



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA CIVIL

ESTUDO DE DOSAGENS DE MATRIZ DE AGREGADO FINO

LUAN TALLEES VIEIRA LIMA

Orientador: Prof. M.Sc. Paulo Germano Tavares Marinho Filho

Campina Grande – PB

Dezembro de 2018

ESTUDO DE DOSAGENS DE MATRIZ DE AGREGADO FINO

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Campina Grande – PB

Dezembro de 2018

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA CIVIL**

LUAN TALLES VIEIRA LIMA

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade Federal de
Campina Grande como requisito para
obtenção do grau de bacharel em
Engenharia Civil.

Área de concentração: Geotecnia.

Orientador: Paulo Germano Tavares Marinho Filho

Co-orientador: Marco Aurélio de Teixeira e Lima

Campina Grande – PB

Dezembro de 2018

FOLHA DE APROVAÇÃO

Autor: **LUAN TALLES VIEIRA LIMA**

Título: **ESTUDO DE DOSAGENS DE MATRIZ DE AGREGADO FINO**

Trabalho de Conclusão defendido em:

Pela Banca Examinadora:

Prof. M.Sc. (Orientador) Paulo Germano Tavares Marinho Filho
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

Prof. (Co-orientador) Marco Aurélio de Teixeira e Lima
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

Profª. D.Sc. (Examinador Interno) Lêda Christiane de Figueirêdo Lopes Lucena
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

M.Sc. (Examinador Externo) Jonny Dantas Patrício
Universidade Federal de Pernambuco– UFPE

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família, por sua capacidade de acreditar em mim e que, com muito carinho e apoio, não mediram esforços para me ajudar a chegar até esta etapa.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Gean e Wanderlúcia, por tanto amor e confiança que depositam em mim.

Ao meu orientador, Paulo Marinho, e meu co-orientador, Marco Aurélio, pela orientação, paciência e dedicação.

À professora Lêda pelo auxílio no desenvolvimento desta pesquisa.

Àqueles que ajudaram nos experimentos, Breno, Ingridy e Lucas, pelo esforço.

Aos operadores do CGS, Jonny e Daniel, pela compactação dos corpos de prova.

Aos integrantes do Laboratório de Engenharia de Pavimentos, em especial aos técnicos Jadilson e Ildinho, pelo auxílio e ensino.

Às empresas que forneceram o material para esta pesquisa.

A todos os amigos que ganhei durante a graduação e vou levar para a vida.

E a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado!

RESUMO

O dano por fadiga é um dos principais problemas encontrados nos pavimentos asfálticos, sendo diretamente influenciado pelo carregamento dinâmico e pela constante mudança nas condições climáticas às quais a mistura asfáltica está submetida. Este problema é relacionado a fenômenos de pequena escala e são afetados pelo teor de ligante, pelas características dos agregados e pelas propriedades da interface de ligante-agregado. Esta pesquisa estudou os métodos de dosagem de matriz de agregados finos (MAF) propostos por Kim, Castelo Branco, Karki e Coutinho, definindo um método que melhor estime o teor de ligante que está presente na parte fina de uma mistura asfáltica convencional. Como conclusão, foi verificado que todos os métodos estimaram teores de ligante distintos e foi possível comprovar que alguns deles possuem deficiência na consideração das propriedades dos materiais utilizados.

Palavras-chave: Mistura Asfáltica, Matriz de Agregados Finos, Estudo de Dosagem.

ABSTRACT

Fatigue damage is one of the main problems found in asphalt pavements, being directly influenced by the dynamic loading and the constant change in the climatic conditions to which the asphalt mixture is subjected. This problem is related to small-scale phenomena and is affected by the binder content, the characteristics of the aggregates and the properties of the binder-aggregate interface. This study investigated the fine aggregate matrix (FAM) design methods proposed by Kim, Castelo Branco, Karki and Coutinho, defining a method that best estimates the binder content that is present in the thin part of a conventional asphalt mixture. As a conclusion, it was verified that all the methods estimated different binder contents and it was possible to prove that some of them are deficient in the consideration of the properties of the materials used.

Keywords: Asphalt Mixture, Fine Aggregates Matrix, Design Study

Lista de Figuras

Figura 1: Plotagem de módulo dinâmico não-linear normalizado e ângulo de fase versus número de ciclos de carregamento em testes de fadiga.....	6
Figura 2: Ilustração do princípio em que se baseia o método de Karki (2010).....	12
Figura 3: Rotarex elétrico.....	13
Figura 4: Ilustração do procedimento de determinação do teor de ligante na MAF	14
Figura 5: Esquema representativo e molde para compactação das amostras de MAFs utilizados por Kim et al. (2003)	15
Figura 6: Produção de amostras de MAFs	16
Figura 7: Distribuição granulométrica dos agregados para a MAC e sua MAF	20
Figura 8: Aparelhagem para o Rice Test.....	25
Figura 9: Curvas granulométricas das amostras analisadas	29

Lista de Tabelas

Tabela 1: Características do CAP 50/70	17
Tabela 2: Propriedades dos agregados utilizados em estudo	17
Tabela 3: Granulometria da mistura completa	18
Tabela 4: Parâmetros de dosagem	19
Tabela 5: Granulometria da MAC e da MAF	19
Tabela 6: Proporção em massa da MAF	20
Tabela 7: Dosagem segundo Kim (2003)	21
Tabela 8: Dosagem segundo Castelo Branco (2008)	22
Tabela 9: Dosagem segundo Karki (2010)	23
Tabela 10: Dosagem segundo Coutinho (2012)	24
Tabela 11: Dosagem das amostras para o Rice Test	24
Tabela 12: Dosagem do primeiro corpo compactado	25
Tabela 13: Propriedades dos agregados para comparação	28
Tabela 14: Características do CAP para comparação	28
Tabela 15: Parâmetros utilizados nas dosagens das MAFs	29
Tabela 16: Resultados dos teores de ligante nas MAFs usando diferentes métodos	30

Sumário

1.	INTRODUÇÃO	1
1.1.	Objetivo.....	1
1.2.	Justificativa	1
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	2
2.1.	Matriz de agregados finos (MAF).....	2
2.2.	Mecanismos de danos de fadiga nas misturas de concreto de asfalto	3
2.3.	Teoria viscoelástica de dano contínuo – VECD.....	8
2.3.1.	Propriedades reológicas.....	9
2.4.	Dosagem das matrizes de agregados finos (MAFs)	10
2.4.1.	Método proposto por Kim et al. (2003).....	11
2.4.2.	Método proposto por Castelo Branco (2008)	11
2.4.3.	Método proposto por Karki (2010)	11
2.4.4.	Método proposto por Coutinho (2012).....	12
2.5.	Moldagem e extração dos corpos de prova	14
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	17
3.1.	Cimento asfáltico de petróleo (CAP)	17
3.2.	Agregados	17
3.3.	Granulometria da mistura asfáltica completa (MAC).....	18
3.4.	Dosagem da mistura asfáltica completa (MAC)	18
3.5.	Definição da curva granulométrica da MAF	19
3.6.	Execução dos métodos de dosagem das MAFs.....	20
3.6.1.	Dosagem pelo método de Kim (2003)	20
3.6.2.	Dosagem pelo método de Castelo Branco (2008)	21
3.6.3.	Dosagem pelo método de Karki (2010)	22
3.6.4.	Dosagem pelo método de Coutinho (2012).....	23
3.7.	Moldagem e extração dos corpos de prova	24
4.	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	28
5.	CONCLUSÃO	31
5.1.	Sugestões para pesquisas futuras.....	31
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	32

1. INTRODUÇÃO

Apesar da grande extensão da malha rodoviária brasileira, apenas 40,3% das rodovias pavimentadas são classificadas como ótimas, e 50,0% encontram-se com o pavimento considerado como regular, ruim ou péssimo (CNT, 2017). Segundo Lavasani, Namin e Fartash (2015), tal classificação é devida à deterioração do revestimento, a camada responsável pela transferência de cargas de roda para camadas inferiores.

Um dos mecanismos de deterioração mais encontrados nas rodovias é o trincamento das misturas asfálticas devido ao dano por fadiga (HUANG, ZHANG e KINGER, 2004). Os esforços repetidos de compressão vertical oriundos do tráfego pesado mobilizam esforços de flexão na camada de revestimento, fazendo com que, ao longo do tempo, microtrincas se desenvolvam (BALDO, 2007). Esse fenômeno pode levar à ruptura completa do material que compõe a camada de revestimento do pavimento.

A dosagem de uma mistura asfáltica tem consistido até hoje na escolha, por meio de procedimentos experimentais, de um teor dito ‘ótimo’ de ligante, a partir de uma faixa granulométrica predefinida (BERNUCCI et al., 2006). Porém, baseado no conhecimento de que o processo de trincamento nas misturas asfálticas se inicia nas discontinuidades do material, como em microrrachaduras na interface entre o ligante e o agregado (Kim,, Little e Lytton, 2003a), começaram a usar a escala MAF (matriz de agregados finos) na dosagem para estimar o comportamento mecânico das misturas convencionais.

Os achados dos estudos que correlacionam os resultados dos testes executados em amostras MAF com aqueles realizados em amostras de misturas completas indicam que a escala MAF pode prover informação suficiente para presumir o comportamento da mistura completa (NABIZEDEH, 2015; FREIRE et al., 2017).

1.1. Objetivo

Este trabalho tem como objetivo estudar os métodos de dosagem de uma mistura asfáltica de agregado fino propostos por Kim (2003), Castelo Branco (2008), Karki (2011) e Coutinho (2012), definindo um método que melhor estime o teor de ligante que está presente na parte fina de uma mistura asfáltica convencional.

1.2. Justificativa

Como vantagem em relação ao uso de misturas de asfalto a quente completa, a MAF apresenta uma estrutura interna que é mais homogênea e fornece uma caracterização mais realista da resposta à fadiga de misturas asfálticas completa do que o fornecido pelos testes realizados sobre o mástique. Outro benefício de utilizar amostras de MAF em testes de fadiga é que o tamanho reduzido das amostras requer uma menor quantidade de material em comparação com a quantidade necessária para produzir amostras de misturas asfálticas completas, exigindo um trabalho de laboratório reduzido para preparar as amostras.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Matriz de agregados finos (MAF)

O mecanismo de fissuras por fadiga em pavimentos de asfalto começa a partir de fissuras microscópicas que ocorrem em descontinuidades do material. Tais microfissuras são seguidas pelo processo de propagação de rachadura, levando à formação de macro rachaduras, até uma completa degradação do material. Uma previsão precisa do comportamento da fadiga em misturas asfálticas tem sido a meta de muitos estudos, a fim de melhorar o projeto de misturas de asfalto e, conseqüentemente, o desempenho de pavimentos flexíveis. Estudos sobre a resposta de misturas asfálticas à fadiga são divididos em duas categorias: (i) a mistura de asfalto completa, que contém o ligante asfáltico, agregados graúdos, agregados finos e fillers minerais; e (ii) a matriz de agregados finos (MAF), composta por parte dos finos agregados, fillers minerais e ligante asfáltico.

As mudanças da microestrutura da material são o início do processo de fadiga, e essas mudanças são influenciadas substancialmente por propriedades do mástique (combinação de ligante, o filler e o ar aprisionado), uma vez que estas mudanças ocorrem por meio de microfissuras adesivas (rachaduras entre agregado e ligante) e microrrachaduras coesivas (fissuras no ligante) (Kim & Little, 2005). Com base nesta premissa, Kim, Little e Lytton (2003a) e Kim, Little e Song (2003b) começaram a estudar o comportamento de fadiga de misturas asfálticas utilizando a dosagem MAF.

Em estudos com misturas de MAF, a primeira suposição é que elas reproduzem a estrutura interna da porção fina da graduação dos agregados de uma mistura de asfalto a quente completa. Outra suposição é que as interações físico-químicas entre agregado e ligante são replicadas na amostra MAF. A fim de separar graduação fina dos agregados, pesquisadores nos Estados Unidos têm usado agregados que passam na peneira #16 (1,18 mm), que faz parte da série peneira da norma americana para misturas asfálticas a quente (Aragão et al. 2014; Arambula, Masad, Epps-Martin, 2007; Arega et al., 2013; Bhasin et al., 2008; Caro et al., 2008; Caro et al., 2010; Caro et al., 2012; Castelo Branco, 2008; Castelo Branco et al., 2008; Cravo, 2016; Cucalon et al., 2017; Gudipudi & Underwood, 2015; Haghshenas et al., 2016; Im et al., 2015; Izadi, 2012; Kim & Aragón, 2013; Kanaan et al., 2014; Karki et al., 2015a,b; Karki et al., 2016; Masad et al., 2006; Masad et al., 2008; Nabizadeh, 2015; Palvadi, 2011; Palvadi et al., 2012; Souza et al., 2012; Tong et al., 2013; Tong et al., 2015; Vasconcelos et al., 2010; Vasconcelos et al., 2011; Zollinger, 2005).

Alguns pesquisadores adotaram diferentes tamanhos de agregados máximos nominais (NMA) para produzir amostras de MAF. Em um estudo conduzido por Aragón et al. (2010), um processo de tratamento por imagem foi utilizado para capturar imagens digitais da mistura. As partículas menores que 0,30 mm foram consideradas como a fase de matriz de agregados finos porque a parte da graduação do agregado mais fina do que 0,30 mm não foi capturada distintamente pelo processamento digital de imagem. Os agregados passando peneira #50 (0,30 mm) foram adotados para caracterizar a microestrutura do MAF por meio de imagens de raio-x e para caracterizar as propriedades viscoelásticas da MAF (Aragão et al.,

2010). Motamed, Bhasin e Izadi (2012) utilizaram grânulos de vidro com MNS de 1,00 mm (#18), 0,5 mm (#35) e 0,1 mm (#140) para avaliar as propriedades do ligante sem a interação com o agregado mineral.

Underwood e Kim (2013) investigaram o efeito de diferente NMAs na microestrutura da MAF por meio da realização de testes com amostras de MAF, produzidas com partículas de agregados passando na peneira #8 (2,36 mm), #16 (1,18 mm) e #30 (0,06 mm). Underwood e Kim (2011) justificam o uso de partículas de agregados passando a peneira #8. Segundo eles, o espaço vazio criado pelo contato das três partículas nominalmente maiores no arranjo mais ideal é o diâmetro total ideal para uma peneira de controle primário. Para misturas com um NMAS de 9,5 e 12,5 mm, esta dimensão é aproximadamente 2,36 mm, e o material da MAF deve ser fabricado com partículas de agregados menores que 2,36 mm

Uma série de estudos investigando as propriedades de fadiga (Underwood e Kim, 2011; Gong et al., 2016; He et al., 2016; Zhu et al., 2017) e rigidez de fluência de misturas asfálticas utilizaram MAFs produzidos com NMAS de 2,36 mm (#8). Agregado em partículas menores que 1,18 mm (#16) para produzir amostras de MAF foi considerado um tamanho não-prático, devido à grande quantidade de material que precisa ser separado e descartado para preparar as amostras (He et al., 2016; Zhu et al., 2017).

No Brasil, a peneira #16 (1,18 mm) não é parte da série de normas brasileiras de peneiras para misturas de asfalto a quente e por causa disso as MAFs são produzidas com agregado partículas passando na peneira #10 (2,00 mm) (Coutinho, 2012; Pazos, Sacramento & Motta, 2015). Freire et al. (2014), Freire (2015) e Freire et al. (2017) investigaram a influência de NMAS diferentes, ou seja, #16 (1,18 mm), #10 (2,00 mm) e #5 (4,00 mm), nas propriedades de fadiga de MAFs. O NMA de #10 (2,00 mm) foi considerado adequado, porque as curvas de fadiga das MAFs apresentaram inclinação semelhante às curvas para a mistura de asfalto a quente. Outro motivo para adotar a peneira #10 é a relação entre o tamanho de agregação e diâmetro de amostra de 1:6, que é maior do que o mínimo de 1:3 recomendado por Kim et al. (2004).

2.2. Mecanismos de danos de fadiga nas misturas de concreto de asfalto

Kim et al. (2003a) avaliaram a fadiga e o processo de cicatrização de trincas em misturas asfálticas por meio da realização de testes da análise mecânica dinâmica (DMA) usando amostras de MAF produzidas com areia-asfalto. As amostras de areia-asfalto foram fabricadas com partículas de agregados minerais inferiores 1,18 mm (#10) e com um teor de ligante de 8%. O teor de asfalto era um valor arbitrário selecionado para produzir uma "espessura de película" de cerca de 10 microns. A mistura foi compactada em um molde específico para produzir uma amostra cilíndrica com 50 mm de comprimento e 12 mm de diâmetro. Os resultados indicaram que a introdução de períodos de repouso aumentou a vida de fadiga para as condições analisadas. Os pesquisadores sugeriram que o método de teste pode resultar em um método de teste tipo-específico para a caracterização de misturas de asfalto por causa de sua eficiência, reprodutibilidade e confiabilidade.

Kim et al. (2003b) avaliaram o efeito de fillers minerais sobre a resistência à fadiga de misturas asfálticas, composto com dois ligantes de asfalto (AAD-1 e AAM-1) e dois fillers (calcário e cal hidratado), utilizando o mesmo procedimento usado por Kim et al. (2003a). As amostras de areia-asfalto cilíndricas foram testadas sob tensões controladas de torção, e, para tal modalidade de carregamento, os resultados indicaram que os enchimentos contribuíram para aumentar a vida de fadiga, especialmente para a mistura contendo Cal hidratado e asfalto AAD-1. Tal mistura apresentou uma maior melhoria na vida de fadiga, indicando que a interação físico-química entre o ligante e enchimento depende do tipo de material.

Devido ao desenvolvimento bem sucedido do método teste para MAFs, Kim e Little (2005) propuseram um protocolo para avaliar o impacto de agregados finos e fillers minerais sobre danos de fadiga, realizando ensaios mecânicos dinâmicos usando o analisador mecânico dinâmico (DMA). Ensaios dinâmicos foram realizados sob tensões controladas de carregamento em duas etapas: 1) níveis de baixa tensão para validação do comportamento viscoelástico linear; 2) níveis de alta tensão para simulação de dano de fadiga. O protocolo desenvolvido durante o estudo foi considerado eficaz para fornecer dados aceitáveis para caracterizar o comportamento de fadiga dos materiais avaliados.

Estudos sobre o comportamento de fadiga, danos por umidade e características de cicatrização de trincas de misturas asfálticas por meio da realização de testes em amostras de MAF utilizando o DMA tem avançado, principalmente devido aos esforços dos pesquisadores da Texas A&M University (Zollinger, 2005; Masad et al., 2006; Bhasin, 2006; Arambula, Masad & Epps-Martin, 2007; Masad et al., 2008; Caro et al., 2008; Castelo Branco, 2008; Vasconcelos, Bhasin & Little, 2010; Vasconcelos et al., 2011). Uma importante contribuição apresentada por este grupo de pesquisa refere-se ao método de compactação das amostras MAF. As amostras fabricadas pela compactação da mistura solta em um molde cilíndrico, apresenta, segundo (Kim et al., 2003a; Song, 2004) maiores vazios preenchidos por ar no topo das amostras, conforme relatado por Zollinger (2005), o que poderia resultar em rachaduras nas bordas da amostra. Um novo procedimento para produzir amostras de MAF foi desenvolvido pelo autor Zollinger (2005), a fim de superar esse problema. O método consiste das seguintes etapas:

- a) compactar a mistura solta, utilizando o compactador giratório Superpave, produzindo amostras de 85 mm de altura, 152 mm de diâmetro e índice de vazios de 11%;
- b) aparar as partes superior e inferior da amostra, por meio da redução da altura para 50 mm;
- c) extrair amostras cilíndricas de 50 mm de altura e 12,5 mm de diâmetro.

As susceptibilidades aos danos por umidade da ligação adesiva entre agregados e asfalto e da resistência coesiva do ligante foram avaliadas por Zollinger (2005) e Masad et al. (2006), com o objetivo de determinar os procedimentos a serem usados para selecionar as combinações de agregados e ligantes que podem reduzir tais susceptibilidades. Uma combinação problemática de agregados e ligantes pode ser identificada por meio da relação entre a energia de ligação adesiva sob condições secas para a energia de ligação adesiva sob

condições úmidas, $\Delta G_a(w)/\Delta G_a(D)$ e uma razão de molhado/seco inferior a 0,8 foi definido para separar as boas combinações de materiais das insatisfatórias.

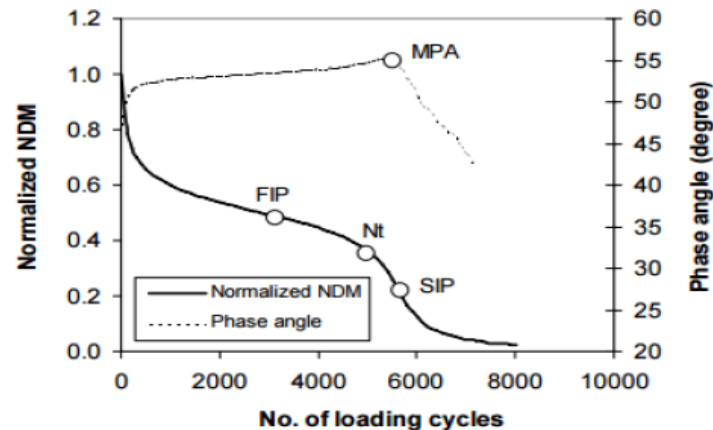
Uma vez que os danos da umidade em misturas asfálticas causam uma redução na vida de fadiga, N_f , esses danos podem ser avaliados por meio da realização de ensaios de fadiga conforme (Zollinger, 2005). Foram analisadas amostras de MAF em condições secas e molhadas e outro parâmetro para a avaliação de danos por umidade, definido como a razão do número de ciclos de falha sob condição molhada para seca, $N_f(W)/N_f(D)$. Para esse parâmetro, as conclusões indicaram que quanto maior a proporção de molhado/seco, melhores são os resultados das misturas. A relação entre o módulo de cisalhamento na falha e o módulo de cisalhamento inicial, G'/G , capta a quantidade do módulo dinâmico de mástique que pode diminuir enquanto continua acumulando danos. As misturas avaliadas com boa resistência a danos por umidade apresentaram menores razões para G'/G na falha do que as misturas com resistência baixa. As conclusões do estudo também indicaram que um valor fixo de 50% de redução na rigidez não representa a falha de fadiga para todos os materiais avaliados (ZOLLINGER, 2005; MASAD et al. 2006).

Em um estudo do impacto da matriz fina de agregados no comportamento de fadiga de misturas asfálticas, Kim e Little (2005) realizaram testes de varredura dinâmica em vários níveis de tensões altas o suficiente para produzir dano. A energia dissipada (área de ciclo de histerese entre deformação e tensão medidas) foi calculada monitorando-se o módulo de perda em cada ciclo de carregamento. Ao analisar o comportamento histerético de tensão-deformação dos testes de fadiga, observou-se que os ciclos de tensão-deformação diminuem quando a energia dissipada é reduzida. Os resultados da acumulação de danos também foram investigados por meio da teoria VECD, e as mudanças na energia de pseudo-tensão dissipada e pseudo-rigidez do ciclo de histerese durante o carregamento indicaram que danos microscópicos ocorreram. A energia de pseudo-tensão acumulada dissipada (CDPSE) foi empregada como um indicador quantitativo para definir a resistência à fadiga. Também avaliaram as mudanças no módulo dinâmico não-linear normalizado devidas à acumulação de danos e observaram dois pontos de inflexão no módulo dinâmico não-linear normalizado versus curva de número de ciclos:

- a) um primeiro ponto de inflexão (FIP), associado às microfissuras e
- b) um segundo ponto de inflexão (SIP), possivelmente associado à macro rachaduras (Figura 1).

Um ponto de transição, N_t , também foi observado entre os dois pontos de inflexão. Estes três pontos (FIP, SIP e N_t) foram considerados como potenciais pontos de falha de fadiga e foram comparados com o critério proposto por Reese (1997), que considera o valor do ângulo de fase máximo (MPA) como um ponto de falha de fadiga razoável. A análise apresentou um erro de desvio mínimo para a comparação entre N_t e MPA, levando os pesquisadores a adotar o N_t como um ponto de falha de fadiga. Os materiais avaliados durante o estudo apresentaram redução de rigidez de 60 a 85 por cento no ponto de falha.

Figura 1: Plotagem de módulo dinâmico não-linear normalizado e ângulo de fase versus número de ciclos de carregamento em testes de fadiga



O critério de fadiga, definido como uma redução de 50 por cento de pseudo-rigidez (Park et al., 1996, Lee; 1996) também foi adotada por Kim e Little (2005), para avaliar a vida de fadiga de misturas investigadas em seu estudo. Para uma determinada mistura, a resposta de fadiga foi calculada para um conjunto de dados representativo do nível de tensão de 0,4 por cento e avaliaram-se diferentes indicadores de falha de fadiga (redução de rigidez; redução de pseudo-rigidez; CDPSE; alterações de energia dissipada; FIP, SIP e Nt). Os resultados indicaram que a proporção de cada indicador para um determinado número de ciclos de carregamento tem uma redução semelhante. Os resultados mostraram que estes três parâmetros de dano são eficazes para caracterizar o dano de fadiga durante o carregamento torcional: (i) um decaimento em pseudo-rigidez; (ii) perda de módulo dinâmico não-linear; (iii) uma mudança na energia de tensão dissipada.

Song (2004) desenvolveu uma metodologia para caracterizar o comportamento de danos em misturas de concreto de asfalto com base em técnicas de imagem não-destrutivas (raios-x e tomografia computadorizada), princípios da mecânica de dano viscoelástico contínuo e princípios da micromecânica. Para o método de análise de imagem digital, um parâmetro de danos (ξ) que quantifica o percentual de rachaduras e vazios em um corpo de prova foi definido. Para a abordagem de mecânica de dano contínuo foram realizados testes DMA em amostras de MAF e calculou-se o parâmetro de dano em cada ciclo de carga (S). Outro parâmetro adotado para quantificar os danos foi a energia de pseudo-tensão dissipada (DPSE) ou WR, que é a área dentro do ciclo de histerese no domínio de deformação e pseudo-tensão. O comportamento de histerese foi obtido por testes de fadiga DMA. Os parâmetros foram comparados e os resultados indicaram boa correlação entre os parâmetros avaliados.

Zollinger (2005) e Masad et al. (2006) sugeriram que o parâmetro DPSE ou WR deve ser calculado como a área do ciclo de histerese dividido pelo volume do material que é capaz de dissipar energia. Além disso, o DPSE ou WR não deve ser calculado com base apenas nas alterações nas propriedades viscoelásticas (WR1), porque o acúmulo de deformação permanente não foi uniforme durante o carregamento. Masad et al. (2008) propuseram um método que pode separar a energia dissipada devido à deformação permanente da energia

viscoelástica. Assumiram, então, que o processo de danos, matematicamente, consiste em três componentes:

- a) um componente que está associado com um aumento do ângulo de fase entre os ciclos de carregamento (WR1),
- b) um componente que considera as mudanças no ângulo de fase para o mesmo ciclo de carga devido à deformação permanente (WR2),
- c) um componente que considera as mudanças na pseudo-rigidez do material antes e depois de danos (WR3).

Uma partição adequada da energia entre a não-linearidade e o dano permite unificar os resultados dos modos de carga controlada e de tensão controlada, e as proporções de WR1 e WR3 são as mesmas quando os resultados de ambos os modos de carregamento são unificados. Assim, dois novos parâmetros para caracterizar o dano de fadiga foram propostos: o raio de rachadura projetada em um número fixo de ciclos ($\Delta R(N_f)$) e a relação de $\Delta R(N_f)$ para $\ln(N)$.

Castelo Branco et al. (2008) e Castelo Branco (2008) aplicaram esse método para investigar o fissuramento por fadiga de misturas asfálticas sob diferentes níveis de tensão e deformação. Os valores para o índice de crescimento de fissura são semelhantes para testes realizados em ambos os modos de carregamento: modo de deformação controlada ou tensão controlada. A susceptibilidade de umidade de misturas asfálticas pode ser avaliada com base na relação $\Delta R(N_f)(\text{úmida})/\Delta R(N_f)(\text{seca})$, por meio da realização de testes em amostras úmidas e secas (Caro et al., 2008).

Um método de teste de tensão direta repetida (RDT) para identificar o crescimento de trinca por fadiga causada pela umidade em pavimentos flexíveis foi desenvolvido por Tong, Luo e Lytton (2013). O novo procedimento de teste e análise dos dados foram baseados na teoria da equivalência de energia da pseudo-tensão, a fim de caracterizar o crescimento de trinca por fadiga de amostras de MAF que foram condicionadas a diferentes níveis de umidade relativa (RH). A propagação da fissura no estágio terciário (diminuição da magnitude do módulo e aumento do ângulo de fase à medida que os ciclos de carga aumentaram) dos ensaios de RDT foi analisada e as propriedades de fadiga das amostras foram determinadas de acordo com os princípios de equivalência de energia de deformação, que afirma que a energia de tensão dissipada e a energia de tensão recuperável no corpo de prova de mistura asfáltica são equivalentes às suas contrapartes no material não danificado. A nova metodologia de teste do RDT foi considerada mais eficiente do que os testes de torção, porque a complexidade do estado de tensão dentro dos corpos de prova é bastante reduzida.

Tong et al. (2013) e Tong, Luo e Lytton (2015) utilizaram o método de teste RDT para avaliar o efeito de umidade e danos causados pelo envelhecimento em misturas de asfalto. Amostras condicionadas à umidade e envelhecidas foram testadas e a evolução do crescimento de fissura foi analisada. Os resultados indicaram que a pressão de vapor saturada na maioria das amostras aumenta significativamente o fissuramento por fadiga das misturas de asfalto. Observou-se também um aumento na taxa de trinca por fadiga asfáltica após o

envelhecimento, tanto para os asfaltos de misturas mornas como para misturas a quente. Além disso, os resultados das amostras acondicionadas com umidade apresentam um parâmetro maior de fratura, n' , do que para amostras envelhecidas, indicando que as misturas mornas de asfalto são mais suscetíveis à umidade em comparação com as misturas de asfalto a quente.

O mecanismo de cicatrização de trincas tem um efeito significativo no desempenho de misturas de asfalto e uma melhor compreensão desse processo pode fornecer uma melhor previsão do comportamento de fadiga desses materiais. A tecnologia DMA foi utilizada por Bhasin et al. (2008) para investigar as propriedades de cicatrização de seis amostras MAF produzidas com dois tipos de agregados e três tipos de betume. Para quantificar este efeito da MAF, nove períodos de descanso de quatro minutos foram introduzidos durante os testes de ciclo e os dados foram comparados com dados de testes sem períodos de descanso. Cada período de descanso foi introduzido após ciclos que correspondem a 2,5, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40 e 50 por cento da vida de fadiga para uma amostra testada sem períodos de descanso. As propriedades cicatrizantes dos três diferentes betumes foram investigadas por testes realizados no reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR). O efeito desse mecanismo no desempenho das amostras de betume apresentou uma boa correlação com o aumento relativo na vida de fadiga das misturas MAF devido à introdução de períodos de descanso.

2.3. Teoria viscoelástica de dano contínuo – VECD

A vida de fadiga, N_f , das misturas asfálticas é definida como o número de ciclos de carga em que ocorre a falha do material. Li (1999) definiu o critério de falha como um tamanho específico de trinca da amostra. Alguns pesquisadores sugeriram a redução de 50% na rigidez inicial da amostra como o ponto em que ocorre falha por fadiga (Kanaan, Ozer & Al-Qadi, 2014; Arega, Bhasin e de Kesel, 2013). Rowe (1993) e Rowe e Boldin (2000) sugeriram que a falha por fadiga ocorre quando a energia dissipada por ciclo de carga muda. Segundo Reese (1997) uma boa indicação para o critério de falha por fadiga é quando a curva do ângulo de fase versus tempo mostra um pico, seguido por uma rápida diminuição do ângulo de fase. Outra abordagem para caracterizar a vida de fadiga de misturas de asfalto é baseada na teoria de dano contínuo viscoelástico (VECD), onde uma redução de 50% da pseudo-rigidez, C , tem sido considerada um critério razoável de falha de fadiga (PARK, KIM & SCHAPERLY, 1996, LEE, 1996; LEE & KIM, 1998; LEE, DANIEL & KIM, 2000; DANIEL & KIM, 2002; PALVADI, 2011; PALVADI, BHASIN & LITTLE, 2012).

Na mecânica do dano contínuo, as mudanças microestruturais do material são a base da teoria. Um corpo danificado é representado como um contínuo homogêneo e as mudanças microestruturais são quantificadas por variáveis de estado interno, (S) , que refletem o estado de dano do material (SCHAPERLY, 1984). A teoria foi primeiramente desenvolvida para materiais elásticos e posteriormente estendida para dar conta dos danos de materiais viscoelásticos, por princípios de correspondência elástico-viscoelástica, que transformam variáveis físicas em pseudo-variáveis, eliminando efeitos de dependência de tempo (SCHAPERLY, 1990). Um modelo mecanicista de previsão de fadiga baseado no VECD foi desenvolvido por Lee et al. (2000) para o modo de carga controlada, e foi posteriormente adaptado por Daniel e Kim (2002) para várias amplitudes e frequências de deformação cíclica

e diferentes taxas monotônicas. Os resultados dos estudos indicam que uma única curva característica C vs. S descreve as mudanças na integridade do material à medida que o dano cresce, independente das condições de carregamento.

Autores como Palvadi (2011), Palvadi et al. (2012), Karki, Li e Bhasin (2015b) e Karki, Bhasin e Underwood (2016) desenvolveram estudos baseados na teoria do VECD para investigar a vida de fadiga de misturas de asfalto e observaram a similaridade das curvas características (C vs. S) para amostras de uma dada mistura de MAF, para os modos controlados por tensão e deformação em diferentes amplitudes. Palvadi (2011) e Palvadi et al. (2012) também propuseram um protocolo de teste para avaliar os efeitos da cicatrização de trincas no desempenho de misturas asfálticas. A fim de investigar esses efeitos, quatro períodos de descanso (5, 10, 20 e 40 minutos) foram introduzidos durante os testes quando a amostra atingiu certo nível de rigidez (20, 30 e 40 por cento de pseudo-rigidez). Neste método, uma amostra foi necessária para cada nível de rigidez e foi demonstrado que a cicatrização é uma propriedade característica do material e que uma função característica de única deste efeito pode ser obtida para cada material. Os resultados mostraram que tal propriedade medida em níveis mais elevados de dano foi cerca de 10 a 20% menor do que a medida em níveis mais baixos de danos, indicando que uma distribuição de microfissuras em um corpo proporciona uma melhor condição de cicatrização quando comparada a uma distribuição de macro rachaduras.

A caracterização do procedimento de cicatrização de trincas foi melhorada por Karki et al. (2015b) e Karki et al. (2016) para um método de teste que integra os testes de dano e cicatrização e utiliza uma única amostra MAF. O protocolo de amostra única forneceu características semelhantes às obtidas no protocolo anterior de múltiplos corpos de prova, sugerindo que o comportamento de cicatrização em níveis mais altos de dano não é afetado por um histórico de níveis mais baixos de dano. Os autores tornaram-se os primeiros a utilizar a teoria do dano contínuo viscoelástico simplificado (S-VECD) para caracterizar o dano em misturas MAF.

2.3.1. Propriedades reológicas

As mudanças nas propriedades reológicas da MAF foram investigadas por alguns pesquisadores em uma tentativa de entender melhor o efeito do teor de ligante e os vazios de ar no desempenho da mistura (UNDERWOOD & KIM, 2011; UNDERWOOD & KIM, 2013; IZADI, 2012; NABIZADEH, 2015; ZHU et al., 2017). Underwood e Kim (2011) e Underwood e Kim (2013) investigaram a sensibilidade do módulo dinâmico de cisalhamento, $|G^*|$, de mudanças na composição do material por meio da realização de testes em diferentes escalas de material (ligante para mistura total). Verificou-se que o MAF apresenta sensibilidade à composição volumétrica semelhante ao observado para as misturas asfálticas completas, enquanto que o mástico não apresentou sensibilidade de alterações na fração volumétrica do filler, até uma dada fração de enchimento (UNDERWOOD & KIM, 2011).

A composição volumétrica de materiais da MAF afeta a viscoelasticidade linear e as propriedades de tração do material (UNDERWOOD & KIM, 2011; UNDERWOOD & KIM,

2013). As características de fissuramento por fadiga dos corpos de prova MAF foram fortemente influenciadas pelo conteúdo de ligante (IZADI, 2012). Underwood & Kim (2013) investigaram as mudanças nos módulos dinâmicos de cisalhamento, $|G^*|$, e as propriedades de tração (força e deformação na falha) das MAFs, variando o asfalto e o índice de vazios de ar. Os resultados mostraram que, para um aumento de 1% no teor de asfalto, observa-se: (i) uma diminuição de 20 a 35% em $|G^*|$; (ii) uma diminuição de 4 a 6% na força; e (iii) um aumento de 25 a 40% na tolerância de tensão (UNDERWOOD & KIM, 2013). Ainda para os autores, um aumento de um por cento no índice de vazios de ar, observa-se que: (i) o valor de $|G^*|$ diminui 5–8% para a mistura com um tamanho máximo nominal de agregado (NMSA) de 9,5 mm e 10–12% para a mistura com NMSA de 19,0 mm; (ii) a força diminui 10% e (iii) a tolerância de tensão aumenta de 0 a 5%.

Izadi (2012) avaliou a microestrutura interna de diferentes misturas MAF com o objetivo de investigar a influência da graduação e do teor de ligante no desempenho da mistura. Observou-se que as características de fissuração por fadiga das MAFs foram mais relacionadas ao conteúdo de ligantes do que à fração de agregados finos. As características de cicatrização de trincas não foram significativamente diferentes para três MAFs: a mistura controle, a mistura contendo uma porcentagem de finos maior que o valor da mistura controle, e a mistura com uma porcentagem de ligante maior que o valor da mistura controle, indicando que a taxa de cicatrização é principalmente influenciada pelo tipo de aglutinante e não significativamente influenciado pela graduação ou conteúdo de ligante, para uma mesma distribuição volumétrica da mastique.

Absorção e módulo de fluência foram as propriedades analisadas por Gong et al. (2016) com o objetivo de explorar o efeito dos ciclos de congelamento e descongelamento nas propriedades de baixa temperatura de misturas de MAF com granulometria, teor de ligante, nível de giro e temperatura diferentes. O reômetro do feixe de flexão (BBR) foi utilizado para realizar testes em corpos de prova MAF ($127 \times 12,7 \times 6,35$ mm). Os resultados indicaram que as variáveis avaliadas (granulometria de agregados finos, teor ótimo de asfalto e nível de compactação da MAF) podem ser determinadas pela combinação da rigidez de deformação e do valor m com o impacto do ciclo de congelamento-descongelamento. O teste BBR foi considerado como uma ferramenta eficaz para a investigação de propriedades de baixas temperaturas, levando a um melhor controle do potencial de fissuração do MAF dentro do pavimento asfáltico em climas frios.

2.4. Dosagem das matrizes de agregados finos (MAFs)

A seguir estão descritos três métodos de dosagem de MAFs, encontrados na literatura, assim como o método mais atual proposto por Souza et al. (2011) e adaptado por Coutinho (2012). Os materiais apresentados anteriormente foram avaliados por meio desses quatro métodos.

2.4.1. Método proposto por Kim et al. (2003)

O método proposto por Kim et al. (2003) foi o pioneiro no estudo de MAFs. Este se baseia em um percentual fixo de ligante (8% em massa) independente dos materiais que são utilizados (CAP, agregados e material de enchimento). Este valor de 8% de ligante foi selecionado de maneira arbitrária de modo a se tentar obter uma espessura de filme de ligante constante de aproximadamente 10 μ m.

2.4.2. Método proposto por Castelo Branco (2008)

No método de dosagem proposto por Castelo Branco (2008) a percentagem de ligante asfáltico é estimada por meio do cálculo da quantidade de ligante que é necessária para recobrir na totalidade as partículas granulares (agregados graúdos, agregados miúdos e filer). As etapas da dosagem de MAFs, proposta por Castelo Branco (2008), são resumidas abaixo:

- a) obter as informações relativas a MAC (massa da amostra de mistura completa, W_{MAC} , curva granulométrica, percentual de agregados passante na peneira #16 (peneira adotada para separar os agregados graúdos dos agregados miúdos – também conhecida como peneira de corte), %pass#16, teor de ligante, % $P_{b,MAC}$, e massa de ligante, W_b);
- b) identificar a massa, $W_{agg(MAF)}$, de agregados presentes na MAC que passa pela peneira #16 (1,18 mm) e gerar a curva granulométrica da MAF mantendo-se as mesmas proporções da MAC para cada agregado passante na peneira #16;
- c) estabelecer a massa total (W_{CP}) que vai ser utilizada para a confecção das amostras cilíndricas;
- d) calcular a massa de cada fração de agregado que é necessária para compor a massa de agregados da amostra de MAF ($W_{agg(MAF)}$);
- e) calcular o teor de ligante presente na MAF (% $P_{b,MAF}$) e a massa de ligante necessária para moldar as amostras cilíndricas de MAF ($W_{b,MAF}$).

$$W_b = W_{MAC} \times \%P_{b,MAC}$$

$$W_{agg(MAF)} = \%pass\#16 \times W_{MAC}$$

$$\%P_{b,MAF} = \frac{W_b}{W_{agg(MAF)} + W_b}$$

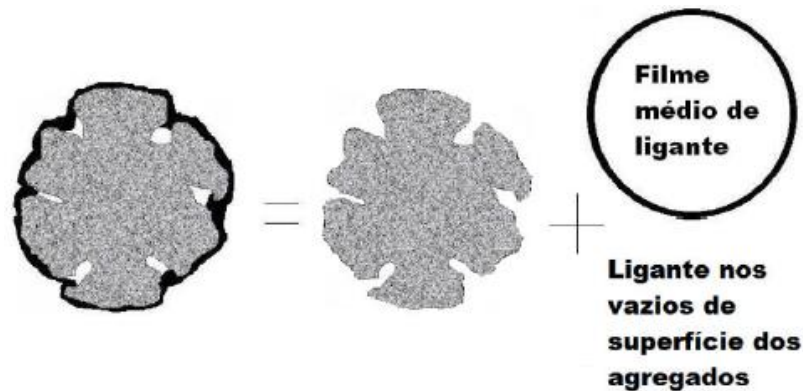
$$W_{b,MAF} = W_{CP} \times \%P_{b,MAF}$$

2.4.3. Método proposto por Karki (2010)

O método semi-empírico concebido por Karki (2010) consiste em calcular a massa de ligante que envolve os agregados graúdos (retidos da peneira #16) e retirá-la da massa total de ligante na mistura. Neste trabalho essa massa foi determinada experimentalmente, como

descrito na seção a seguir. A massa resultante é referente ao ligante que envolve os agregados miúdos (passantes na peneira #16) e, dividida pela massa desses agregados, equivalente ao teor de ligante presente na MAF. A massa de ligante retida nos agregados graúdos é composta por duas quantidades: a que compõe o filme de ligante e a que preenche alguns vazios da superfície dos agregados. Cada uma dessas quantidades pode ser estimada por meio da consideração das propriedades dos materiais envolvidos e de algumas simplificações. As propriedades dos materiais utilizadas 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. Dentre as simplificações adotadas, destacam-se a adoção de uma espessura de filme de ligante arbitrária (12 μ m) e a consideração de que os vazios de superfície dos agregados são preenchidos de forma que o agregado passe a apresentar um volume efetivo (tomado como a média entre o volume real e o volume aparente) como demonstrado na Figura 2.

Figura 2: Ilustração do princípio em que se baseia o método de Karki (2010)



2.4.4. Método proposto por Coutinho (2012)

Sousa et al. (2011) propuseram um novo método de dosagem de MAF. Neste método, assim como nos métodos descritos anteriormente, o proporcionamento dos agregados finos que compõem a MAF é mantido igual àquele encontrado para a curva granulométrica da MAC. Porém, o método realiza uma separação experimental da porção fina, passante na peneira #16 (menor do que 1,18 mm), da porção graúda e determina o teor de ligante presente na porção final usando uma estufa de ignição.

Tendo em vista que a estufa de ignição é um equipamento incomum no Brasil, Coutinho (2012) propôs uma dosagem análoga à de Souza. Este método foi baseado nos ensaios de granulometria de agregados graúdos e miúdos (DNER-ME 083-94) e de extração de ligante com o Rotarex, equipamento mostrado na Figura 3 (DNER-ME 053-94), adaptando o método de dosagem de Souza para os laboratórios brasileiros.

Figura 3: Rotarex elétrico



Para realizá-lo, a partir das MACs previamente dosadas, uma amostra de MAC no teor de ligante de projeto foi preparada e resfriada até a temperatura ambiente. Durante o resfriamento, a mistura foi revolvida cuidadosamente de forma a desfazer a maior quantidade possível de grumos de agregados miúdos com ligante e de agregados graúdos envolvidos por agregados miúdos aderidos. O objetivo dessa etapa foi tornar a porção de agregados graúdos (recoberta por mástique) separável da porção de agregados miúdos (também recoberta por mástique) por meio do peneiramento. A fim de determinar o teor de ligante da fase MAF que representa a porção fina da mistura completa, procedeu-se com as seguintes etapas para as amostras soltas:

- a) fracionamento da mistura solta resfriada na peneira de 2,00 mm (#10) em duas massas distintas: a porção da mistura solta retida na peneira #10 (agregados graúdos envoltos por mástique e agregados miúdos envoltos por ligante e aderidos aos agregados graúdos) e a porção passante na peneira #10 (agregados miúdos envoltos por ligante);
- b) extração de ligante de cada uma das duas massas. Obtém-se: a massa total retida na peneira #10 ($M_{\#10ret}$), a massa de ligante ali contida (M_{ligret}), a massa total passante na peneira #10 ($M_{\#10pass}$) e a massa de ligante ali contida ($M_{ligpass}$). A $M_{pass<2,00mm}$ representa a diferença entre a massa total e a massa de ligante, ambas contidas no material passante na peneira #10, ou seja, $M_{pass<2,00mm} = M_{\#10pass} - M_{ligpass}$;
- c) fracionamento da massa de agregados contidos na porção da mistura retida na peneira #10 para obtenção de duas massas: massa de agregados graúdos ($M_{ret>2,00mm}$) e massa de agregados miúdos aderida aos agregados graúdos ($M_{ret<2,00mm}$). A Figura 4 ilustra este procedimento.

Figura 4: Ilustração do procedimento de determinação do teor de ligante na MAF



Fonte: Coutinho (2012)

Assim, o teor de ligante na porção que passa na peneira #10 (T_{pass}), que é considerado o teor de ligante presente na MAF (T_{MAF}), é definido como:

$$T_{MAF} = T_{pass} = \frac{\text{massa de ligante passante na \#10}}{\text{massa total passante na \#10}} = \frac{M_{lig\ pass}}{M_{\#10\ pass}}$$

Após realizar a extração do CAP da mistura, também podemos obter a massa de ligante que envolve os agregados graúdos ($\%Lig_{env.graúdos}$), que é usada no método de dosagem de Karki, da seguinte forma:

$$\%Lig_{env.graúdos} = 100 \times \frac{\text{massa de ligante retido nos agregados graúdos}}{\text{massa total de ligante}}$$

$$\%Lig_{env.graúdos} = 100 \times \frac{(M_{ligante} - M_{lig<2,00mm} - M_{ligpass})}{M_{ligante}}$$

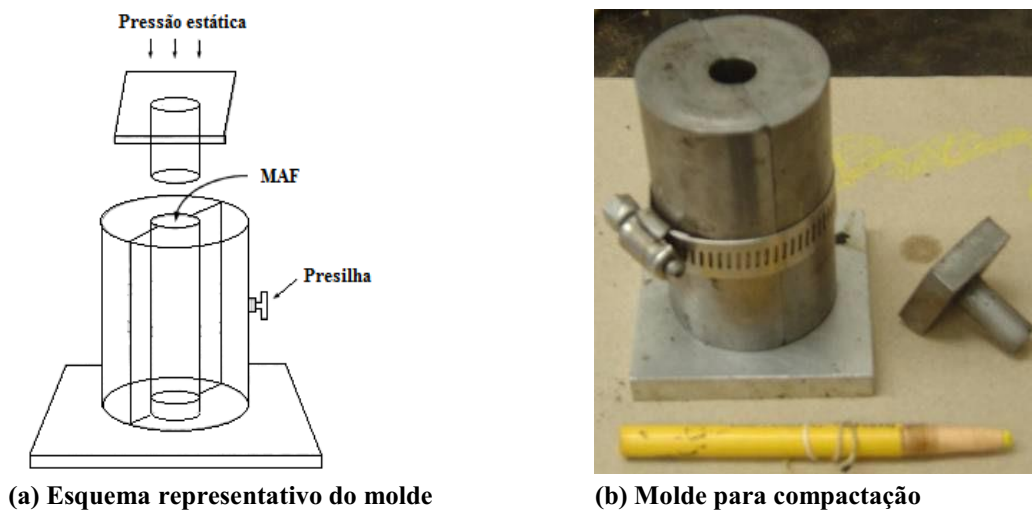
Onde $M_{lig<2,00mm}$ é a massa de ligante envolvendo os agregados miúdos aderidos a massa retida na peneira #10 e é calculada por:

$$M_{lig<2,00mm} = \frac{M_{ret<2,00mm}}{1 - T_{MAF}} - M_{ret<2,00mm}$$

2.5. Moldagem e extração dos corpos de prova

Segundo Kim et al. (2003), depois de misturadas, as amostras são compactadas em um molde especialmente fabricado com esse intuito (mostrado na Figura 5). Os autores fabricaram esse molde de modo a fornecer superfícies lisas (e suaves) e obter amostras cilíndricas com 12 mm de diâmetro e 50 mm de altura. Cerca de 11,5 g de material foram utilizados para cada amostra.

Figura 5: Esquema representativo e molde para compactação das amostras de MAFs utilizados por Kim et al. (2003)

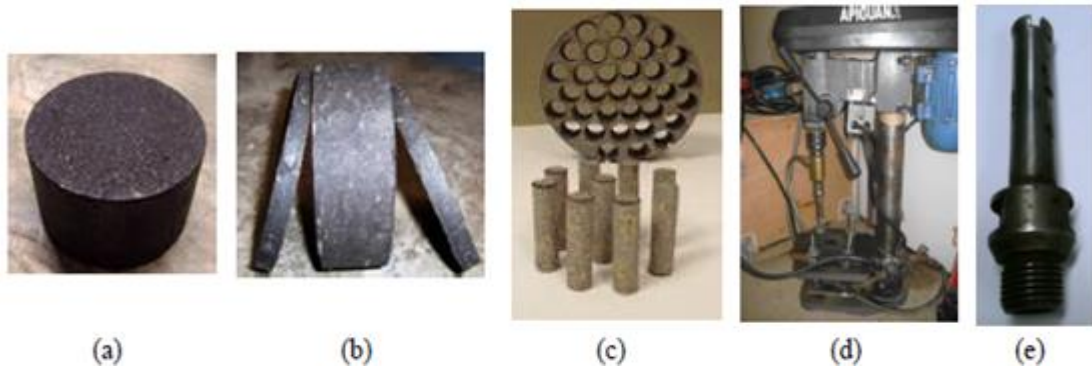


Para Castelo Branco (2008), o processo de compactação é similar àquele utilizado na confecção de CPs de MACs, tendo sido originário no estudo conduzido por Zollinger (2005), onde os corpos devem ser compactados em um Compactador Giratório Superpave (CGS) com 100 giros sob uma pressão de 600 ± 18 KPa e ângulo de giração de $1,25 \pm 0,02^\circ$.

Já Souza (2011) indicou que a compactação fosse realizada num CGS até que não ocorresse mudança na altura do CP em um CGS. E, ao final deste processo, são extraídos os CPs de MAF (50 mm de altura e 12 mm de diâmetro).

Para Coutinho (2012) a compactação dos CPs foi feita em um CGS com o objetivo de produzir amostras com volume de vazios de $4 \pm 0,5\%$. Para isto, foi realizado o Rice Test nas amostras para obter a densidade máxima da MAF e inserir este parâmetro no CGS para que este gerasse um corpo com o volume de vazios desejado e, por fim, foi executado um ensaio de volumetria no corpo compactado para averiguar se esse objetivo havia sido alcançado.

Em seguida, o processo de extração dos CPs de MAF (Figura 6 (a)) é semelhante ao que foi utilizado por Castelo Branco (2008), onde é necessário serrar o topo e a base das amostras com o objetivo de obter um cilindro com aproximadamente 50 mm de altura e 150 mm de diâmetro (Figura 6 (b)) e menos heterogêneo no que diz respeito à distribuição de vazios na amostra. O próximo passo seria a extração das amostras de MAF (50 mm de altura e 12 mm de diâmetro – Figura 6 (c)), essa extração é realizada por uma serra copo (Figura 6 (e)) acoplada em uma furadeira de bancada (Figura 6 (d)).

Figura 6: Produção de amostras de MAFs

Neste trabalho foi moldado um corpo de 150 mm de diâmetro que seguiu a compactação proposta por Zollinger (2005) e um corpo de 100 mm de diâmetro que foi compactado pelo método de Coutinho (2012), mas as amostras não tiveram o topo e a base serrados, tampouco as amostras cilíndricas que são usadas como corpos de prova no reômetro foram extraídas.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Cimento asfáltico de petróleo (CAP)

O CAP 50/70 utilizado para o desenvolvimento deste trabalho é um produto derivado do petróleo brasileiro e processado na refinaria Petrobras/Lubnor (Lubrificantes e Derivados de Petróleo do Nordeste), a partir da destilação a vácuo do petróleo. Os resultados da caracterização são apresentados na Tabela 1, onde todos os resultados encontram-se dentro dos limites especificados por normas.

Tabela 1: Características do CAP 50/70

Característica	Método	Especificação	Resultado	Unidade
Penetração	D 5	50 a 70	53	0,1 mm
Ponto de Amolecimento	D 36	46 min	53	°C
Viscosidade Brookfield 135°C SP21	D 4402	274 min	487	cP
Viscosidade Brookfield 150°C SP21	D 4402	112 min	248	cP
Viscosidade Brookfield 177°C SP21	D 4402	56 min	93	cP
RTFOT – Penetração Retida	D 5	57 a 285	68	%
RTFOT – Aumento do Ponto de Amolecimento	D 36	8 máx.	7	°C

Fonte: Ferreiro (2018)

3.2. Agregados

Os agregados graúdos utilizados nesta pesquisa foram a brita 3/4" (19 mm) e a brita 3/8" (9,5 mm), de origem granítica e cedidos pela mineradora do Grupo Rocha Cavalcante. Como agregados miúdos utilizados foram o pó de pedra (cedida também pelo Grupo Rocha Cavalcante) e areia de leito de rio, adquirida no comércio local. Como material de enchimento (filler) foi utilizada a cal hidratada da marca MegaÓ. As propriedades dos agregados são mostradas na Tabela 2.

Tabela 2: Propriedades dos agregados utilizados em estudo

Propriedade	3/4"	3/8"	Pó de pedra	Areia
Densidade real (g/cm ³)	2,79	2,79	2,45	2,31
Densidade aparente (g/cm ³)	2,74	2,76	2,38	2,27
Absorção (%)	0,7	0,3	-	-
Abrasão Los Angeles (%)	22	25	-	-
Equivalente areia (%)	-	-	57,5	70,2

Fonte: Soares (2018)

Os agregados foram submetidos aos ensaios de caracterização segundo as normas do DNER: granulometria (DNER-ME 83/98), densidade real do agregado miúdo (DNER-ME 84/95), absorção e densidade de agregado graúdo (DNER-ME 81/98), índice de forma (DNER-ME 086/94); adesividade a ligante betuminoso (DNER-ME 078/94) e abrasão Los Angeles (DNER-ME 035/98).

3.3. Granulometria da mistura asfáltica completa (MAC)

As misturas utilizadas neste trabalho são de graduação densa e se enquadram na faixa C do DNIT (DNIT-ES 031/2004). A composição granulométrica foi obtida por meio da mistura dos agregados apresentados na seguinte proporção em massa: 18% de brita 3/4" (19 mm), 40% de brita 3/8" (9,5 mm), 25% de pó de pedra, 15% de areia e 2% de filler, como mostrado na Tabela 3.

Tabela 3: Granulometria da mistura completa

PENEIRAS	PORCENTAGEM PASSANDO - MISTURA DE PROJETO INFERIOR 3I												
	BRITA 19		BRITA 9.5		AREIA		PÓ DE PEDRA		FILLER		PROJETO	ESPECIFICAÇÃO	
	TOTAL	18,0%	TOTAL	40,0%	TOTAL	15,0%	TOTAL	25,0%	TOTAL	2%		Faixa C	
1 1/2"	100,00	18,00	100,00	40,00	100,00	15,00	100,00	25,00	100,00	2,00	100,00	100	100
1"	100,00	18,00	100,00	40,00	100,00	15,00	100,00	25,00	100,00	2,00	100,00	100	100
3/4"	98,59	17,75	100,00	40,00	100,00	15,00	100,00	25,00	100,00	2,00	99,75	100	100
1/2"	14,98	2,70	100,00	40,00	100,00	15,00	100,00	25,00	100,00	2,00	84,70	80	100
3/8"	2,12	0,38	100,00	40,00	100,00	15,00	100,00	25,00	100,00	2,00	82,38	70	90
N ^o 4	0,43	0,08	37,18	14,87	97,74	14,66	99,81	24,95	100,00	2,00	56,56	44	72
N ^o 10	0,41	0,07	3,35	1,34	90,94	13,64	76,71	19,18	100,00	2,00	36,23	22	50
N ^o 40	0,39	0,07	2,92	1,17	35,51	5,33	35,84	8,96	100,00	2,00	17,52	8	26
N ^o 80	0,38	0,07	2,49	1,00	4,22	0,63	19,95	4,99	100,00	2,00	8,68	4	16
N ^o 200	0,28	0,05	1,84	0,74	2,44	0,37	8,63	2,16	97,00	1,94	5,25	2	10

Fonte: Soares (2018)

3.4. Dosagem da mistura asfáltica completa (MAC)

A dosagem da mistura completa foi feita por Soares (2018), seguindo a metodologia Superpave que pode ser verificada com detalhes em Bernucci et al. (2006). A premissa principal da dosagem Superpave é que a quantidade de ligante usada deve ser tal que a mistura atinja 4% de vazios no número de giros de projeto (para este estudo, 100 giros).

Os resultados de teor ótimo da mistura completa (CAP), volume de vazios (Vv), densidade máxima (G_{mm}), Resistência à Tração (RT) e Módulo de Resiliência (MR) foram obtidos por Soares (2018) e das faixas de temperaturas de usinagem (TU) e de compactação (TC) foram obtidos por Ferreiro (2018) por meio da realização de ensaios de viscosidade nos CAPs estudados (ASTM D2493 (2001)) e são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Parâmetros de dosagem

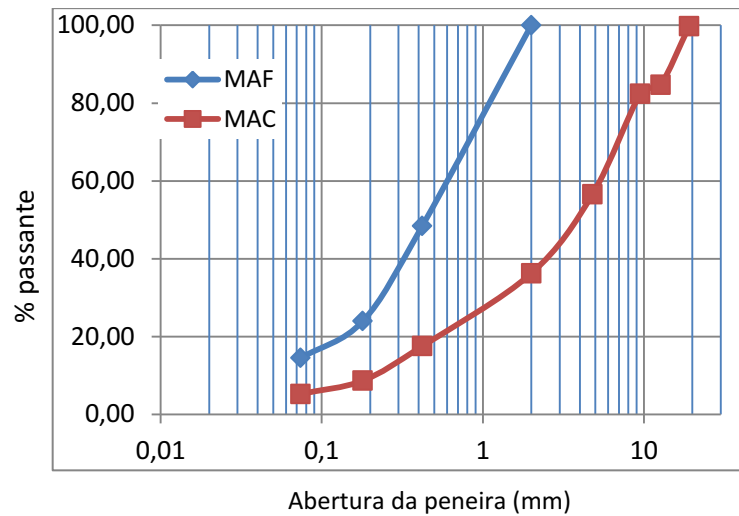
Parâmetro	MAC
CAP (%)	4,5
V _v (%)	4,16
G _{mm}	2,52709
MR (MPa)	7274
RT (MPa)	0,95
TU (°C)	165 – 175
TC (°C)	160 – 168

3.5. Definição da curva granulométrica da MAF

A curva granulométrica da MAF foi obtida a partir da equivalente MAC, mantendo-se a proporção entre os agregados miúdos, como mostrado na Tabela 5. A distribuição granulométrica da MAC e sua respectiva MAF utilizada está representada na Figura 7.

Tabela 5: Granulometria da MAC e da MAF

Peneira	Tamanho da abertura (mm)	MAF	MAC
		Porcentagem de massa passando (%)	
1 1/2"	38,1	-	100,00
1"	25,4	-	100,00
3/4"	19,1	-	99,75
1/2"	12,7	-	84,70
3/8"	9,5	-	82,38
N ^o 4	4,8	-	56,56
N ^o 10	2	100,00	36,23
N ^o 40	0,42	48,37	17,52
N ^o 80	0,18	23,97	8,68
N ^o 200	0,074	14,49	5,25

Figura 7: Distribuição granulométrica dos agregados para a MAC e sua MAF

Em posse da proporção em massa da MAC (18% de brita 3/4" (19 mm), 40% de brita 3/8" (9,5 mm), 25% de pó de pedra, 15% de areia e 2% de filler (cal)), é possível calcular a proporção em massa da MAF, já que esta será formada apenas por pó de pedra, areia e filler. Tem-se que estes materiais colaboram com 42% da massa na MAC então, fazendo uma relação simples que implica que isto será 100% da massa do corpo da MAF, obtém-se a proporção mostrada na Tabela 6:

Tabela 6: Proporção em massa da MAF

MATERIAL	AREIA	PÓ DE PEDRA	FILLER
% DE MASSA	35,714	59,524	4,762

3.6. Execução dos métodos de dosagem das MAFs

Para exemplificar o cálculo da quantidade de material por amostra com todos os métodos de citados, foi teorizado um corpo de prova com massa de 1200 g que, como regra geral, produziria um corpo de prova de 100 mm de diâmetro e 60 mm de altura para uma mistura asfáltica completa.

3.6.1. Dosagem pelo método de Kim (2003)

Para executar este método é preciso usar um percentual fixo de ligante (8% em massa) independente dos materiais que são utilizados. Isso implica também que 92% da massa do corpo é composta pelos agregados e filler. Ou seja:

$$92\% \times 35,714\% = 32,857\% \text{ de areia}$$

$$92\% \times 59,524\% = 54,762\% \text{ de pó de pedra}$$

$$92\% \times 4,762\% = 4,381\% \text{ de cal}$$

Assim, encontramos a Tabela 7 com as massas de cada material:

Tabela 7: Dosagem segundo Kim (2003)

MATERIAL	AREIA	PÓ DE PEDRA	FILLER	CAP
% DE MASSA	32,857	54,762	4,381	8,000
MASSA (g)	394,28	657,14	52,57	96,00

3.6.2. Dosagem pelo método de Castelo Branco (2008)

Neste método a percentagem de ligante asfáltico na MAF é estimada por meio do cálculo da quantidade de ligante que é necessária para recobrir na totalidade as partículas granulares. Assim, executando os passos da metodologia, porém utilizando a peneira #10 como de corte, tem-se:

- $W_b = W_{MAC} \times \%P_{b,MAC} = 1200 \text{ g} \times 4,5\% = 54 \text{ g};$
- Usando a curva granulométrica, percebe-se que 36,23% de agregados da MAC passam pela peneira de corte;
- Será usado um W_{CP} igual a 1200 g como exemplo;
- $W_{agg(MAF)} = \%pass\#16 \times W_{MAC} = 36,23\% \times 1200 \text{ g} = 434,76 \text{ g};$
- $\%P_{b,MAF} = \frac{W_b}{W_{agg(MAF)} + W_b} = \frac{54 \text{ g}}{434,76 \text{ g} + 54 \text{ g}} = 11,05\%$
 $W_{b,MAF} = W_{CP} \times \%P_{b,MAF} = 1200 \text{ g} \times 11,05\% = 132,58 \text{ g}$

Assim, tem-se que 88,95% da massa do corpo é formada pelos agregados e filler, então:

$$88,95\% \times 35,714\% = 31,768\% \text{ de areia}$$

$$88,95\% \times 59,524\% = 52,947\% \text{ de pó de pedra}$$

$$88,95\% \times 4,762\% = 4,236\% \text{ de cal}$$

Obtendo a Tabela 8 com as massas de cada material:

Tabela 8: Dosagem segundo Castelo Branco (2008)

MATERIAL	AREIA	PÓ DE PEDRA	FILLER	CAP
% DE MASSA	31,768	52,947	4,236	11,050
MASSA (g)	381,21	635,36	50,83	132,60

3.6.3. Dosagem pelo método de Karki (2010)

Na dosagem de Karki é necessário calcular a massa de ligante que envolve os agregados graúdos e retirá-la da massa total de ligante na mistura. Para isso foi preciso executar os procedimentos de peneiramento de mistura e extração de ligante descrito na seção 2.4.4. Os resultados destes procedimentos também serão utilizados no método de dosagem de Coutinho (2012). Tais procedimentos foram executados duas vezes e os resultados a seguir são a média dos valores obtidos:

- a) Porção da mistura solta retida na peneira #10 = 1058,85 g;
Porção passante na peneira #10 = 128,79 g;
- b) Massa total retida na peneira #10 ($M_{\#10ret}$) = 1058,85 g;
Massa de ligante ali contida (M_{ligret}) = 45,05 g;
Massa total passante na peneira #10 ($M_{\#10pass}$) = 128,79 g;
Massa de ligante ali contida ($M_{ligpass}$) = 12,59 g;
- c) Massa de agregados graúdos ($M_{ret>2,00mm}$) = 713,9 g;
Massa de agregados miúdos aderida aos graúdos ($M_{ret<2,00mm}$) = 297,89 g.

O teor de ligante na porção que passa na peneira #10 (T_{pass}) é:

$$T_{pass} = \frac{M_{lig\ pass}}{M_{\#10pass}} = \frac{12,59\ g}{128,79\ g} = 0,0978$$

É possível obter a massa de ligante que envolve os agregados graúdos (%Lig_{env.graúdos}):

$$\%Lig_{env.graúdos} = 100 \times \frac{(M_{ligante} - M_{lig<2,00mm} - M_{ligpass})}{M_{ligante}}$$

Onde:

$$M_{lig<2,00mm} = \frac{M_{ret<2,00mm}}{1 - T_{MAF}} - M_{ret<2,00mm}$$

$$M_{lig<2,00mm} = \frac{297,89\ g}{1 - 0,0978} - 297,89\ g = 32,29\ g$$

Implicando que:

$$\%Lig_{env.graúdos} = 100 \times \frac{(57,64 \text{ g} - 32,29 \text{ g} - 12,59 \text{ g})}{57,64 \text{ g}} = 22,14\%$$

Ou seja, 22,14% dos 57,64 g, ou 12,76 g de ligante estavam envolvendo os agregados graúdos na amostra completa. Isso implica que a diferença, de 44,88 g, é referente ao ligante que envolve os agregados miúdos e, dividida pela massa desses agregados, equivale ao teor de ligante presente na MAF:

$$T_{MAF} = \frac{44,88 \text{ g}}{128,79 \text{ g} - 12,59 \text{ g} + 297,89 \text{ g}} = 10,84\%$$

Assim, 89,16% da massa do corpo será composta por agregados e filler, tem-se:

$$89,16\% \times 35,714\% = 31,843\% \text{ de areia}$$

$$89,16\% \times 59,524\% = 53,072\% \text{ de pó de pedra}$$

$$89,16\% \times 4,762\% = 4,246\% \text{ de cal}$$

Obtendo a Tabela 9 com as massas de cada material:

Tabela 9: Dosagem segundo Karki (2010)

MATERIAL	AREIA	PÓ DE PEDRA	FILLER	CAP
% DE MASSA	31,843	53,072	4,246	10,840
MASSA (g)	382,11	636,86	50,95	130,08

3.6.4. Dosagem pelo método de Coutinho (2012)

Utilizando os resultados apresentados no procedimento de separação e extração de ligante da dosagem anterior, tem-se que o teor de ligante na porção que passa na peneira #10 (T_{pass}) é considerado o teor de ligante presente na MAF (T_{MAF}), ou seja:

$$T_{pass} = T_{MAF} = \frac{M_{lig\ pass}}{M_{\#10pass}} = \frac{12,59 \text{ g}}{128,79 \text{ g}} = 0,0978 \text{ ou } 9,78\%$$

Implicando que 90,22% da massa do corpo pertence aos agregados e ao filler, então:

$$90,22\% \times 35,714\% = 32,221\% \text{ de areia}$$

$$90,22\% \times 59,524\% = 53,703\% \text{ de pó de pedra}$$

$$90,22\% \times 4,762\% = 4,296\% \text{ de cal}$$

Obtendo a Tabela 10 com as massas de cada material:

Tabela 10: Dosagem segundo Coutinho (2012)

MATERIAL	AREIA	PÓ DE PEDRA	FILLER	CAP
% DE MASSA	32,221	53,703	4,296	9,780
MASSA (g)	386,65	644,43	51,56	117,36

3.7. Moldagem e extração dos corpos de prova

Os corpos compactados neste trabalho utilizaram o teor de ligante encontrado pelo método de dosagem de Coutinho (2012) por este ser o método mais atual. Ainda não se sabe qual volume de vazios resultante na MAF representa a estrutura interna da MAC, então essas compactações foram executadas apenas para estudo desse parâmetro.

O Rice Test foi executado, seguindo a metodologia especificada pela norma americana ASTM D 2041/2011, para que a densidade máxima (G_{mm}) pudesse ser determinada. Tal ensaio foi feito com duas amostras de 1500 g (valor usado para quando o diâmetro máximo dos agregados for menor que 12,5 mm segundo a norma americana), com a dosagem da Tabela 11:

Tabela 11: Dosagem das amostras para o Rice Test

MATERIAL	AREIA	PÓ DE PEDRA	FILLER	CAP
% DE MASSA	32,221	53,703	4,296	9,780
MASSA (g)	483,32	805,54	64,44	146,70

Inicialmente, preparou-se uma amostra que teve seu peso registrado como “A”. Em seguida o recipiente foi cheio de água destilada e pesado, registrando, assim, o peso “B”.

A mistura asfáltica foi adicionada ao recipiente e este conjunto foi acoplado à mesa agitadora mostrada na Figura 8 onde se aplicou um vácuo de 27 ± 2 mmHg (ou $3,7 \pm 0,3$ KPa) e agitou-se por 15 minutos. Finalizado o período de agitação, completou-se o recipiente com água destilada e pesou-se o conjunto nessas condições. Tal medida foi registrada como “C” em gramas.

Figura 8: Aparelhagem para o Rice Test

Obtiveram-se os seguintes resultados médios no ensaio:

- a) massa da mistura seca (A) = 1455,85 g
- b) massa do recipiente com água (B) = 7587,00 g
- c) massa do recipiente com a amostra imersa em água (C) = 8416,90 g

Com isto, a densidade máxima é calculada por:

$$G_{mm} = \frac{A}{A - (C - B)} = \frac{1455,85 \text{ g}}{1455,85 \text{ g} - (8416,90 \text{ g} - 7587,00 \text{ g})} = 2,326 \text{ g/cm}^3$$

Assim, a compactação seguiu, primeiramente, o estudo conduzido por Zollinger, onde os corpos devem ser compactados com 100 giros sob uma pressão de 600 ± 18 KPa e ângulo de giração de $1,25 \pm 0,02^\circ$, ou seja, os parâmetros de compactação foram os mesmos que os utilizados para misturas completas de asfalto. Foi executada a compactação de um corpo de 150 mm de diâmetro e com massa de 2700 g, com o objetivo de gerar um corpo com cerca de 60 mm de altura, partindo do pressuposto de que a volumetria da MAF era parecida com a da MAC. A Tabela 12 mostra a dosagem de tal corpo:

Tabela 12: Dosagem do primeiro corpo compactado

MATERIAL	AREIA	PÓ DE PEDRA	FILLER	CAP
% DE MASSA	32,221	53,703	4,296	9,780
MASSA (g)	869,97	1449,97	116,00	264,06

Em seguida, foi feito o ensaio de volumetria no corpo obtendo os seguintes valores:

- a) Massa Seca (M_S) = 2667,8 g
- b) Massa Submersa (M_{SUB}) = 1494,8 g

c) Altura média = 6,685 cm

Percebemos, então, que a altura do corpo foi maior do que a esperada, o que indica que o corpo possui uma densidade menor do que aquela do corpo de provas da mistura convencional.

O que leva à obtenção dos parâmetros:

$$V = M_S - M_{SUB} = 2667,8 \text{ g} - 1494,8 \text{ g} = 1173,0 \text{ cm}^3$$

$$G_{mb} = \frac{M_S}{V} = \frac{2667,8 \text{ g}}{1173,0 \text{ cm}^3} = 2,274 \text{ g/cm}^3$$

E, por fim, obteve-se o Volume de vazios (V_V) deste corpo usando:

$$V_V = \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} = \frac{2,326 \text{ g/cm}^3 - 2,274 \text{ g/cm}^3}{2,326 \text{ g/cm}^3} = 0,0224 = 2,24\%$$

Posteriormente, foi confeccionado um segundo corpo de prova com diâmetro de 100 mm, de 1200 g, usando a dosagem encontrada na seção anterior, com o objetivo de cumprir o requisito de que a compactação dos CPs deve ser feita de modo a produzir amostras com volume de vazios de $4 \pm 0,5\%$. Para isto foi preciso executar uma compactação onde o critério de parada era a densidade aparente do corpo, que foi calculada a partir da fórmula de volume de vazios:

$$V_V = \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} \Rightarrow G_{mb} = G_{mm} \times (1 - V_V)$$

Assim, usando o valor da densidade máxima, G_{mm} igual a $2,326 \text{ g/cm}^3$ previamente encontrado, tem-se que, para produzir um corpo com $3,5\%$ (o limite inferior exigido), a densidade aparente deve ser:

$$G_{mb} = 2,326 \text{ g/cm}^3 \times (1 - 0,035) = 2,245 \text{ g/cm}^3$$

Com isto, foram inseridos no programa do CGS os parâmetros da amostra: massa (1200 g), densidade máxima (2326 kg/m^3), porcentagem de ligante (9,78%), diâmetro do molde (100 mm) e se modificou a opção de critério de parada para a densidade aparente (2245 kg/m^3).

Após 89 giros esta compactação gerou um corpo de 68,3 mm de altura e com os seguintes parâmetros volumétricos:

- a) Massa do corpo de prova seco = 1187,8 g
- b) Massa do corpo de prova submerso = 657,8 g

O que leva à obtenção da densidade aparente medida:

$$G_{mb} = \frac{M_S}{V} = \frac{1187,8 \text{ g}}{1187,8 \text{ g} - 657,8 \text{ g}} = 2,241 \text{ g/cm}^3$$

E, por fim, obteve-se o Volume de vazios (V_V) deste corpo:

$$V_V = \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} = \frac{2,326 \text{ g/cm}^3 - 2,241 \text{ g/cm}^3}{2,326 \text{ g/cm}^3} = 0,0364 = 3,64\%$$

Sendo que a diferença deste volume de vazios, de 3,64%, para a que era desejada, de 3,50%, deve-se apenas à perda de material durante a passagem da mistura da panela para o molde do CGS. Isso levou a uma compactação onde o CGS calculou a densidade aparente final do corpo para uma massa de mistura um pouco menor do que a que foi informada para seu programa, o que causa uma densidade medida um pouco menor do que a esperada.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Como ainda não existem normas sobre a dosagem de misturas MAF e, conseqüentemente, não existem formas de se afirmar qual é o melhor método de dosagem ou de se provar mecanicamente qual é a dosagem correta, existe a necessidade de executar um comparativo entre duas misturas diferentes para que se possa analisar o que foi calculado. Para isso, os resultados encontrados serão comparados aos de Coutinho (2012).

A granulometria usada por Coutinho (2012) foi: 20% de brita 3/4" (19 mm), 44% de brita 3/8" (9,5 mm) e 36% de pó de pedra, todos os agregados provenientes da pedreira MFT de origem granítica. Os agregados possuíam as propriedades presentes na Tabela 13 e o CAP usado em sua pesquisa tinha as características mostradas na Tabela 14:

Tabela 13: Propriedades dos agregados para comparação

Propriedade	3/4"	3/8"	Pó de pedra
Densidade real (g/cm ³)	2,65	2,66	2,64
Densidade aparente (g/cm ³)	2,58	2,58	-
Absorção (%)	0,99	1,20	-

Fonte: Coutinho (2012)

Tabela 14: Características do CAP para comparação

Característica	Resultado	Unidade
Penetração	59	0,1 mm
Ponto de Amolecimento	51,2	°C
Viscosidade Brookfield 135°C SP21	444	cP
Viscosidade Brookfield 150°C SP21	215	cP
Viscosidade Brookfield 177°C SP21	77	cP
RTFOT – Penetração Retida	75	%
RTFOT – Aumento do Ponto de Amolecimento	4,8	°C

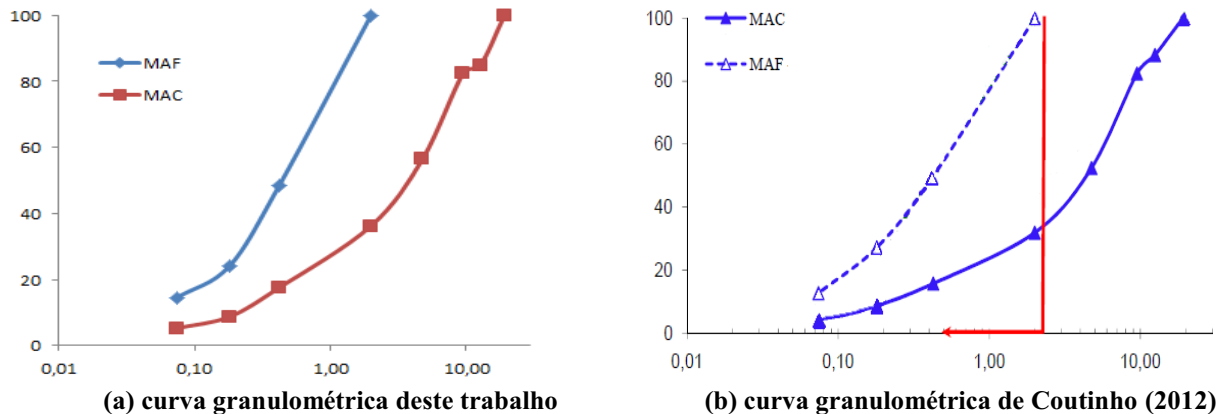
Fonte: Coutinho (2012)

Coutinho (2012) obteve, então, uma mistura asfáltica completa com 5,5% de CAP, 4,0% de volume de vazios e densidade máxima (G_{mm}) igual a 2,433 g/cm³. Nota-se, então, que o grande índice de absorção dos agregados usados levou a um teor ótimo de ligante maior se comparado à mistura completa usada neste trabalho.

Percebe-se uma grande semelhança entre as curvas granulométricas ao fazer um comparativo entre elas, como visto na Figura 9, onde a curva (a) é referente a este trabalho e a

curva (b) refere-se à curva de Coutinho (2012). Esta semelhança leva a crer que, se as propriedades dos agregados e do CAP usados nos dois trabalhos fossem parecidos, os teores de CAP nas dosagens de MAF também seriam similares.

Figura 9: Curvas granulométricas das amostras analisadas



Com isso, as MAFs foram denominadas da seguinte forma:

- a) MAF 1: granulometria e CAP usados neste trabalho;
- b) MAF 2: granulometria e CAP utilizados por Coutinho (2012).

Nos ensaios realizados para os métodos de dosagem, foram obtidos, para a massa de CAP retida nos agregados grãos (em relação à massa total de ligante), os resultados apresentados na Tabela 15.

Tabela 15: Parâmetros utilizados nas dosagens das MAFs

Mistura (MAF)	% Agregados Miúdos	% Ligante envolvendo os agregados grãos
1	36,23	22,14
2	31,80	43,00

Como observado na Tabela 15, as duas misturas apresentam uma quantidade próxima de agregados passantes na peneira #10 (usada como peneira de corte para as duas MAFs), porém há uma grande diferença na porcentagem de ligante que envolve os agregados grãos na MAF 2. De maneira geral os agregados miúdos, que apresentam uma área de superfície maior em relação ao seu volume quando comparados com os grãos, consomem maior quantidade de ligante. Mas, neste caso, a diferença no consumo de ligante pela parte grãda se justifica pela propriedade de absorção presente nos ligantes da MAF 2. Isso explica alguns resultados apresentados na Tabela 16, onde a MAF 1, mesmo tendo um teor de ligante ótimo menor na MAC correspondente, teve o teor de ligante maior em alguns casos.

Tabela 16: Resultados dos teores de ligante nas MAFs usando diferentes métodos

MAF	% CAP / MÉTODO				
	Kim et al. (2003)	Castelo Branco (2008)	Karki (2010)	Coutinho (2012)	MAC
1	8,00	11,05	10,84	9,78	4,50
2	8,00	15,50	10,80	9,60	5,50

Da Tabela 16 podemos afirmar que, por não ser sensível às variações dos teores de ligante nas misturas completas, o método de Kim et al. (2003) pode ser considerado ultrapassado. Outro ponto importante é o fato de que, para o método de Castelo Branco (2008), não importa a quantidade de CAP que foi retida pelos agregados graúdos na mistura completa, o que faz com que a diferença entre as dosagens seja relacionada apenas à quantidade de ligante na MAC inicial, fazendo com que a MAF 2 tenha um teor de ligante maior do que a MAF 1.

Por fim, os métodos de Karki (2010) e Coutinho (2012) apresentam resultados próximos e, entre as duas MAFs, as diferenças do teor entre esses dois métodos são de 10%. Assim, considerando o fato que todas as propriedades dos materiais envolvidos são importantes para a determinação do teor de ligante na MAF, esses são os métodos mais precisos atualmente.

5. CONCLUSÃO

Esta pesquisa fez um estudo de quatro métodos de dosagem de matriz de agregados finos presentes na literatura tendo em vista que, após o desenvolvimento do primeiro método de dosagem para MAF, diversos pesquisadores vêm desenvolvendo novos métodos ou aprimorando os existentes e, por isso, até hoje não está disponível um método amplamente aceito para quantificar o teor de ligante asfáltico para uma amostra de MAF que seja correspondente ao da parte fina de sua MAC.

A partir desse estudo, foi possível constatar que todos os métodos estimaram teores de ligante distintos. A não consideração, por parte do método de Castelo Branco, da quantidade de ligante consumida pelos agregados graúdos leva a teores de ligante elevados. Isto pode acarretar em amostras de MAF não compatíveis com o que de fato se encontra na MAC e em dificuldades no processo de compactação e moldagem das amostras. Os métodos mais atuais, de Karki e de Coutinho, levam este aspecto em consideração. Por outro lado, a consideração do método de Kim, de 8% como teor fixo de ligante asfáltico para toda e qualquer mistura apresenta, claramente, deficiência na consideração das propriedades dos materiais utilizados.

5.1. Sugestões para pesquisas futuras

A partir dos resultados e conclusões obtidos na presente pesquisa sugere-se para trabalhos futuros:

- a) Testar os métodos de dosagem de MAFs com diferentes tipos de agregados, curvas granulométricas e tipos de CAP;
- b) Avaliar a influência do volume de vazios das MAFs no seu comportamento mecânico e determinar o volume de vazios que melhor representa a parte fina das MACs;
- c) Verificar a influência do diâmetro do corpo de prova no número de giros necessários para a sua compactação;
- d) Averiguar a diferença no volume de vazios antes e após os cortes das faces superior e inferior nos corpos de prova;
- e) Definir um método de correlacionar mecanicamente uma MAF ao seu MAC.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAGÃO, F. T. S., KIM, Y., KARKI, P., & LITTLE, D. (2010). **Semi empirical, analytical, and computational predictions of dynamic modulus of asphalt concrete mixtures**. *Transportation Research Record*. 2181, 19–27.

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

ARAMBULA, E., MASAD, E., & MARTIN, A. E. (2007). **Moisture susceptibility of asphalt mixtures with known field performance evaluated with dynamic analysis and crack growth model**. *Transportation Research Record*. 2001, 20–28.

AREGA, Z. A., BHASIN, A., & DE KESEL, T. (2013). **Influence of extended aging on the properties of asphalt composites produced using hot and warm mix methods**. *Construction and Building Materials*. 44, 168–174.

BALBO, J. T. (2007). **Pavimentação asfáltica: materiais, projeto, e restauração**. Oficina de Textos.

BERNUCCI, L. B., CERATTI J. A. P., GORETTI DA MOTTA L. M., SOARES J. B. (2006). **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros – Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABED A, 2006.**

BHASIN, A. (2006). **Development of methods to quantify bitumen-aggregate adhesion and loss of adhesion due to water**. Ph.D. dissertation, Texas A&M University. College Station, TX.

BHASIN, A., LITTLE, N. D., BOMMAVARAM, R., & VASCONCELOS, K. (2008). **A framework to quantify the effect of healing in bituminous materials using material properties**. *Road Materials and Pavement Design*. 9(1), 219–242.

CARO, S., BELTRAN, D. P., ALVAREZ, A. E., & ESTAKHRI, C. (2012). **Analysis of moisture damage susceptibility of warm mix asphalt (WMA) mixtures based on dynamic mechanical analyzer (DMA) testing and a fracture mechanics model**. *Construction and Building Materials*. 35, 460–467.

CARO, S., MASAD, E., AIREY, G., BHASIN, A., & LITTLE, D. N. (2008). **Probabilistic analysis of fracture in asphalt mixes caused by moisture damage**. *Transportation Research Record*. 2057, 28–36.

CARO, S., MASAD, E., BHASIN, A., & LITTLE, D. (2010). **Micromechanical modeling of the influence of material properties on moisture-induced damage in asphalt mixtures**. *Construction and Building Materials*. 24, 1184–1192.

CASTELO BRANCO, V. T. F. (2008). **A unified method for the analysis of nonlinear viscoelasticity and fatigue cracking of asphalt mixes using the dynamic mechanical analyzer**. Ph.D. Dissertation, Texas A&M University. College Station, TX. 220p.

CASTELO BRANCO, V. T. F., MASAD, E., BHASIN, A., & LITTLE, D. (2008). **Fatigue analysis of asphalt mixtures independent of mode of loading**. Transportation Research Record. 2057, 149–156.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (2017) **Relatório Gerencial**. Brasília.

COUTINHO, R.P. (2012). **Utilização da parte fina de misturas asfálticas para avaliação do dano por fadiga**. Dissertação. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, CE.

CRAVO, M. C. C. (2016). **Efeitos do envelhecimento térmico e fotoquímico em ligantes asfálticos, mástique e matriz de agregados finos**. Ph.D. Thesis, UFRJ – Federal University of Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ.

CUCALON, L. G., KASSEM, E., LITTLE, D. N., & MASAD, E. (2017). **Fundamental evaluation of moisture damage in warm-mix asphalts**. *Road Materials and Pavement Design*. 18(S1). 258–283.

DANIEL, J. S., & KIM, Y. R. (2002). **Development of a simplified fatigue test and analysis procedure using a viscoelastic continuum damage model**. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*. 71, 619–650.

FERREIRO, A. A. (2018). **Análise reológica do ligante asfáltico modificado com cal hidratada**. Trabalho de Conclusão. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande – PB.

FREIRE, R. A. (2015). **Evaluation of the coarse aggregate influence in the fatigue damage using fine aggregate matrices with different maximum nominal sizes**. Master's Dissertation. Federal University of Ceará. Fortaleza – CE.

FREIRE, R. A., BABADOPULOS, L. F. A. L., CASTELO BRANCO, V. T. F., & BHASIN, A. (2017). **Aggregate maximum nominal sizes' influence on fatigue damage performance using different scales**. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 29(8), 04017067.

FREIRE, R. A., CASTELO BRANCO, V. T. F., & VASCONCELOS, K. (2014). **Avaliação da resistência ao trincamento de misturas asfálticas compostas por agregados miúdos com diferentes tamanhos máximos nominais**. *Revista Transportes*. 22(3). 117–127.

GONG, X., ROMERO, P., DONG, Z., & SUDBURY, D. S. (2016). **The effect of freeze–thaw cycle on the low-temperature properties of asphalt fine aggregate matrix utilizing bending beam rheometer**. *Cold Regions Science and Technology*. 125, 101–107.

GUDIPUDI, P., & UNDERWOOD, B. S. (2015). **Testing and modeling of fine aggregate matrix and its relationship to asphalt concrete mix.** Journal of the Transportation Research Board. 2507, 120–127.

HAGHSHENAS, H., NABIZADEH, H., KIM, Y.-R., & SANTOSH, K. (2016). **Research on high-RAP asphalt mixtures with rejuvenators and WMA additives.** Report n° SPR-P1(15) M016. Nebraska Department of Roads. Lincoln, NE.

HE, Y., ALAVI, M. Z., JONES, D., & HARVEY, J. (2016). **Proposing a solvent-free approach to evaluate the properties of blended binders in asphalt mixes containing high quantities of reclaimed asphalt pavement and recycled asphalt shingles.** Construction and Building Materials. 114, 172–180.

HUANG, B., ZHANG, Z., & KINGER, W. (2004). **Fatigue crack characteristics of HMA mixtures containing RAP.** Proceedings, 5th International RILEM Conference on Cracking in Pavements. Limoges, France.

IM, S., YOU, T., BAN, H., & KIM, Y.-R. (2015). **Multiscale testing-analysis of asphaltic materials considering viscoelastic and viscoplastic deformation.** International Journal of Pavement Engineering. 8436(October), 1–15.

IZADI, A. (2012). **Quantitative characterization of microstructure of asphalt mixtures to evaluate fatigue crack growth.** Ph.D. dissertation, Texas A&M University. Austin, TX.

KANAAN, A., OZER, H., & AL-QADI, I. (2014). **Testing of fine asphalt mixtures to quantify effectiveness of asphalt binder replacement using recycled shingles.** Transportation Research Record. 2445(1), 103–112.

KARKI, P. (2010) **Computational and Experimental Characterization of Bituminous Composites Based on Experimentally Determined Properties of Constituents.** Dissertação de Mestrado. University of Nebraska – Lincoln. Lincoln, NE.

KARKI, P., BHASIN, A., & UNDERWOOD, B. S. (2016). **Fatigue performance prediction of asphalt composites subjected to cyclic loading with intermittent rest periods.** Transportation Research Record. 2576, 72–82.

KARKI, P., KIM, Y.-R., & LITTLE, D. N. (2015a). **Dynamic modulus prediction of asphalt concrete mixtures through computational micromechanics.** Journal of the Transportation Research Board. 2507, 1–9.

KARKI, P., LI, R., & BHASIN, A. (2015b). **Quantifying overall damage and healing behavior of asphalt materials using continuum damage approach.** International Journal of Pavement Engineering. 16(4), 350–362.

KIM, Y. R., SEO, Y., KING, M., & MOMEN, M. (2004). **Dynamic modulus testing of asphalt concrete in indirect tension mode.** Transportation Research Record. 1891, 163–173.

KIM, Y.-R., ALLEN, D. H., & LITTLE, D. N. (2005). **Damage-induced modeling of asphalt mixtures through computational micromechanics and cohesive zone fracture.** *Journal of Materials in Civil Engineering*. 17(5), 477–484.

KIM, Y.-R., & ARAGÃO, F. T. S. (2013). **Microstructure modeling of rate-dependent fracture behavior in bituminous paving mixtures.** *Finite Elements in Analysis and Design*. 63, 23–32.

KIM, Y.-R., LITTLE, D. N., & LYTTON, R. L. (2003a). **Fatigue and healing characterization of asphalt mixtures.** *Journal of Materials in Civil Engineering*. 15(1), 75–83.

KIM, Y.-R., LITTLE, D. N., & SONG, I. (2003b). **Effect of mineral fillers on fatigue resistance and fundamental material characteristics.** *Transportation Research Record*. 1832, 03-3454.

KIM, Y.-R., & LITTLE, N. D. (2005). **Development of specification-type tests to assess the impact of fine aggregate and mineral filler on fatigue damage.** Report No. FHWA/TX-05/0-1707-10. Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation and Texas Transportation Institute, 116 p.

LAVASANI, M.; NAMIN, M. L.; FARTASH, H. **Experimental investigation on mineral and organic fibers effect on resilient modulus and dynamic creep of stone matrix asphalt and continuous graded mixtures in three temperature levels.** *Construction and Building Materials*, v. 95, p. 232-242, 2015.

LEE H.-J. (1996). **Uniaxial constitutive modeling of asphalt concrete using viscoelasticity and continuum damage theory.** Ph.D. Dissertation. Raleigh, NC: North Carolina State University.

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

LEE, H.-J., & KIM, Y. R. (1998). **Viscoelastic continuum damage model of asphalt concrete with healing.** *Journal of Engineering Mechanics*, 124 (11), 1224–1232.

LI, Y. (1999). **Asphalt pavement fatigue cracking modeling.** Ph.D. Dissertation. Louisiana State University. Ann Arbor, MI.

MASAD, E. A., ZOLLINGER, C., BULUT, R., LITTLE, D. N., & LYTTON, R. L. (2006). **Characterization of HMA moisture damage using surface energy and fracture properties.** *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*. 75, 713–754.

MASAD, E., CASTELO BRANCO, V. T. F., LITTLE, D. N., & LYTTON, R. (2008). **A unified method for the analysis of controlled-strain and controlled-stress fatigue testing.** *International Journal of Pavement Engineering*. 9(4), 233–246.

MOTAMED, A., BHASIN, A., & IZADI, A. (2012). **Fracture properties and fatigue cracking resistance of asphalt binders**. Research Report n° SWUTC/12/161122-1. University of Texas. Center for Transportation Research. Austin, TX.

NABIZADEH, H. (2015). **Viscoelastic, fatigue damage, and permanent deformation characterization of high rap bituminous mixtures using fine aggregate matrix (FAM)**. Ph.D. Dissertation, University of Nebraska–Lincoln. Lincoln, NE.

PALVADI, N. S. (2011). **Measurement of material properties related to self-healing based on continuum and micromechanics approach**. Ph.D. dissertation, Texas A&M University. Austin, TX.

PALVADI, S., BHASIN, A., & LITTLE, D. N. (2012). **Method to quantify healing in asphalt composites by continuum damage approach**. Transportation Research Record. 2296, 86–96.

PARK, S. W., KIM, Y. R., & SCHAPERY, R. A. (1996). **A viscoelastic continuum damage model and its application to uniaxial behavior of asphalt concrete**. Mechanics of Materials. 24 (4), 241–255.

REESE, R. (1997). **Properties of Aged Asphalt Binder Related to Asphalt Concrete Fatigue Life**. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists. 66, 604–632.

ROWE, G. M. (1993). **Performance of Asphalt Mixtures in the Trapezoidal Fatigue Test**. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists. 62, 344–384.

ROWE, G. M., & BOULDIN, M. G. (2000). **Improved Techniques to Evaluate the Fatigue Resistance of Asphaltic Mixes**. Proc., 2nd Eurasphalt and Eurobitume Congress. Barcelona.

SOARES, L. R. (2018). **Avaliação de misturas asfálticas modificadas com nanopartículas de dióxido de titânio**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande – PB.

SCHAPERY, R. A. (1984). **Correspondence principles and a generalized J integral for large deformation and fracture analysis of viscoelastic media**. International Journal of Fracture. 25, 195–223.

SCHAPERY, R. A. (1990). **A theory of mechanical behavior of elastic media with growing damage and other changes in structure**. J. Mech. Phys. Solids. 38, 215–253.

SONG, I. (2004). **Damage analysis in asphalt concrete mixtures based on parameter relationships**. Ph.D. dissertation, Texas A&M University. College Station, TX.

SOUZA, L. T., KIM, Y. R., SOUZA, F. V., & CASTRO, L. S. (2012). **Experimental testing and finite-element modeling to evaluate the effects of aggregate angularity on bituminous mixture performance**. Journal of Materials in Civil Engineering. 24(3), 249–258.

SOUSA, P., KASSEM, E., MASAD, E., LITTLE, D. (2011). **New Design Method of Fine Aggregates Mixtures and Automated Method for Analysis of Dynamic Mechanical Characterization Data.** Transportation Research Board, Washington, DC.

TONG, Y., LUO, R., & LYTTON, R. L. (2013). **Modeling water vapor diffusion in pavement and its influence on fatigue crack growth of fine aggregate mixture.** Transportation Research Record. 2373. 71–80.

TONG, Y., LUO, R., & LYTTON, R. L. (2015). **Moisture and aging damage evaluation of asphalt mixtures using the repeated direct tensional test method.** International Journal of Pavement Engineering. 16(5), 397–410.

UNDERWOOD, B. S., & KIM Y. R. (2011). **Experimental investigation into the multiscale behavior of asphalt concrete.** International Journal of Pavement Engineering. 12(4), 357–370.

UNDERWOOD, B. S., & KIM, Y. R. (2013). **Effect of volumetric factors on the mechanical behavior of asphalt fine aggregate matrix and the relationship.** International Journal of Pavement Engineering. 14.

VASCONCELOS, K. L., BHASIN, A., & LITTLE, D. N. (2010). **Influence of Reduced Production Temperatures On the Adhesive Properties of Aggregates and Laboratory Performance of Fine Aggregate-Asphalt Mixtures.** International Journal of Road Materials and Pavement Design. 11(1), 47–64.

VASCONCELOS, K. L., BHASIN, A., LITTLE, D. N., & LYTTON, R. L. (2011). **Experimental Measurement of Water Diffusion through Fine Aggregate Mixtures.** Journal of Materials in Civil Engineering. 23(4).

ZHU, J., ALAVI, M. Z., HARVEY J., SUN, L., & HE, Y. (2017) **Evaluating Fatigue Performance of Fine Aggregate Matrix of Asphalt Mix Containing Recycled Asphalt Shingles.** Construction and Building Materials. 139, 203–211.

ZOLLINGER, C. J., (2005). **Application of Surface Energy Measurements to Evaluate Moisture Susceptibility of Asphalt and Aggregates.** Master's Thesis. Texas A&M University. College Station, TX.