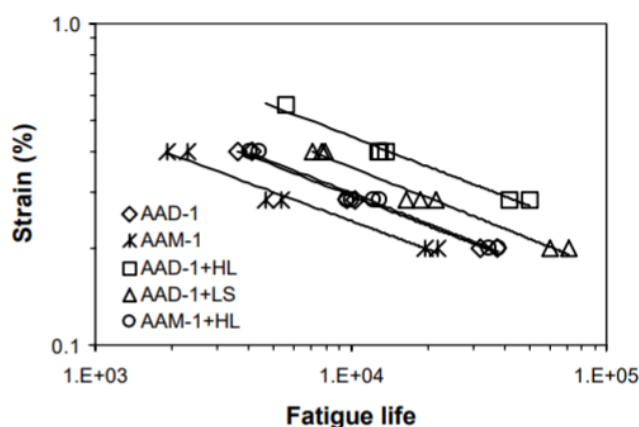
| Ranking | Título                                                                                                                                               | X Citado | Autores                                                                      | Ano  |
|---------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|------------------------------------------------------------------------------|------|
| 1       | Fatigue and healing characterization of asphalt mixtures                                                                                             | 240      | Kim, Y.-R., Little, D.N., Lytton, R.L.                                       | 2003 |
| 2       | Characterization of fatigue and healing in asphalt binders                                                                                           | 123      | Shen, S., Chiu, H.-M., Huang, H.                                             | 2010 |
| 3       | Effect of Mineral Fillers on Fatigue Resistance and Fundamental Material                                                                             | 104      | Kim, Y.-R., Little, D.N., Song, I.                                           | 2003 |
| 4       | Effect of moisture damage on material properties and fatigue resistance of asphalt mixtures                                                          | 73       | Kim, Y.-R., Little, D.N., Lytton, R.L.                                       | 2004 |
| 5       | Influence of extended aging on the properties of asphalt composites produced using hot and warm mix methods                                          | 63       | Arega, Z.A., Bhasin, A., De Kesel, T.                                        | 2013 |
| 6       | Fatigue analysis of asphalt mixtures independent of mode of loading                                                                                  | 50       | Castelo Branco, V.T.F., Masad, E., Bhasin, A., Little, D.N.                  | 2008 |
| 7       | Effect of volumetric factors on the mechanical behavior of asphalt fine                                                                              | 48       | Underwood, B.S., Kim, Y.R.                                                   | 2013 |
| 8       | Effects of rejuvenators on high-RAP mixtures based on laboratory tests of asphalt concrete (AC) mixtures and fine aggregate matrix (FAM) mixtures    | 34       | Nabizadeh, H., Haghshenas, H.F., Kim, Y.-R., Aragão, F.T.S.                  | 2017 |
| 9       | New design method of fine aggregates mixtures and automated method for analysis of dynamic mechanical characterization data                          | 32       | Sousa, P., Kassem, E., Masad, E., Little, D.                                 | 2013 |
| 10      | Method to quantify healing in asphalt composites by continuum damage                                                                                 | 24       | Palvadi, S., Bhasin, A., Little, D.                                          | 2012 |
| 11      | Testing and modeling of fine aggregate matrix and its relationship to asphalt                                                                        | 21       | Gudipudi, P., Underwood, B.S.                                                | 2019 |
| 12      | Bio-modification of rubberised asphalt binder to enhance its performance                                                                             | 21       | Fini, E.H., Hosseinneshad, S., Oldham, D., (...), Alavi, Z., Harvey, J.      | 2015 |
| 13      | Evaluation of microdamage, healing, and heat dissipation of asphalt mixtures, using a dynamic mechanical analyzer                                    | 18       | Kim, Y.-R., Little, D.N., Lytton, R.L.                                       | 2001 |
| 14      | Evaluating fatigue performance of fine aggregate matrix of asphalt mix containing recycled asphalt shingles                                          | 15       | Zhu, J., Alavi, M.Z., Harvey, J., Sun, L., He, Y.                            | 2017 |
| 15      | Fatigue resistance investigation of warm-mix recycled asphalt binder, mastic,                                                                        | 14       | Li, Q., Chen, X., Li, G., Zhang, S.                                          | 2018 |
| 16      | Influence of reduced production temperatures on the adhesive properties of aggregates and laboratory performance of fine aggregate-asphalt mixtures  | 14       | Vasconcelos, K.L., Bhasin, A., Little, D.N.                                  | 2010 |
| 17      | Linear viscoelastic properties of warm-mix recycled asphalt binder, mastic,                                                                          | 12       | Li, Q., Li, G., Ma, X., Zhang, S.                                            | 2018 |
| 18      | Evaluation of the degradation of fine asphalt-aggregate mixtures containing high reclaimed asphalt pavement contents                                 | 12       | Sánchez D.B., Grenfell J., Airey G., Caro S.                                 | 2017 |
| 19      | Fatigue and self-healing characterization of asphalt composites containing                                                                           | 9        | Li R., Karki P., Hao P.                                                      | 2020 |
| 20      | Aggregate maximum nominal sizes' influence on fatigue damage performance using different scales                                                      | 8        | Freire, R.A., Babadopolos, L.F.A.L., Castelo Branco, V.T.F., Bhasin, A.      | 2017 |
| 21      | Evaluating the effects of high RAP content and rejuvenating agents on fatigue performance of fine aggregate matrix through DMA flexural bending test | 7        | Zhang C., Ren Q., Qian Z., Wang X.                                           | 2019 |
| 22      | Fatigue characterization of binder with aging in two length scales: sand asphalt mortar and parallel plate binder film                               | 6        | Kommidi, S.R., Kim, Y.-R., de Rezende, L.R.                                  | 2020 |
| 23      | Quantifying healing based on viscoelastic continuum damage theory in fine aggregate asphalt specimen                                                 | 5        | Palvadi S., Bhasin A., Motamed A., Little D.N.                               | 2012 |
| 24      | Evaluation of Effects of Filler By-Products on Fine Aggregate Matrix Viscoelasticity and Fatigue-Fracture Characteristics                            | 4        | Fonseca, J.F., Sudo Lutfi Teixeira, J.E., Castelo Branco, V.T.F., Kim, Y.-R. | 2019 |
| 25      | Influence of reclaimed asphalt pavement on performance-related properties of gap-graded rubberized hot-mix asphalt                                   | 4        | Hung S.S., Alavi M.Z., Jones D., Harvey J.T.                                 | 2017 |
| 26      | Development of modulus and fatigue test protocol for fine aggregate matrix                                                                           | 4        | Gudipudi P.P., Underwood B.S.                                                | 2017 |
| 27      | Use of fine aggregate matrix experimental data in improving reliability of fatigue life prediction of asphalt concrete                               | 4        | Gudipudi P.P., Shane Underwood B.                                            | 2017 |
| 28      | Correlation investigation of fatigue indices of fine aggregate matrix (FAM) and asphalt mixture containing reclaimed asphalt pavement materials      | 3        | Ding J., Jiang J., Ni F., Dong Q., Zhao Z.                                   | 2020 |
| 29      | A simple fracture model for hot mix asphalt based on fundamental fatigue                                                                             | 2        | Ahmed, T.M., Al-Khalid, H.                                                   | 2016 |
| 30      | Laboratory evaluation of long-term aging effect on linear viscoelastic and                                                                           | 1        | Ningappa A., Suresha S.N.                                                    | 2020 |
| 31      | Investigating the effect of AC overlays reinforced with geogrid and modified                                                                         | 1        | Shafabakhsh, Gh., Asadi, S.                                                  | 2020 |
| 32      | Evaluation of the relationship between the fatigue performance of FAM and AC mixtures based on volumetric characteristics and on the S-VECD theory   | 0        | Osmari P.H., de Souza R.C., do Nascimento L.A.H., Aragão F.T.S.              | 2020 |
| 33      | Evaluating fatigue performance of fine aggregate matrix mixes with reclaimed asphalt pavement and rejuvenating agents                                | 0        | Jiao L., Elkashef M., Jones D., Harvey J.T.                                  | 2020 |

Fonte: Autora

O trabalho de Kim et al. (2003) teve como foco verificar a influência de fileres na

resistência à fadiga de MAFs. Os autores produziram misturas com dois tipos de ligantes, denominados AAD-1 e AAM-1, e com diferentes fíleres, sendo estes fíler calcário (LS) e cal hidratada (HL). Por meio da realização do ensaio de varredura de tempo no DSR, os autores construíram, então, curvas de vida de fadiga x amplitude de deformação para cada uma das MAFs estudadas (Figura 50). Os autores concluíram que a adição de fíleres melhora o desempenho das misturas diante do fenômeno de fadiga e, mais ainda, que o tipo de fíler empregado nas MAFs têm impacto sobre a vida de fadiga destas. Percebe-se na Figura 50 que a mistura AAD-1+HL apresentou vida de fadiga superior à mistura AAD-1+LS, o que demonstra o melhor desempenho da cal hidratada frente ao fíler calcário diante do fenômeno de fadiga.

Figura 50 - Curvas de Vida de Fadiga x Deformação para MAFs confeccionadas com diferentes fíleres

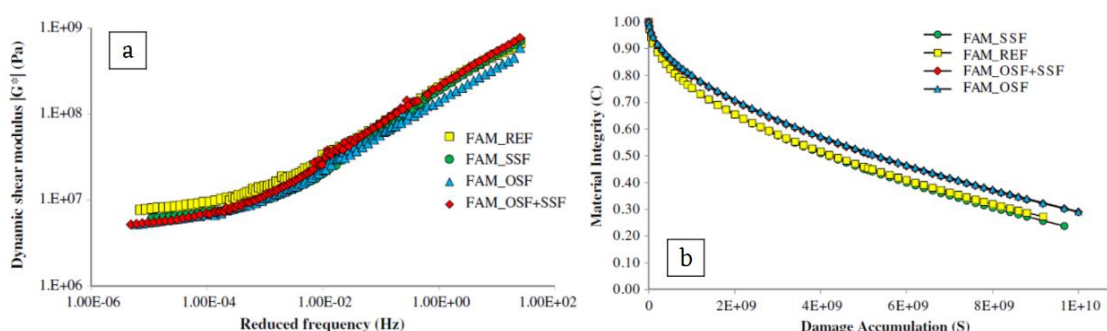


Fonte: Kim et al. (2003)

Fonseca et al. (2019) desenvolveram uma pesquisa para avaliar a influência do tipo de fíler no comportamento viscoelástico e nas características de fratura e fadiga de MAFs. Os autores realizaram ensaios de varredura de frequência e varredura de tempo nas amostras, bem como o ensaio de fratura em geometria semicircular (SCB). Foram produzidas quatro misturas, denominadas de FAM\_REF, FAM\_OSF, FAM\_SSF e FAM\_OSF+SSF, sendo estas compostas por agregado calcário na fração miúda e diferentes tipos de fíleres: cal, resíduo de beneficiamento de rocha ornamental (OSF) e fíler de escória de aciaria LD (SSF). Os resultados da caracterização do módulo dinâmico das misturas obtido no DSR (Figura 51a) mostraram que para baixas frequências não houve distinção na rigidez em amostras contendo diferentes tipos de

fíleres, enquanto para frequências mais elevadas, as MAFs com adição de cal se apresentaram mais rígidas do que aquelas com adição de OSF. Os resultados dos ensaios de fadiga, analisados com base no modelo simplificado de dano contínuo viscoelástico S-VECD (Figura 51b), mostraram que a mistura contendo a combinação de fíleres (OSF+SSF) apresentou um desempenho melhor que as demais amostras ensaiadas, uma vez que apresentava melhor integridade para um mesmo nível de dano. Com relação ao ensaio de fratura semicircular, a MAF com cal e a MAF com EMA apresentaram comportamento de materiais frágeis, enquanto a amostra com OSF+SSF apresentaram um melhor desempenho, atingindo a maior carga de pico e maiores energia de fratura, suportando grandes deformações até a ruptura. Os autores sugerem que como a maioria das partículas do fíler OSF são menores que  $25\mu$ , este fíler pode ter tido uma maior interação com o CAP, alterando assim a química do ligante. Enquanto isso, as partículas maiores – mas ainda sim menores que  $75\mu$  – presentes em maior quantidade no fíler SSF podem ter assumido um papel preponderante de preenchimento de vazios. A caracterização química dos fíleres sugere, ainda, que a grande concentração de óxido de cálcio que estes apresentaram pode ter contribuído para o aumento da rigidez das MAFs, assim como a presença de óxido de ferro no fíler SSF.

Figura 51 - Curvas mestras de Módulo Dinâmico (a) e Curvas CxS (b) de MAFs confeccionadas com diferentes fílers

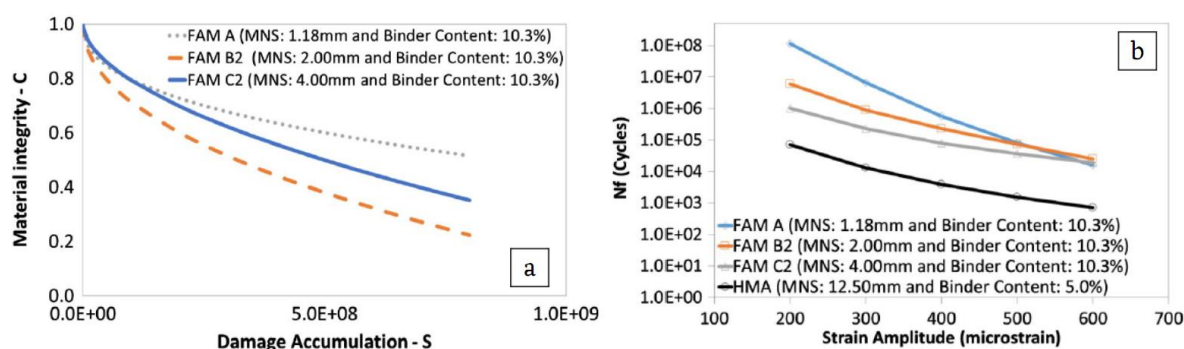


Fonte: Fonseca (2019)

Freire et al. (2017) investigaram a influência do tamanho máximo nominal (TMN) dos agregados na resistência à fadiga de MAFs. Foram utilizados agregado com diferentes TMN (4.00, 2.00 e 1.18 mm) para a composição das MAFs. Os autores submeteram as

MAFs ao ensaio de varredura de tempo no DSR. Os resultados desta pesquisa mostraram que o TMN dos agregados tem influência sobre o desempenho das MAFs frente ao fenômeno de fadiga, uma vez que a curva característica de dano (Figura 52a) e a curva de vida de fadiga ( $N_f$ ) por amplitude de deformação (Figura 52b) foi diferente para cada uma das MAFs estudadas. Os autores pontuam que a diminuição do TMN gera um incremento na vida de fadiga das MAFs para amplitudes de deformação inferiores a 500 microstrains, enquanto que acima desse limite o comportamento das MAFs produzidas com diferentes TMN dos agregados é muito similar.

Figura 52 - Curvas CxS (a) e Curvas de  $N_f$  x deformação (b) para MAFs produzidas com agregados com diferentes TMN

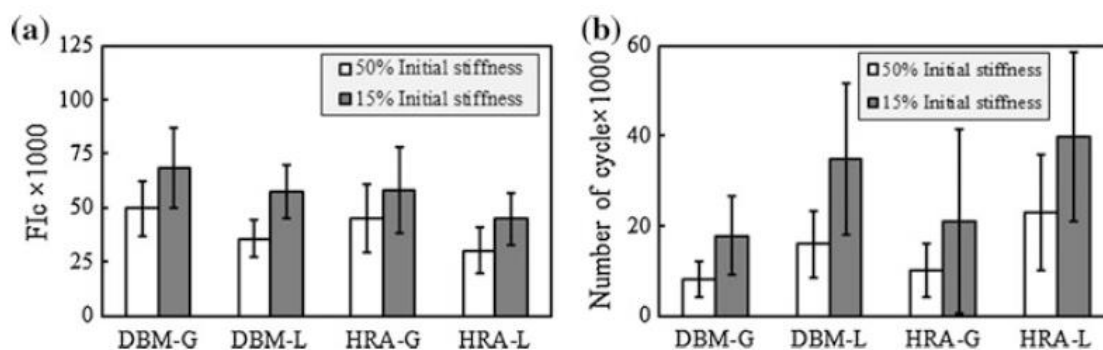


Fonte: Freire et al. (2017)

A pesquisa de Ahmed e Al-Khalid (2016) apresenta o desenvolvimento de um modelo de fratura para misturas asfálticas baseado em parâmetros fundamentais de fadiga. Para o desenvolvimento do modelo os autores conduziram ensaios de fadiga em MAFs utilizando o DSR e determinaram o número de ciclos necessário para uma redução de 50 e 15% na rigidez inicial das misturas. Os autores também calcularam para estes níveis de rigidez um parâmetro interno de dano, denominado Índice de Fratura ( $FI_c$ ). Ahmed e Al-Khalid (2016) utilizaram em sua pesquisa quatro MAFs diferentes, denominadas DBM-L, DBM-G, HRA-L e HRA-G, sendo as MAFs com nomenclatura terminando em G confeccionadas com agregado granítico e as MAFs com nomenclatura terminando em L produzidas com agregado calcário. Os resultados deste trabalho mostraram que para as misturas com agregado granítico o número de ciclos necessário para a redução da rigidez aos níveis pré-determinados foi menor do que o das MAFs com agregado

calcário, ao passo que o valor do  $FI_c$ , que representa o dano do material, foi superior para as MAFs produzidas com granito (Figura 53). Estes resultados indicam, portanto, que o tipo de agregado utilizado tem sim impacto na resistência à fadiga de MAFs.

Figura 53 - Resultados do Índice de Fratura das MAFs (a) e do Número de Ciclos necessários para a redução da rigidez destas aos valores de 15 e 50% em relação à rigidez inicial (b)

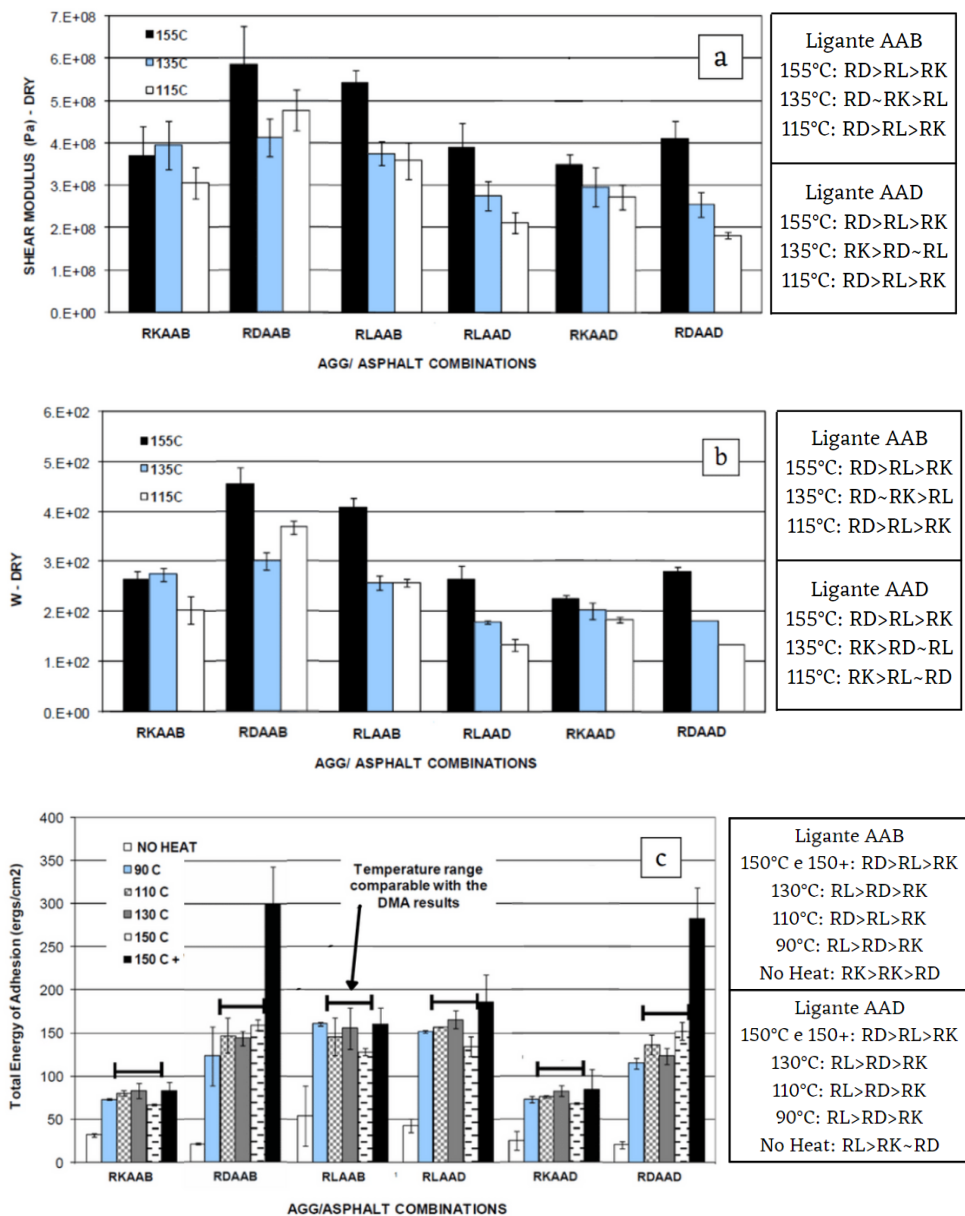


Fonte: Ahmed e Al-Khalid (2016)

Vasconcelos et al. (2010) investigaram a influência da redução das temperaturas de produção das MAFs na adesividade ligante-agregado, na rigidez e na resistência à fadiga de MAFs produzidas com diferentes ligantes e agregados. Para tanto, os autores utilizaram o ensaio de varredura de tempo para avaliar o comportamento mecânico das MAFs e utilizaram um micro calorímetro para mensurar a energia de adesão entre os ligantes asfálticos e os agregados utilizados na pesquisa. Seis misturas foram produzidas a partir da combinação de dois ligantes, denominados AAD e AAB, e três agregados, sendo estes provenientes de basalto (RK), seixo rolado (RL) e rocha calcária (RD). A Figura 54a mostra os valores de módulo dinâmico ( $|G^*|$ ) obtidos no ensaio realizado à 10 Hz e 24°C para cada um das MAFs estudadas e sendo estas produzidas sob diferentes temperaturas de usinagem para verificação do efeito da temperatura. Observa-se da Figura 54a que houve variação na rigidez das MAFs a depender do agregado utilizado, sendo as misturas produzidas com agregado calcário em geral mais rígidas que as demais. A Figura 54b, por sua vez, apresenta os valores da energia de deformação dissipada pelas MAFs ( $W$ ), sendo este um parâmetro utilizado para avaliar a resistência ao dano por fadiga em misturas. A análise da Figura 54b mostra que a variação do tipo de agregado também tem impacto sobre o desempenho das MAFs frente ao fenômeno de fadiga. Por fim, na Figura 54c observa-se a energia de adesão entre os ligantes e os

diferentes agregados sob diferentes condições de aquecimento. Nota-se que, de uma forma geral, os agregados calcários apresentaram melhor adesividade ao ligante asfáltico em comparação aos demais agregados utilizados na pesquisa.

Figura 54 - Módulo Dinâmico (a) Energia de Deformação (b) e Energia de Adesão das MAFs produzidas com diferentes agregados e sob diferentes temperaturas de usinagem



Fonte: Vasconcelos et al. (2010)

Diante da análise bibliométrica desenvolvida, percebe-se que o tópico de pesquisa *fadiga em MAFs* tem relevância diante do meio científico e apresenta uma tendência de crescimento para os próximos anos. Observa-se também que o número de trabalhos

publicados ainda é limitado, especialmente quando objetiva-se verificar a influência dos agregados no desempenho à fadiga das MAFs. Mais ainda, dos trabalhos publicados para esta finalidade, percebe-se que as características intrínsecas dos agregados, como mineralogia e forma, ainda não foram consideradas.

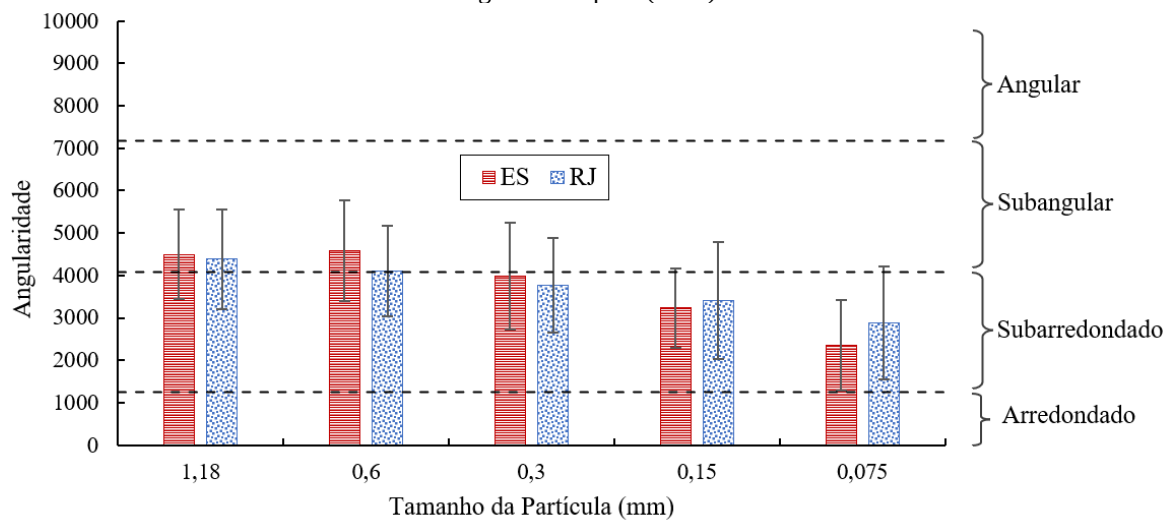
## 4.2. ANÁLISE EXPERIMENTAL

### 4.2.1. Caracterização dos Agregados

#### a) Morfologia

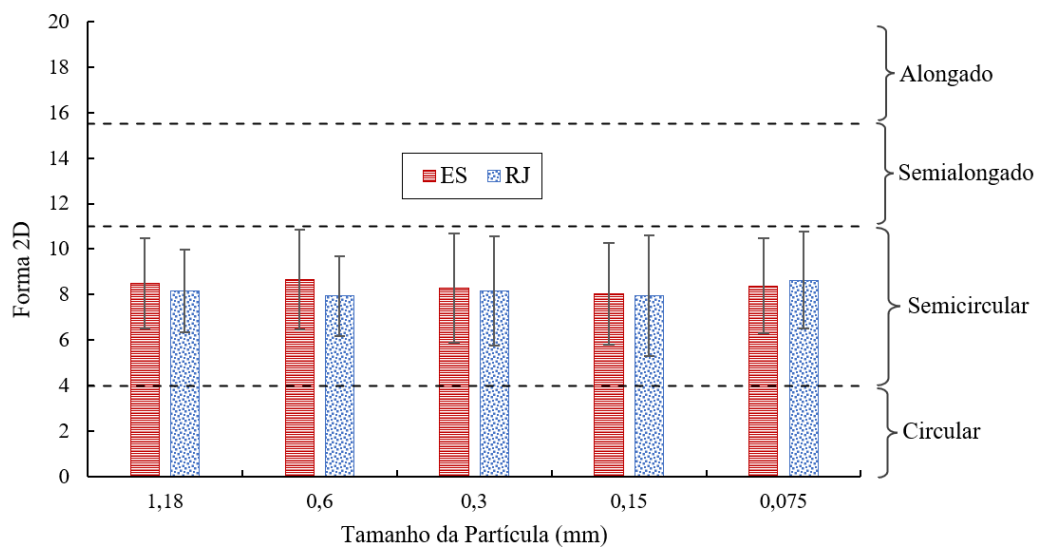
A caracterização morfológica dos agregados foi feita por meio de Processamento Digital de Imagem, com utilização do sistema AIMS, e por meio de Microscopia Eletrônica de Varredura. Os resultados de angularidade e forma 2D obtidos por meio do AIMS são exibidos nas Figuras 55 e 56, respectivamente, e as imagens obtidas pelo MEV são apresentadas nas Figuras 57 e 58.

Figura 55 - Angularidade dos agregados ES e RJ obtida por meio da análise do AIMS e classificação destes segundo Ibiapina (2018)



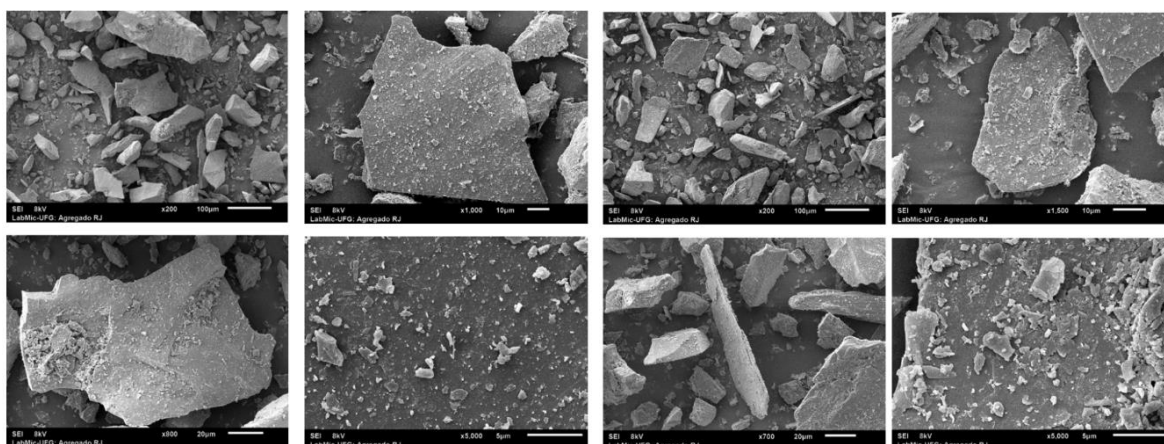
Fonte: Autora

Figura 56 - Forma 2D dos agregados ES e RJ obtida por meio da análise do AIMS e classificação destes segundo Ibiapina (2018)



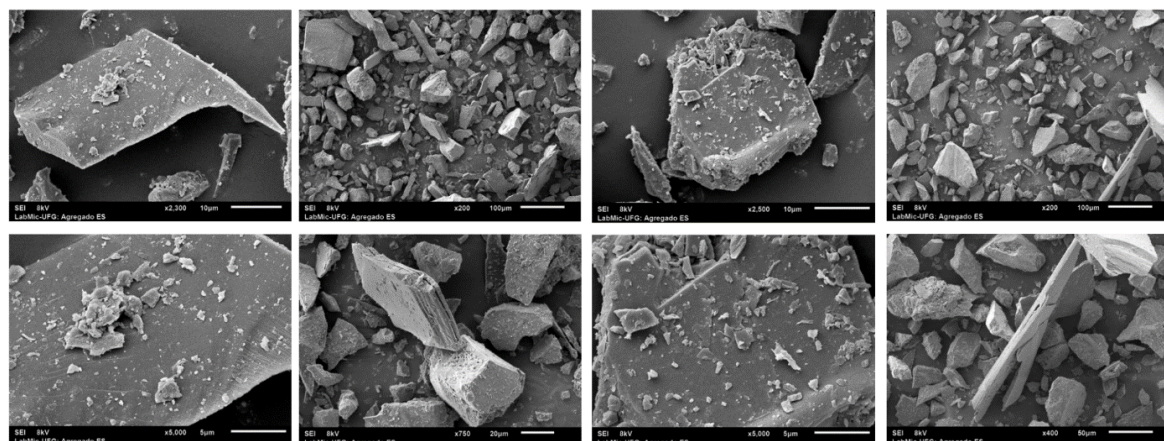
Fonte: Autora

Figura 57 - Imagens obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura para o agregado RJ



Fonte: Autora

Figura 58 - Imagens obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura para o agregado ES



Fonte: Autora

As Figuras 55 e 56, que exibem os resultados da caracterização feita pelo AIMS, mostram que os agregados ES e RJ são bastante semelhantes sob o aspecto da morfologia. Segundo a classificação de Ibiapina (2018), na análise da forma 2D ambos são denominados como semicirculares em todas as frações analisadas. Com relação à angularidade, para os dois agregados as frações retidas nas peneiras de no. 16 (1,18 mm) e no. 30 (0,60 mm) são classificadas como subangulares, e as demais frações como subarredondadas. Nota-se que não existiu distinção na classificação das partículas de diferentes tamanhos quanto à forma 2D e que, embora sob o aspecto da angularidade tenha existido diferença, as frações classificadas como subangulares apresentaram valor bem próximo ao limite de classificação. Portanto, percebe-se que de uma forma geral a morfologia dos agregados se apresentou homogênea em toda a extensão granulometria analisada. As imagens obtidas pelo MEV apresentadas nas Figuras 57 e 58 estão em consonância com os resultados do AIMS. Por meio de uma análise comparativa entre as capturas dos dois agregados percebe-se que praticamente não existe distinção entre eles.

Diante do apresentado, percebe-se que os agregados utilizados nesta pesquisa são muito semelhantes em termos de morfologia. Isso significa que embora as propriedades de forma tenham efeito sob o comportamento mecânico das misturas asfálticas, nesta pesquisa a morfologia dos agregados nas frações analisadas provavelmente não exercerá influência nos resultados obtidos.

## **b) Mineralogia**

A caracterização mineralógica dos agregados ES e RJ se iniciou com uma inspeção visual com lupa de mão, através da qual foi possível fazer uma análise semi-quantitativa dos minerais presentes nestes agregados. Os resultados desta análise estão apresentados na Tabela 4.

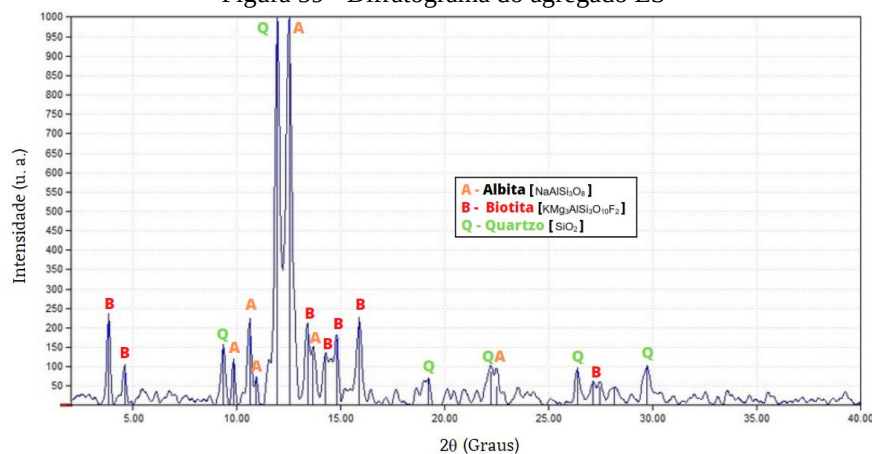
Tabela 4 - Minerais identificados nos agregados ES e RJ por meio da Inspeção Visual com Lupa de Mão

| Descrição                                                                                                               | Mineral   | % no Agregado ES | % no Agregado RJ |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|------------------|------------------|
| Minerais claros, sem plano de clivagem bem definido e que apresentavam brilho quando colocados sob a luz                | Quartzo   | 33,00%           | 52,40%           |
| Minerais claros, com planos de clivagem mais bem definidos e que apresentavam brilho espelhado                          | Feldspato | 44,90%           | 34,40%           |
| Minerais normalmente mais escuros, com planos de clivagem mais bem definidos e que se apresentavam sob a forma placóide | Mica      | 22,10%           | 12,20%           |
| Minerais Pretos, esverdeados ou avermelhados                                                                            | Outros    | -                | 1%               |

Fonte: Autora

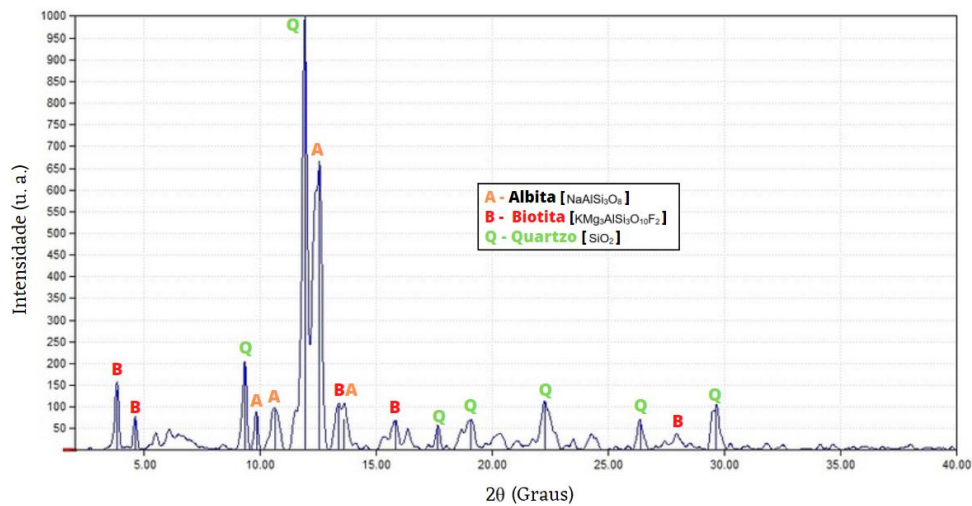
Para confirmar os resultados obtidos por meio da análise com lupa de mão, amostras dos dois agregados foram submetidas também à técnica de DRX. As Figuras 59 e 60 apresentam os difratogramas dos agregados ES e RJ, respectivamente, e a Figura 61 apresenta o quantitativo dos minerais obtidos com o DRX.

Figura 59 - Difratograma do agregado ES



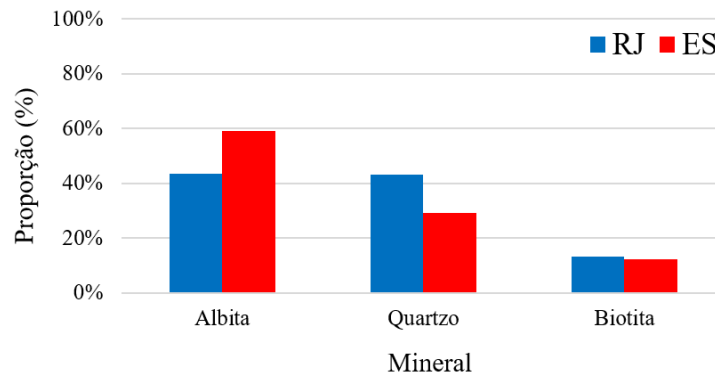
Fonte: Autora

Figura 60 - Difratograma do agregado RJ



Fonte: Autora

Figura 61 - Quantitativo dos minerais presentes nos agregados ES e RJ obtidos por meio do DRX



Fonte: Autora

Observa-se que os difratogramas dos dois agregados indicam a presença dos minerais albita (da família dos feldspatos), biotita (da família das micas), e quartzo. Logo, estes resultados coincidem com o que foi observado na inspeção visual e sugerem que ambos os agregados são provenientes de rochas félsicas. Levando em consideração a localização das pedreiras de onde os agregados foram coletados e a formação geológica dessas regiões, acredita-se que os agregados ES e RJ são provenientes de rocha granítica. Essa é uma rocha muito conhecida por sua aparência trifásica, que é resultante da presença de quartzo, feldspato e mica, e também é uma rocha abundante no sudeste do Brasil e amplamente explorada para a produção de agregados para a construção civil.

Embora os agregados ES e RJ provavelmente tenham a mesma origem petrográfica, as proporções nas quais os minerais se apresentam em cada um destes agregados é distinta,

como mostram a Tabela 4 e a Figura 61. Enquanto que nas amostras do agregado ES há predominância da albita, nas amostras do agregado RJ há maior quantidade de quartzo. Essa variação no percentual de cada mineral pode ter efeito nas características das MAFs produzidas, uma vez que cada um destes minerais apresenta propriedades bem diferentes entre si (DIÓGENES, 2018; SCHÖN, 2015).

#### 4.2.2. DOSAGEM E COMPACTAÇÃO DAS MAFs

As MAFs produzidas com agregado ES foram dosadas conforme a metodologia proposta por Ng (2017) e os parâmetros calculados estão apresentados na Tabela 5. Para a mistura com o agregado RJ foi adotado o mesmo teor de ligante e fazendo a substituição do agregado ES em volume por agregado RJ, a fim de eliminar o efeito da distribuição granulométrica no desempenho das MAFs. Com base nos resultados dos parâmetros da Tabela 5, o teor de ligante da MAF calculado foi de 9,66% e está coerente com valores encontrados na literatura. Os trabalhos de Ng et al. (2018) e Grasson Filho (2019), que utilizaram o mesmo método de dosagem aplicado neste trabalho, apresentam MAFs com teor de ligante variando entre 7,4 e 9,8%. Fonseca et al. (2019) também encontrou valores na faixa de 9,5% para o teor de ligante das MAFs com TNM de 2,00mm dosadas a partir de misturas asfálticas completas enquadradas na Faixa C, como neste estudo.

Tabela 5 - Parâmetros obtidos para ES e utilizados para a dosagem das MAFs

| Parâmetro    | Valor Obtido | Parâmetro  | Valor Obtido |
|--------------|--------------|------------|--------------|
| $S_s$        | 16,83        | $K_{MAC}$  | 3,77         |
| $\rho_{agg}$ | 2,83         | $K_{MAF}$  | 6,06         |
| % <i>Abs</i> | 0,20         | $T'_{MAF}$ | 9,66         |

Fonte: Autora

Com relação ao protocolo de compactação estabelecido em laboratório, este foi avaliado por meio dos parâmetros volumétricos das MAFs confeccionadas (Tabela 6). Nota-se que o volume de vazios fixado para o desenvolvimento desta pesquisa ( $4\pm1\%$ ) foi atingido com a utilização do procedimento de compactação proposto, o que indica a

eficácia deste método. Os coeficientes de variação apresentados para cada parâmetro em cada tipo de MAF demonstram, ainda, a repetibilidade do processo. Com relação à reprodutibilidade, esta pode ser verificada por meio do trabalho conjunto com o grupo de pesquisa em reologia de asfaltos da USP, como pode ser visto em Curado et al. (2021). Os autores replicaram o método, com diferença apenas no fechamento do molde, e produziram MAFs que alcançaram o volume de vazios pré-determinado.

Tabela 6 - Parâmetros volumétricos das MAFs utilizadas nesta pesquisa

| MAFs produzidas com agregado ES – MAF_ES |        |                          |                          | DMT <sub>ES</sub> = 2,427   |                          |
|------------------------------------------|--------|--------------------------|--------------------------|-----------------------------|--------------------------|
| Identificação da Amostra                 | VV (%) | Gmb (g/cm <sup>3</sup> ) | Identificação da Amostra | VV (%)                      | Gmb (g/cm <sup>3</sup> ) |
| ES-1                                     | 4,29   | 2,32                     | ES-6                     | 4,09                        | 2,33                     |
| ES-2                                     | 3,54   | 2,34                     | ES-7                     | 3,86                        | 2,33                     |
| ES-3                                     | 3,93   | 2,33                     | ES-8                     | 4,47                        | 2,32                     |
| ES-4                                     | 4,15   | 2,33                     | ES-9                     | 4,24                        | 2,32                     |
| ES-5                                     | 4,20   | 2,32                     | ES-10                    | 4,47                        | 2,32                     |
| Média VV                                 | 4,12   | Desvio Padrão VV         | 0,29                     | Coeficiente de Variação VV  | 0,07                     |
| Média Gmb                                | 2,33   | Desvio Padrão Gmb        | 0,01                     | Coeficiente de Variação Gmb | 0,00                     |
| MAFs produzidas com agregado RJ – MAF_RJ |        |                          |                          | DMT <sub>RJ</sub> = 2,305   |                          |
| Identificação da Amostra                 | VV (%) | Gmb (g/cm <sup>3</sup> ) | Identificação da Amostra | VV (%)                      | Gmb (g/cm <sup>3</sup> ) |
| RJ-1                                     | 4,30   | 2,21                     | RJ-6                     | 4,18                        | 2,21                     |
| RJ-2                                     | 4,58   | 2,20                     | RJ-7                     | 4,19                        | 2,21                     |
| RJ-3                                     | 3,94   | 2,21                     | RJ-8                     | 4,19                        | 2,21                     |
| RJ-4                                     | 3,63   | 2,22                     | RJ-9                     | 3,79                        | 2,22                     |
| RJ-5                                     | 4,01   | 2,21                     | RJ-10                    | 3,95                        | 2,21                     |
| Média VV                                 | 4,08   | Desvio Padrão VV         | 0,27                     | Coeficiente de Variação VV  | 0,07                     |
| Média Gmb                                | 2,21   | Desvio Padrão Gmb        | 0,01                     | Coeficiente de Variação Gmb | 0,00                     |

Fonte: Autora

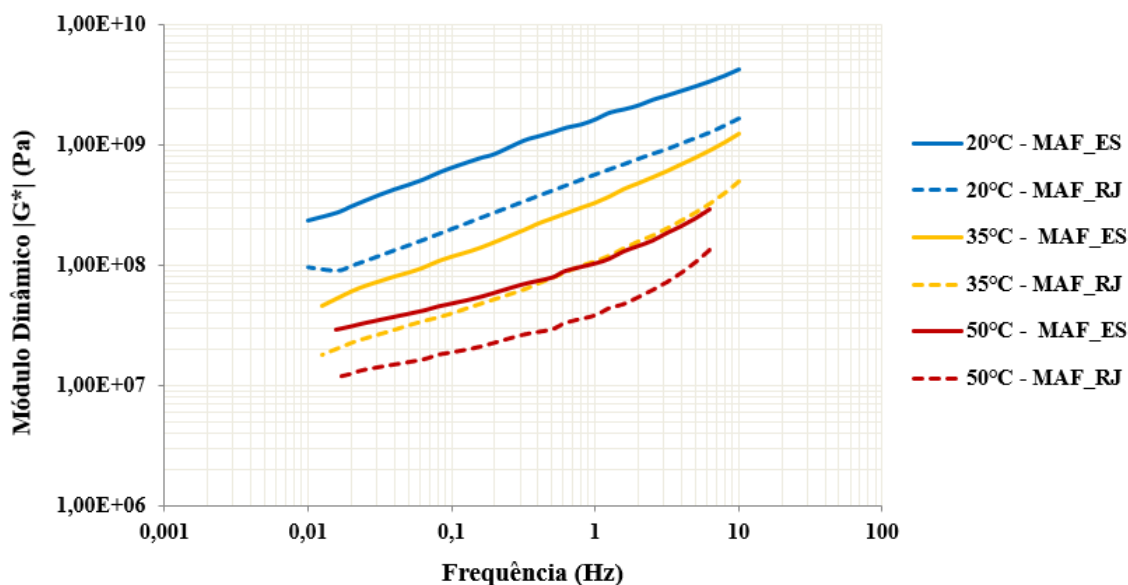
#### 4.2.3. ENSAIOS OSCILATÓRIOS

Foram compactadas cinco amostras de cada MAF para a realização do ensaio de varredura de frequência e cinco amostras para a realização do ensaio de varredura de tempo nas MAFs. No entanto, durante a realização desta etapa experimental, o DSR que estava sendo utilizado para a condução desta pesquisa começou a apresentar problemas

que impossibilitaram a conclusão desta etapa do estudo nas condições que haviam sido planejadas. Diante disso, e somado à dificuldade de consertar o equipamento devido às complicações geradas pela pandemia de COVID-19, o ensaio de varredura de frequência foi realizado apenas para uma única amostra de MAF de cada tipo e não foi possível realizar ensaio de varredura de tempo nas misturas. Apresenta-se aqui, portanto, os resultados da caracterização viscoelástica das MAFs realizada sob as condições descritas, e um resultado preliminar da curva CxS da MAF\_ES, construída para que se pudesse aplicar a metodologia do modelo S-VECD estudado.

Como mencionado anteriormente, a varredura de frequência foi conduzida em três temperaturas distintas: 20, 35 e 50°C. A Figura 62 apresenta as curvas de  $|G^*|$  x frequência para a MAF\_ES e MAF\_RJ obtidas para cada uma das temperaturas ensaiadas.

Figura 62 - curvas de  $|G^*|$  x frequência para a MAF\_ES e MAF\_RJ para as temperaturas de 20, 35 e 50°C



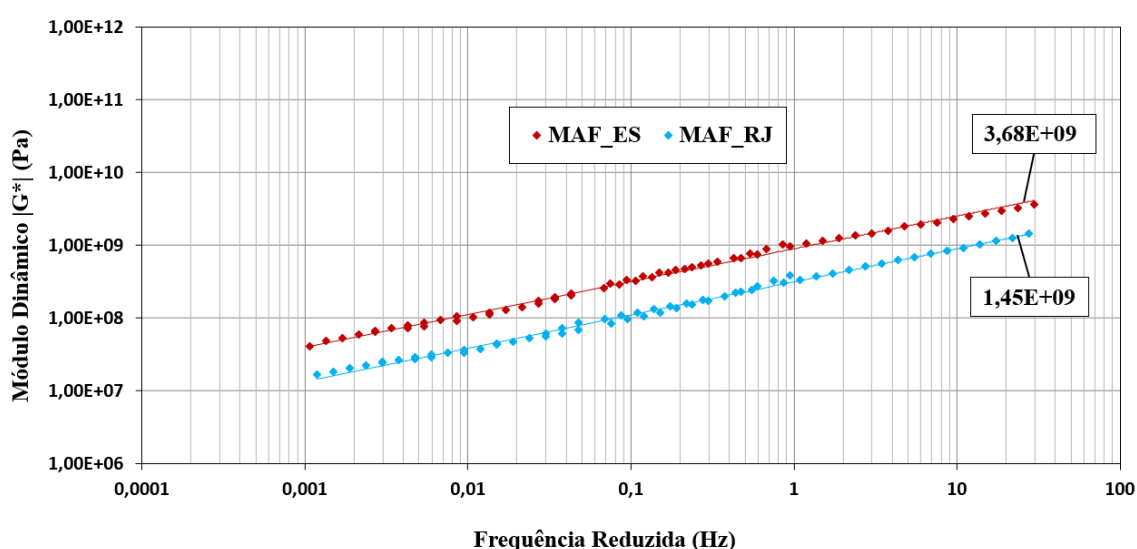
Fonte: Autora

É possível observar na Figura 62 o aumento da rigidez das MAFs diante de uma diminuição de temperatura. Este comportamento é esperado para materiais viscoelásticos, o que indica que estes resultados estão em conformidade com o que

é visto na literatura (LITTLE, ALLEN e BHASIN, 2018; RODRIGUES, 2018; COUTINHO, 2012).

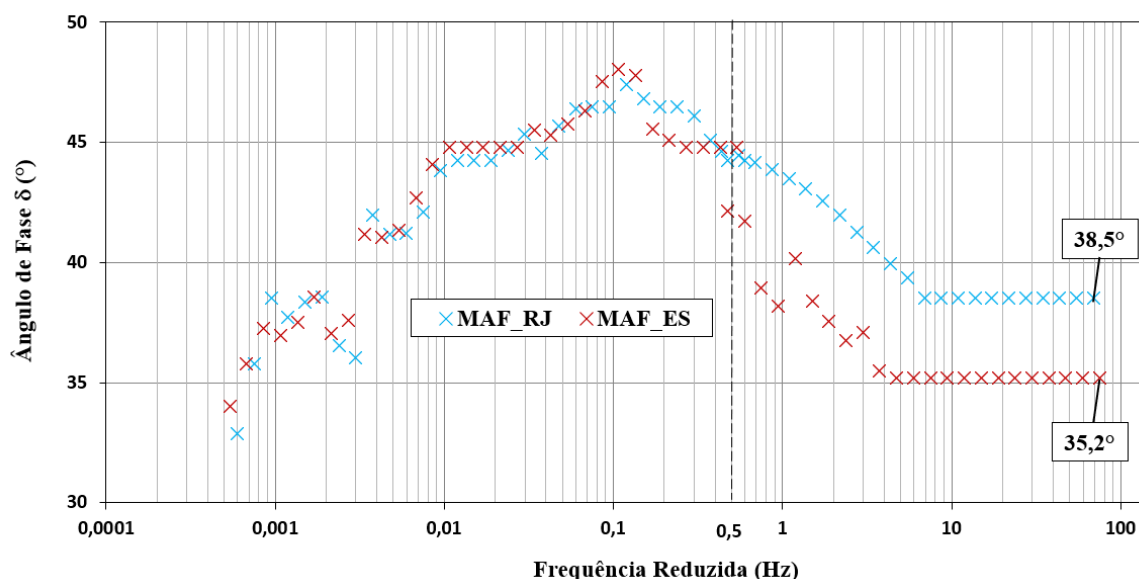
Por meio da aplicação do PSTT às curvas exibidas na Figura 62, foi possível então construir a curva mestra de módulo dinâmico para as MAFs estudadas (Figura 63). Utilizou-se do mesmo procedimento para a construção das curvas mestras de ângulo de fase das MAFs (Figura 64). As curvas mestras são capazes de descrever o comportamento do material a baixas frequências (as quais representam uma baixa velocidade de carregamento/tráfego ou altas temperaturas às quais o material possa estar submetido) e a altas frequências (as quais representam o comportamento do material a baixas temperaturas ou alta velocidade de carregamento/tráfego). Os resultados apresentados nas Figuras 63 e 64 se mostram coerentes com a literatura: as curvas mestras obtidas obedecem a tendência de comportamento dos materiais asfálticos, ou seja, elas representam o aumento da rigidez do material diante de um incremento de frequência e o aumento de sua elasticidade diante das condições mais extremas de carregamento (FONSECA, 2016; RODRIGUES, 2018).

Figura 63 - Curvas mestras de Módulo Dinâmico das MAF produzidas à temperatura de referência de 25°C



Fonte: Autora

Figura 64 - Curvas mestras de Ângulo de Fase das MAF produzidas à temperatura de referência de 25°C



Fonte: Autora

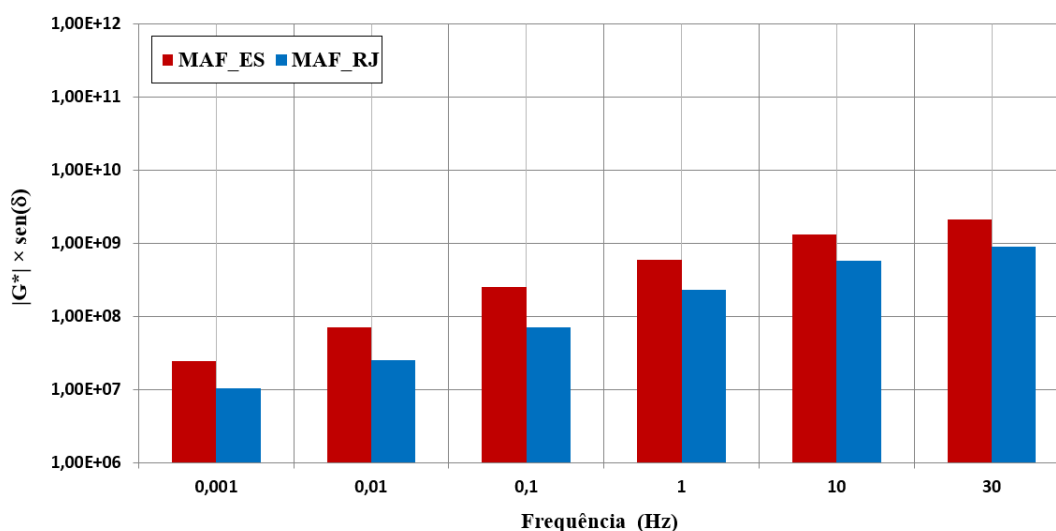
Observa-se na Figura 63, que apresenta a curva mestra de módulo dinâmico das MAFs, que ao longo de todo o espectro de frequências há diferença na rigidez das misturas. A MAF\_ES se apresentou cerca de 60% mais rígida que a MAF\_RJ. Com relação à curva mestra de ângulo de fase, percebe-se que o tipo de agregado utilizado teve mais influência sobre a elasticidade das MAFs quando estas foram submetidas a frequências maiores que 0,5 Hz. Neste caso, a MAF\_RJ em determinado momento apresentou elasticidade cerca de 10% superior à das MAF\_ES. Nota-se, portanto, que a utilização de diferentes agregados para a produção das MAFs teve mais impacto sobre a rigidez destes materiais do que sobre sua elasticidade.

Uma vez que as MAFs foram confeccionadas com o mesmo teor e tipo de ligante e mesma composição granulométrica dos agregados, as diferenças encontradas em seu comportamento viscoelástico podem estar associadas a diferenças nas propriedades dos agregados. A maior presença de Albita no agregado ES pode ter contribuído para a rigidez mais elevada da MAF\_ES, por exemplo, visto que este mineral possui um módulo de elasticidade superior ao dos demais minerais que compõem este agregado (SCHÖN, 2015). Uma outra possibilidade é que pode existir diferença na distribuição granulométrica dos agregados RJ e ES nas frações abaixo da peneira de no. 200 (0,075

mm), o que poderia resultar numa maior rigidez da MAF produzida com o agregado que apresenta maior concentração de finos, uma vez que estes finos podem atuar promovendo um efeito físico de preenchimento de vazios ou até mesmo alterar a química do ligante asfáltico (KIM et al., 2003). Como não foram encontradas diferenças significativas na angularidade e forma 2D dos agregados estudados, acredita-se que as diferenças no comportamento viscoelástico das MAFs não estejam associadas às propriedades morfológicas destes.

A partir das curvas mestras de módulo dinâmico e ângulo de fase apresentadas, pode-se ter uma ideia sobre o desempenho das MAFs diante do fenômeno de fadiga. O parâmetro  $|G^*|.sen(\delta)$  tem sido utilizado na metodologia Superpave como um indicador da resistência à fadiga de misturas asfálticas, de modo que quanto menor for o valor desta relação, maior será a resistência à fadiga do material (ARAGÃO, 2007; JIN et al., 2021). Diante disso, a Figura 65 apresenta os valores de  $|G^*|.sen(\delta)$  para as MAFs estudadas em diferentes frequências de análise.

Figura 65 – Comparação do parâmetro  $|G^*| \times sen(\delta)$  das MAFs estudadas sob diferentes frequências



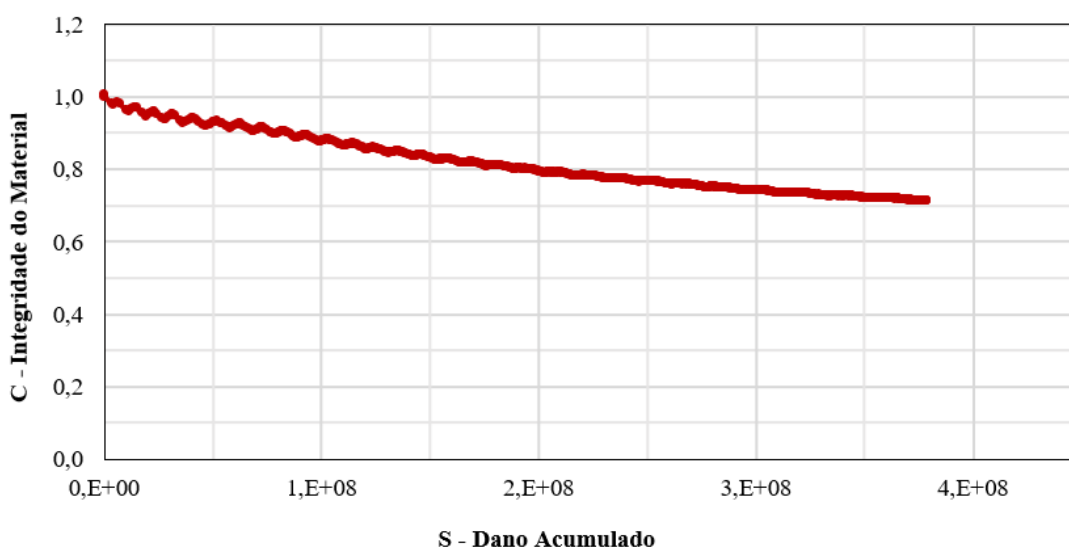
Fonte: Autora

Observa-se na Figura 65 que levando em consideração apenas a relação  $|G^*|.sen(\delta)$  a MAF\_RJ apresentaria maior resistência ao dano por fadiga do que a MAF\_ES. Isto porque a menor rigidez e a maior elasticidade desta mistura favorecem a dissipação de

energia por deformação ao invés do alívio de tensões por trincamento (ARAGÃO, 2007). No entanto, a relação  $|G^*|.sen(\delta)$  é apenas um indicativo da resistência à fadiga dos materiais e as propriedades viscoelásticas das MAFs não podem ser encaradas como único fator que têm influência sobre o comportamento das misturas diante desse fenômeno. As características dos agregados e da interação ligante-agregado podem impactar nos mecanismos de propagação de dano destas misturas. Por exemplo, a maior presença de quartzo no agregado RJ pode resultar em um problema de adesividade entre este e o CAP, tornando a MAF\_RJ mais susceptível à fratura do que a MAF\_ES. Portanto, no final das contas a resistência à fadiga de uma mistura asfáltica resulta de um efeito sinérgico das características dos materiais que a constituem.

Para verificar o real desempenho das MAFs estudadas frente ao fenômeno de fadiga, seria realizada uma análise das curvas características de dano das misturas obtidas por meio da realização do ensaio de varredura de tempo. Em vista dos acontecimentos discutidos no início desta seção, apresenta-se neste trabalho somente um resultado preliminar da curva CxS da MAF\_ES (Figura 66), construída para que se pudesse aplicar a metodologia do modelo S-VECD estudado.

Figura 66 - Resultado preliminar da Curva C x S da MAF\_ES



Fonte: Autora

A curva CxS apresentada demonstra a perda de integridade do material à medida em

que o dano se propaga devido à ação do carregamento cíclico. Nota-se que o ensaio foi interrompido quando a amostra ainda apresentava um nível de integridade em torno de 80% da integridade inicial. Caso o ensaio tivesse prosseguido sem nenhuma interrupção, este seria finalizado apenas com a ruptura da amostra. Como mencionado, a curva característica de dano apresentada na Figura 66 se trata apenas de um resultado preliminar, não sendo possível obter conclusões a respeito da resistência à fadiga do material.

## 5. CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo realizar uma análise bibliométrica e experimental da influência das propriedades de agregados britados empregados para pavimentação na resistência à fadiga de matrizes de agregados finos. Diante dos resultados apresentados e discutidos foi possível chegar às seguintes conclusões:

- O tópico de pesquisa *fadiga em MAFs* tem relevância diante do meio científico e apresenta uma tendência de crescimento para os próximos anos. Observa-se também que o número de trabalhos publicados ainda é limitado, especialmente quando se tem como objetivo verificar a influência dos agregados no desempenho à fadiga das MAFs. Mais ainda, dos trabalhos publicados para esta finalidade, percebe-se que as características intrínsecas dos agregados, como mineralogia e forma, ainda não foram consideradas;
- A presença de quartzo, feldspato e mica nos agregados utilizados nesta pesquisa indica que estes provavelmente têm origem granítica. Esta conclusão é reforçada pela formação geológica das regiões onde se localizam as pedreiras que forneceram o material para este estudo;
- A morfologia dos agregados RJ e ES se mostrou muito semelhante, sendo estes classificados por Ibiapina (2018) como semicirculares em todas as frações analisadas, subangulares nas frações retidas nas peneiras de no. 16 (1,18 mm) e no. 30 (0,60 mm), e subarredondados nas demais frações analisadas;
- O teor de ligante encontrado pelo método de dosagem adotado neste trabalho se mostrou coerente com valores encontrados na literatura por autores que utilizaram o mesmo procedimento (NG, 2018; GRASSON FILHO, 2019);
- O protocolo de compactação estabelecido se mostrou eficaz, uma vez que foi possível atingir o volume de vazios pré-determinado; repetível, dados os baixos coeficientes de variação apresentados pelos parâmetros volumétricos das MAFs confeccionadas; e reproduzível, o que pôde ser verificado diante da reprodução do método por pesquisadores da USP (CURADO et al., 2021);

- O tipo de agregado utilizado teve influência sobre as propriedades viscoelásticas das MAFs produzidas. O agregado RJ conferiu às amostras maior elasticidade para frequências acima de 0,5 Hz, enquanto o agregado ES tornou as amostras mais rígidas ao longo de todo o espectro de frequências. Essas diferenças podem estar associadas à variação no proporcionamento dos minerais presentes nos agregados ES e RJ, ou, ainda, à possível diferença na distribuição granulométrica destes agregados nas frações abaixo da peneira de no. 200 (0,075 mm);
- A utilização de diferentes agregados para a produção das MAFs teve mais impacto sobre a rigidez destes materiais do que sobre sua elasticidade, uma vez que os valores de  $|G^*|$  das duas MAFs divergiram em até 60%, enquanto os valores de ângulo de fase apresentaram variação de apenas 10%.
- Considerando apenas o parâmetro  $|G^*|.sen(\delta)$ , espera-se que a MAF\_RJ apresente melhor desempenho à fadiga do que a MAF\_ES. No entanto, além das propriedades viscoelásticas das MAFs, as características dos agregados e da interação ligante-agregado podem impactar nos mecanismos de propagação de dano das misturas. A maior concentração de quartzo no agregado RJ pode resultar em um problema de adesividade entre este e o CAP, tornando a MAF\_RJ mais susceptível à fratura do que a MAF\_ES. Portanto, não se pode afirmar qual das duas misturas apresentará o melhor desempenho diante do fenômeno de fadiga.

Como mencionado anteriormente, o DSR que estava sendo utilizado para a condução desta pesquisa começou a apresentar problemas e, diante da dificuldade de consertar o equipamento devido às complicações geradas pela pandemia de COVID-19, não foi possível realizar ensaio de varredura de tempo nas MAFs. Portanto, não foi possível construir as curvas CxS das misturas para compará-las. Acredita-se que, diante da diferença encontrada no comportamento viscoelástico das MAFs e no proporcionamento dos minerais constituintes dos agregados estudados, pode sim haver influência do tipo de agregado no desempenho das MAFs com relação à fadiga. Diante disso, apresenta-se a seguir algumas sugestões para trabalhos futuros.

## 5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar o ensaio de varredura de frequência em um número maior de amostras de MAFs estudadas neste trabalho para confirmar resultados obtidos na caracterização viscoelástica das MAFs;
- Realizar o ensaio de varredura de tempo nas MAFs produzidas com os agregados empregados nesta pesquisa para comparar o desempenho dessas misturas frente ao fenômeno de fadiga e verificar se houve influência do tipo de agregado empregado;
- Investigar a distribuição granulométrica dos agregados ES e RJ nas frações abaixo da peneira de no. 200 (0,075 mm), a fim de entender se este parâmetro teve influência na rigidez das MAFs estudadas;
- Realizar um ensaio de adesividade nos agregados ES e RJ para verificar se há alguma diferença considerável que possa impactar na resistência à fadiga das MAFs
- Realizar os ensaios empregados nesta pesquisa em agregados provenientes de rochas de diferentes composições daquelas utilizadas nesta pesquisa (como máficas e ultramáficas) para aumentar o entendimento da influência da mineralogia e propriedades de forma no comportamento viscoelástico e na resistência à fadiga de MAFs.

## REFERÊNCIAS

AHMED, T.M.; AL-KHALID, H. A Simple Fracture Model for Hot Mix Asphalt Based on Fundamental Fatigue Parameters. *In*: Chabot A., Buttlar W., Dave E., Petit C., Tebaldi G. (eds) **Anais... 8th RILEM International Conference on Mechanisms of Cracking and Debonding in Pavements**. RILEM Bookseries, vol 13. 2016. Springer, Dordrecht. Disponível em: <[https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-024-0867-6\\_23](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-024-0867-6_23)>. Acesso em: setembro de 2021.

ANEPAC – Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Construção Civil. **O mercado de agregados no Brasil - Panorama e perspectivas para o setor de agregados para construção**. São Paulo: ANEPAC, 2015. Disponível em: <<http://www.anepac.org.br/agregados/mercado/item/8-mercado-de-agregados-no-brasil>>. Acesso em: julho de 2021.

ARAGÃO, F. T. S. **Effects of aggregates on properties and performance of mastics and superpave hot mix performance of mastics and superpave hot mix asphalt mixtures**. Civil Engineering Theses, Dissertations, and Student Research. 11. Lincoln, Nebraska, 2007. Disponível em: <<https://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1010&context=civilengdiss>>. Acesso em: setembro de 2021.

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.

BABADOPULOS, L. F. A. L. **A contribution to couple aging to hot mix asphalt (HMA) mechanical characterization under load-induced damage**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Programa de Pós- Graduação em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014. 141f. Disponível em: <[http://www.repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/11164/1/2014\\_dis\\_lfalbabadopulos.pdf](http://www.repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/11164/1/2014_dis_lfalbabadopulos.pdf)>. Acesso em: agosto de 2021.

BERNUCCI, L. B. [et al.]. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. Rio de Janeiro: ABEDA, 2008.

BÉRUBÉ, M. The Mineralogical and Petrographic Analysis of Concrete Aggregates. **JOM: The Member Journal of the Minerals, Metals & Materials Society**, v. 53, n. 12, p. 45-47, 2001. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11837-001-0014-y>>. Acesso em: agosto de 2021.

BESSA, I. S. [et al.]. Aggregate Shape Properties and Their Influence on the Behavior of Hot-Mix Asphalt. **Journal of Materials Civil Engineering**, v. 27, n. 2001, 2015. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/277638972\\_Aggregate\\_Shape\\_Properties\\_and\\_Their\\_Influence\\_on\\_the\\_Behavior\\_of\\_Hot-Mix\\_Ashphalt](https://www.researchgate.net/publication/277638972_Aggregate_Shape_Properties_and_Their_Influence_on_the_Behavior_of_Hot-Mix_Ashphalt)>. Acesso em: agosto de 2021.

BHASIN, A.; LITTLE, D. N. Application of microcalorimeter to characterize adhesion between asphalt binders and aggregates. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 21, n. 6, p. 235–243, 2009. Disponível em:

<<https://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/%28ASCE%290899-1561%282009%2921%3A6%28235%29>>. Acesso em: junho de 2021.

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 (Doutorado em Engenharia Civil) - Texas A&M University. College Station, TX, 2008, 240 f. Disponível em: <<https://core.ac.uk/download/pdf/147132747.pdf>>. Acesso em: setembro de 2021.

CHEN, Z. [et al.]. Characteristics of bonding behavior between basic oxygen furnace slag and asphalt binder. **Construction and Building Materials**, v. 64, p. 60–66, 2014. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061814003912>>. Acesso em: agosto de 2021.

CHEUNG, C. Y. **Mechanical Behavior of Bitumens and Bituminous Mixtures**. Tese (Doutorado) - University of Cambridge. Cambridge, UK. 1995. Disponível em: <<https://www.repository.cam.ac.uk/handle/1810/252101>>. Acesso em: setembro de 2021.

CNT - Confederação Nacional Do Transporte. **Pesquisa CNT de Rodovias 2019 – Relatório Gerencial**. Brasília: CNT: SEST SENAT, 2019. Disponível em: <<https://pesquisarodovias.cnt.org.br/downloads/ultimaversao/gerencial.pdf>>. Acesso em: agosto de 2021.

\_\_\_\_\_. **Pesquisa CNT de Rodovias 2018 – Relatório Gerencial**. Brasília: CNT: SEST SENAT, 2018. Disponível em: <[https://pesquisarodovias.cnt.org.br/Downloads/Edicoes//2018/Relat%C3%B3rio%20Gerencial/Pesquisa%20CNT%20\(2018\)%20-%20ALTA.pdf](https://pesquisarodovias.cnt.org.br/Downloads/Edicoes//2018/Relat%C3%B3rio%20Gerencial/Pesquisa%20CNT%20(2018)%20-%20ALTA.pdf)>. Acesso em: agosto de 2021.

\_\_\_\_\_. **Por que os pavimentos das rodovias do Brasil não duram?** Publicado em 24 de agosto de 2017 às 20h00. Disponível em: <<https://cnt.org.br/agencia-cnt/cnt-divulga-estudo-por-que-pavimento-rodovias-brasil-nao-duram-resultados>>. Acesso em: junho de 2021.

COUTINHO, R. P. **Utilização da parte fina de misturas asfálticas para avaliação do dano por fadiga**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes. Universidade Federal do Ceará (UFC). Fortaleza/CE, 2012. 109f. Disponível em: <[http://www.repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/4888/1/2012\\_dis\\_rpcoutinho.pdf](http://www.repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/4888/1/2012_dis_rpcoutinho.pdf)>. Acesso em: junho de 2021.

CUI, P. [et al.]. Morphological characteristics of aggregates and their influence on the performance of asphalt mixture. **Construction and Building Materials**, Volume 186, 20 October 2018, Pages 303-312. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061818317926>>. Acesso em: setembro de 2021.

CURADO, T. S. [et al.]. **Study of maximum specific gravity of fine aggregate matrices: a comparison of sample sizes and density determination procedures**. *Anais... 35º Congresso da ANPET*, 2021. Disponível em: <<http://www.anpet.org.br/index.php/pt/congresso-anual>>. Acesso em: setembro de 2021.

D'ANGELO, J., ANDERSON, R. M. **Material Production, Mix Design, and Pavement Design Effects on Moisture Damage**. Proceedings of Moisture Sensitivity of Asphalt Pavements-A National Seminar, February 4-6, 2003. Transportation Research Board. 2003. Disponível em: <<https://trid.trb.org/view/689660>>. Acesso em: agosto de 2021.

DEDAVID, B. A.; GOMES, C. I.; MACHADO, G. **Microscopia eletrônica de varredura: aplicações e preparação de amostras : materiais poliméricos, metálicos e semicondutores**. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007. Disponível em: <<https://bibliodigital.unijui.edu.br:8443/xmlui/handle/123456789/1447>>. Acesso em: julho de 2021.

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 (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes. Universidade Federal do Ceará (UFC). Fortaleza/CE, 2018. 146f. Disponível em: <<http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/34523>>. Acesso em: setembro de 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 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 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

DU, C. [et al.]. Analysis of cohesive and adhesive damage initiations of asphalt pavement using a microstructure-based finite element model. **Construction and Building Materials**, Volume 261, 20 November 2020, 119973. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061820319784>>. Acesso em: agosto de 2021.

FONSECA, J. F. [et al.]. Evaluation of Effects of Filler By-Products on Fine Aggregate Matrix Viscoelasticity and Fatigue-Fracture Characteristics. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 31, n.10, p. 04019240, 2019. Disponível em: <<https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29MT.1943-5533.0002891>>. Acesso em: setembro de 2021.

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 (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). Vitória. ES, 2016. 110f. Disponível em: <<https://repositorio.ufes.br/handle/10/9461>>. Acesso em: setembro de 2021.

FREIRE, R. A. [et al.]. Aggregate aximum Nominal Sizes' Influence on Fatigue amage Performance Using Different Scales. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 29, n. 8,

p. 04017067, 2017. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29MT.1943-5533.0001912>>. Acesso em: agosto de 2021.

FREIRE, R. A. **Evaluation of the coarse aggregate influence in the fatigue damage using fine aggregate matrices with different maximum nominal sizes**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia de Transportes, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes. Fortaleza, 2015. 97 p. Disponível em: [http://www.repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/13875/1/2015\\_dis\\_rafreire.pdf](http://www.repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/13875/1/2015_dis_rafreire.pdf)>. Acesso em: julho de 2021.

FREIRE, R. A.; CASTELO BRANCO, V. T. F.; VASCONCELOS, K. L. Avaliação da resistência ao trincamento de misturas asfálticas compostas por agregados miúdos com diferentes tamanhos máximos nominais. **Revista Transportes**, v. 16, n. 2010, p. 117–127, 2014. Disponível em: <https://www.revistatransportes.org.br/anpet/article/view/791/528>>. Acesso em: julho de 2021.

FROSSARD, R. M. **Influência da Composição Química de Agregados na Resistência ao Dano por Umidade Induzida de Misturas Asfálticas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), 2020.

GOLALIPOUR, A. [et al.]. Effect of Aggregate Gradation on Rutting of Asphalt Pavements. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, Volume 53, 3 October 2012, Pages 440-449. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877042812043571>>. Acesso em: agosto de 2021.

GOMES NETO, D. P. **Contribuição para as metodologias de identificação e previsão da reação álcali- agregado (RAA) utilizando agregados graníticos e a técnica de microondas**. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Sergipe, 2014. 136f. Disponível em: [https://ri.ufs.br/jspui/bitstream/riufs/3492/1/DAVID\\_PAIVA\\_GOMES\\_NETO.pdf](https://ri.ufs.br/jspui/bitstream/riufs/3492/1/DAVID_PAIVA_GOMES_NETO.pdf)>. Acesso em: setembro de 2021.

GOUVEIA, L. T.; JÚNIOR, J. L. F.; SOARES, J. B. Influência da energia de compactação no comportamento volumétrico e mecânico de misturas asfálticas. **Revista Transportes**, XV, p. 34–41, 2007. Disponível em: <https://www.revistatransportes.org.br/anpet/article/view/45>>. Acesso em: julho de 2021.

GRASSON FILHO, A. **Evaluation of the specific surface method as a tool to determine the asphalt content of fine aggregate matrices (FAM)**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes e Área de Concentração em Infraestrutura de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2018. 98f. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18143/tde-16122019-141054/publico/AGFdissertation.pdf>>. Acesso em: setembro de 2021.

GUDIPUDI, P. P.; UNDERWOOD, B. S. Use of Fine Aggregate Matrix Experimental Data in Improving Reliability of Fatigue Life Prediction of Asphalt Concrete. Transportation Research Record: **Journal of the Transportation Research Board**, v. 2631, p. 65–73, 2017. Disponível

em:

<[https://www.researchgate.net/publication/315984646\\_Use\\_of\\_Fine\\_Aggregate\\_Matrix\\_Experimental\\_Data\\_in\\_Improving\\_Reliability\\_of\\_Fatigue\\_Life\\_Prediction\\_of\\_Aspphalt\\_Concrete\\_Sensitivity\\_of\\_This\\_Approach\\_to\\_Variation\\_in\\_Input\\_Parameters](https://www.researchgate.net/publication/315984646_Use_of_Fine_Aggregate_Matrix_Experimental_Data_in_Improving_Reliability_of_Fatigue_Life_Prediction_of_Aspphalt_Concrete_Sensitivity_of_This_Approach_to_Variation_in_Input_Parameters)>. Acesso em: setembro de 2021.

HAMEDI, G. H. [et al.]. Investigating the Effect of Using Waste Ultra-high-molecular-weight Polyethylene on the Fatigue Life of Asphalt Mixture. **Periodica Polytechnica Civil Engineering**, 64(4), pp. 1170–1180, 2020. Disponível em: <<https://pp.bme.hu/ci/article/view/16363/8863>>. Acesso em: agosto de 2021.

HEFER, A.; LITTLE, D. Adhesion in Bitumen-Aggregate Systems and Quantification of the Effects of Water on the Adhesive Bond. Texas Transportation Institute The Texas A&M University System College Station, Texas 77843-3135. **International Center for Aggregates Research**, 2005. 220f. Disponível em: <<https://repositories.lib.utexas.edu/bitstream/handle/2152/35371/505-1.pdf?sequence=2>>. Acesso em: julho de 2021.

HICKS, R. G. **Moisture Damage in Asphalt Concrete**. National Cooperative Highway Research Program. Synthesis of Highway Practice 175, Transportation Research Board, Washington, 1991. Disponível em: <[https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/nchrp/nchrp\\_syn\\_175.pdf](https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/nchrp/nchrp_syn_175.pdf)>. Acesso em: agosto de 2021.

HINTZ, C. **Understanding Mechanisms Leading to Asphalt Binder Fatigue**. Tese (Doutorado) - University of Wisconsin. Madison, WI. 2012. 144f. Disponível em: <<https://depot.library.wisc.edu/repository/fedora/1711.dl:J4YV7EQJLGND484/datastreams/REF/content>>. Acesso em: junho de 2021.

HUANG, Y. H. **Pavement Analysis and Design**. Pearson Education: Upper Saddle River, NJ., 2004.

IZOTON, S. **Avaliação dos efeitos da expansão de agregados contendo escória de aciaria LD no desempenho mecânico de misturas asfálticas envelhecidas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). Vitória. ES, 2020. 115f. Disponível em: <<https://revistatransportes.org.br/anpet/article/view/2442>>. Acesso em: setembro de 2021.

JAMIESON, I. L. [et al.]. Results on Binder- Aggregate Adhesion and Resistance to Stripping. **Asphalt Yearbook**, p 17-21 1995. Disponível em: <<https://trid.trb.org/view/425071>>. Acesso em: agosto de 2021.

Jl, X. [et al.]. Study on the multiscale adhesive properties between asphalt and Aggregate. **Construction and Building Materials**, Volume 249, 20 July 2020, 118693. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095006182030698X?via%3Dihub>>. Acesso em: setembro de 2021.

KARKI, P. **An Integrated Approach to Measure and Model Fatigue Damage and Gealing in Asphalt Composites**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - The Graduate School of The University of Texas at Austin, Texas, 2014.1429 f. Disponível em:

<<https://repositories.lib.utexas.edu/handle/2152/31322>>. Acesso em: setembro de 2021.

KARKI, P. **Computational and experimental characterization of bituminous composites based on experimentally determined properties of constituents**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - The Graduate College at the University of Nebraska, University of Nebraska, Lincoln, 2010, 145f. Disponível em: <<https://digitalcommons.unl.edu/civilengdiss/10/>>. Acesso em: agosto de 2021.

KIM, Y. [et al.]. A Simple Testing Method to Evaluate Fatigue Fracture and Damage Performance of Asphalt Mixtures. **Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists**, vol. 75, pp. 755-787, 2006. Disponível em: <<https://trid.trb.org/view/798266>>. Acesso em: agosto de 2021.

KIM, Y-R.; LITTLE, D. N.; SONG, I. Effect of Mineral Fillers on Fatigue Resistance and Fundamental Material Characteristics: Mechanistic Evaluation. Transportation Research Record: **Journal of the Transportation Research Board**, vol. 1832, p. 1-8, 2003. Disponível em: <<https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.3141/1832-01>>. Acesso em: setembro de 2021.

KOMMIDI, S. R. [et al.]. Fatigue characterization of binder with aging in two length scales: sand asphalt mortar and parallel plate binder film. **Construction and Building Materials**, Volume 237, 20 March 2020, 117588. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061819330405?via%3Dihub>>. Acesso em: setembro de 2021.

KUANG, D. [et al.]. Impact of particle morphology on aggregate-asphalt interface behavior. **Construction and Building Materials**, Volume 132, 1 February 2017, Pages 142-149. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061816319018?via%3Dihub>>. Acesso em: setembro de 2021.

LITTLE, D. N.; ALLEN, D. H.; BHASIN, A. **Modeling and design of flexible pavements and materials**. Ed. Springer: Texas, 2018.

LIU, Y. [et al.]. Effect of coarse aggregate morphology on the mechanical properties of stone matrix asphalt. **Construction and Building Materials**, Volume 152, 15 October 2017, Pages 48-56. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095006181731200X?via%3Dihub>>. Acesso em: setembro de 2021.

LUCAS JÚNIOR, J. L. O. [et al.]. Effects of rheology and adhesiveness of asphalt binders to different substrates on the resistance to moisture conditioning. **The Journal of Adhesion**, Received 22 Feb 2021, Accepted 10 Apr 2021, Published online: 16 Jun 2021. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00218464.2021.1942855?journalCode=gadh20>>. Acesso em: setembro de 2021.

LUCAS JÚNIOR, J. L. O.; BABADOPULOS, L. F. A. L.; SOARES, J. B. Effect of aggregate shape properties and binder's adhesiveness to aggregate on results of compression and tension/compression tests on hot mix asphalt. **Materials and Structures**, volume 53, Article number: 43 (2020). Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1617/s11527-020-01472-1>>. Acesso em: julho de 2021.

MASAD, E. A. [et al.]. Characterization of HMA moisture damage using surface energy and fracture properties. *Asphalt Paving Technology: Association of Asphalt Paving Technologists-Proceedings of the Technical Sessions*, v. 75, 2006. Disponível em: <<https://asu.pure.elsevier.com/en/publications/characterization-of-hma-moisture-damage-using-surface-energy-and->>. Acesso em: julho de 2021.

MASAD, E. A. **Aggregate Imaging System (AIMS): Basics and Applications**. Report No. FHWA/TX-05/5-1707-01-1, 2005. Texas Transportation Institute The Texas A&M University System College Station, Texas 77843-3135. Disponível em: <<https://static.tti.tamu.edu/tti.tamu.edu/documents/5-1707-01-1.pdf>>. Acesso em: setembro de 2021.

MILLER, C. [et al.]. **Investigating aspects of aggregate properties that influence asphalt mixtures performance**. Research Report for DTFH61-06-C-00021, Texas A & M University at College Station and The University of Texas at Austin, Texas; 2011. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/profile/Kamilla-Vasconcelos/publication/265104310\\_INVESTIGATING\\_ASPECTS\\_OF\\_AGGREGATE\\_PROPERTIES\\_THAT\\_INFLUENCE ASPHALT MIXTURE PERFORMANCE/links/55d3059108ae7fb244f577e7/INVESTIGATING-ASPECTS-OF-AGGREGATE-PROPERTIES-THAT-INFLUENCE-ASPHALT-MIXTURE-PERFORMANCE.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Kamilla-Vasconcelos/publication/265104310_INVESTIGATING_ASPECTS_OF_AGGREGATE_PROPERTIES_THAT_INFLUENCE ASPHALT MIXTURE PERFORMANCE/links/55d3059108ae7fb244f577e7/INVESTIGATING-ASPECTS-OF-AGGREGATE-PROPERTIES-THAT-INFLUENCE-ASPHALT-MIXTURE-PERFORMANCE.pdf)>. Acesso em: setembro de 2021.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA. **Plano Nacional de Logística Integrada - PNLI (2015 - 2035)**. EPL - Empresa de Planejamento e Logística S.A. Brasília, DF: novembro de 2016. Disponível em: <<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/camaras-setoriais-tematicas/documentos/camaras-tematicas/infraestrutura-e-logistica/anos-anteriores/plano-nacional-de-logistica-integrada-pnli-51.pdf>>. Acesso em: julho de 2021.

MONISMITH, C. L. **Influence of shape, size and surface texture on the stiffness and fatigue response of asphalt mixes**. Technical Report 109, Transportation Research Record, National Research Council; 1970. Disponível em: <<https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/sr/sr109/109-002.pdf>>. Acesso em: julho de 2021.

MORENO, F; RUBIO, M. C. Effect of aggregate nature on the fatigue-cracking behavior of asphalt mixes. **Materials & Design**, Volume 47, May 2013, Pages 61-67. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0261306912008771?via%3Dihub>>. Acesso em: setembro de 2021.

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 fíleres melhoradores de adesividade**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós- Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). Vitória/ES, 2020. 152f. Disponível em: <[https://anpet.org.br/anais/documentos/2019/Infraestrutura/Materiais%20e%20Tecnologias%20Ambientais%20I/2\\_275\\_AC.pdf](https://anpet.org.br/anais/documentos/2019/Infraestrutura/Materiais%20e%20Tecnologias%20Ambientais%20I/2_275_AC.pdf)>. Acesso em: setembro de 2021.

NEJAD, F. M. [et al.]. Influence of using nonmaterial to reduce the moisture susceptibility of hot mix asphalt. **Construction and Building Materials**, Volume 31, June 2012, Pages 384-388. Acesso em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095006181200027X?via%3Dihub>>.

Acesso em: agosto de 2021.

NEPOMUCENO, D. V. **Avaliação em campo de estrutura de pavimento incorporando solo estabilizado com coproduto de aciaria KR sujeita à carregamento com simulador HVS e comparação com previsões de desempenho segundo o novo método brasileiro de dimensionamento MEDINA**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). Vitória, ES, 2019. 188f. Disponível em: <[https://repositorio.ufes.br/bitstream/10/11269/1/tese\\_13411\\_DISSERTA%C3%87%C3%83O%20DAIANA%20VALT%20NEPOMUCENO.pdf](https://repositorio.ufes.br/bitstream/10/11269/1/tese_13411_DISSERTA%C3%87%C3%83O%20DAIANA%20VALT%20NEPOMUCENO.pdf)>. Acesso em: setembro de 2021.

NG, A. K. Y. [et al.]. Determination of the binder content of fine aggregate matrices prepared with modified binders. **Journal of Materials in Civil Engineering**. v. 30, n. 4, 2018. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/323228382\\_Determination\\_of\\_the\\_Binder\\_Content\\_of\\_Fine\\_Aggregate\\_Matrices\\_Prepared\\_with\\_Modified\\_Binders](https://www.researchgate.net/publication/323228382_Determination_of_the_Binder_Content_of_Fine_Aggregate_Matrices_Prepared_with_Modified_Binders)>. Acesso em: julho de 2021.

NG, A. K. Y. **Evaluation of the fatigue damage behavior of fine aggregate matrices prepared with modified asphalt binders**. Tese (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. 196 p. Disponível em: <[https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18143/tde-03012018-122026/publico/Dissertation\\_Andressa\\_Ng.pdf](https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18143/tde-03012018-122026/publico/Dissertation_Andressa_Ng.pdf)>. Acesso em: agosto de 2021.

NINGAPPA, A.; SURESHA, S. N. Laboratory evaluation of long-term aging effect on linear viscoelastic and fatigue properties of FAM mixtures. **Construction and Building Materials**, Volume 241, 30 April 2020, 118087. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061820300921?via%3Dihub>>. Acesso em: setembro de 2021.

OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. **Geologia de Engenharia**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia. São Paulo, 1998. 589p.

OLIVEIRA, I. C. S. **Utilização do rejeito de minério de ferro em substituição ao agregado mineral fino em misturas asfálticas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo (EESC/USP). São Carlos, SP, 2020. 111f. Disponível em: <<http://www.saocarlos.usp.br/m-utilizacao-do-rejeito-de-minerio-de-ferro-em-substituicao-ao-agregado-mineral-fino-em-misturas-asfalticas/>>. Acesso em: julho de 2021.

ONOFRE, F. C. [et al.]. Correlação entre variáveis de densificação do compactador giratório e resistência à deformação permanente de misturas asfálticas convencionais e com resíduos. **Revista Transportes**, v. 19, p. 13–22, 2011. Disponível em: <<https://revistatransportes.org.br/anpet/article/view/350>>. Acesso em: setembro de 2021.

ÖZGAN, E.; SERIN, S.; KAP, T. Multi-faceted investigation into the effects of hot-mix asphalt parameters on Marshall Stability. **Construction and Building Materials**, Volume 40, March 2013, Pages 419-425. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061812008100>>. Acesso em:

setembro de 2021.

PACKHAM, D. E. Surface energy, surface topography and adhesion. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 23, n. 6, p. 437–448, 2003. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S014374960300068X>>. Acesso em: junho de 2021.

PASANDÍN, A. R., PÉREZ, I. The influence of the mineral filler on the adhesion between aggregates and bitumen. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, Volume 58, April 2015, Pages 53-58, Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0143749615000068>>. Acesso em: setembro de 2021.

PRESS, F. [et al.]. **Para Entender a Terra**. 4ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

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. Disponível em: <[http://antigo.mme.gov.br/documents/36108/448620/P22\\_RT30\\_Perfil\\_de\\_brita\\_para\\_construcao\\_civil.pdf/0b657545-498a-46ee-b836-a974026d435a?version=1.0](http://antigo.mme.gov.br/documents/36108/448620/P22_RT30_Perfil_de_brita_para_construcao_civil.pdf/0b657545-498a-46ee-b836-a974026d435a?version=1.0)>. Acesso em: setembro de 2021.

RODRIGUES, J. A. **Crack modeling of asphalt mixtures using nonlinear viscoelastic cohesive zone (NVCZ) to assess the influence of different fillers in the materials fracture resistance**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). Vitória. ES, 2018. 96f. Disponível em: <<http://repositorio.ufes.br/handle/10/10694>>. Acesso em: setembro de 2021.

SAKANLOU, F. [et al.]. Investigating the effect of filler types on thermodynamic parameters and their relationship with moisture sensitivity of asphalt mixes. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 51, n. 2, p. 1–16, 2018. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1617/s11527-018-1166-3>>. Acesso em: agosto de 2021.

SCHAPERLY, R. A. Correspondence principles and a generalized J integral for large deformation and fracture analysis of viscoelastic media. **International Journal of Fracture**, v. 25, n. 3, p. 195–223, 1984. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/bf01140837>>. Acesso em: setembro de 2021.

SCHÖN, J. H. **Physical Properties of Rocks Fundamentals and Principles of Petrophysics**. 2. ed. Oxford: Elsevier B.V, 2015.

SCHUMACHER, A. G. **Avaliação dos efeitos da expansão de agregados siderúrgicos nas características do material e no desempenho de misturas asfálticas**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). Vitória. ES, 2018. 94f. Disponível em: <[https://repositorio.ufes.br/bitstream/10/10687/1/tese\\_12503\\_AECIO%20GUILHERME%20SCHUMACHER.pdf](https://repositorio.ufes.br/bitstream/10/10687/1/tese_12503_AECIO%20GUILHERME%20SCHUMACHER.pdf)>. Acesso em: julho de 2021.

SCHWAB, K. The Global Competitiveness Report 2019. In: World Economic Forum – Committed to Improving the State of the World. **Anais...** 2019. Disponível em:

<[http://www3.weforum.org/docs/WEF\\_TheGlobalCompetitivenessReport2019.pdf](http://www3.weforum.org/docs/WEF_TheGlobalCompetitivenessReport2019.pdf)>. Acesso em: julho de 2021.

SOUSA, P. [et al.]. 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. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061812008744>>. Acesso em: junho de 2021.

SOUSA, P. C. **Automated protocol for analysis of dynamics mechanical analyzer data from fine aggregate asphalt mixes**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Texas A&M University, 2010, 89f. Disponível em: <<https://tdl-ir.tdl.org/handle/1969.1/ETD-TAMU-2010-08-8463>>. Acesso em: setembro de 2021.

SOUZA, L. T.; KIM, Y-R.; SOUZA, F. V.; CASTRO, L. S. Experimental Testing and Finite-Element Modeling to Evaluate the Effects of Aggregate Angularity on Bituminous Mixture Performance. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 24, n. March, p. 249–258, 2012. Disponível em: <<https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29MT.1943-5533.0000386>>. Acesso em: setembro de 2021.

TERREL, R. L., AL-SWAILMI, S. **Water sensitivity of asphalt-aggregate mixes: Test selection**. SHRPA-403, strategic highway research program. Washington, DC: National Research Council, 1994. Disponível em: <<https://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/shrp/SHRP-A-403.pdf>>. Acesso em: agosto de 2021.

THEODORO, S. H. **Cartilha da Rochagem**. Brasília: Gráfica e Editora Ideal, 2011. 2a edição revisada (online), 2020. Disponível em: <[https://sgbeduca.cprm.gov.br/media/adultos/cartilha\\_rochagem.pdf](https://sgbeduca.cprm.gov.br/media/adultos/cartilha_rochagem.pdf)>. Acesso em: setembro de 2021.

TOPAL, A.; SENGOZ, B. Determination of fine aggregate angularity in relation with the resistance to rutting of hot-mix asphalt. **Construction and Building Materials**, Volume 19, Issue 2, March 2005, Pages 155-163. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061804000960>>. Acesso em: agosto de 2021.

UNDERWOOD, B. S.; BAEK, C.; KIM, Y. R. Simplified Viscoelastic Continuum Damage Model as Platform for Asphalt Concrete Fatigue Analysis. **Sage Journals**, 2012. Disponível em: <<https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.3141/2296-04>>. Acesso em: julho de 2021.

UNDERWOOD, B. S.; KIM, Y. R. Effect of volumetric factors on the mechanical behavior of asphalt fine aggregate matrix and the relationship to asphalt mixture properties. **Construction and Building Materials**, Vol. 49, pp. 672-681, 2013. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061813007757>>. Acesso em: julho de 2021.

VALDES-VIDAL, G. [et al.]. Effect of aggregate type on the fatigue durability of asphalt mixtures. **Construction and Building Materials**, Volume 224, 10 November 2019, Pages 124-131. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061819317374>>. Acesso em:

agosto de 2021.

VALDÉZ-VIDAL, G. [et al.]. Mechanical behavior of asphalt mixtures with different aggregate type. **Construction and Building Materials**, Volume 101, Part 1, 30 December 2015, Pages 474-481. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061815304724?via%3Dihub>>. Acesso em: agosto de 2021.

VASCONCELOS, K. L. [et al.]. Influence of reduced production temperatures on the adhesive properties of aggregates and laboratory performance of fine aggregate – asphalt mixtures. **Road Materials and Pavement Design**, v. 11, n. 1, p. 47-64, 2010. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/254314357\\_Influence\\_of\\_Reduced\\_Production\\_Temperatures\\_on\\_the\\_Adhesive\\_Properties\\_of\\_Aggregates\\_and\\_Laboratory\\_Performance\\_of\\_Fine\\_Aggregate-Asphalt\\_Mixtures](https://www.researchgate.net/publication/254314357_Influence_of_Reduced_Production_Temperatures_on_the_Adhesive_Properties_of_Aggregates_and_Laboratory_Performance_of_Fine_Aggregate-Asphalt_Mixtures)>. Acesso em: agosto de 2021.

XU, W. [et al.]. Experimental Evaluation of the Influence of Aggregate Strength on the Flexural Cracking Behavior of Epoxy Asphalt Mixtures. **Materials**, 2020, 13, 1876. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1944/13/8/1876>>. Acesso em: agosto de 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. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143749615000913>>. Acesso em: setembro de 2021.

ZOLLINGER, C. J. **Application of Surface Energy Measurements to Evaluate Moisture Susceptibility of Asphalt and Aggregates**. Dissertação (Mestrado), Texas A&M University. College Station, TX. 2005. Disponível em: <<https://oaktrust.library.tamu.edu/handle/1969.1/2320>>. Acesso em: agosto de 2021.