



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

INGRIDY MINERVINA SILVA

**ANÁLISE DO DESEMPENHO MECÂNICO DA MATRIZ DE AGREGADOS FINOS
(MAF) E COMPARAÇÃO À SUA MISTURA ASFÁLTICA DE ORIGEM.**

CAMPINA GRANDE - PB

2019

INGRIDY MINERVINA SILVA

**ANÁLISE DO DESEMPENHO MECÂNICO DA MATRIZ DE AGREGADOS FINOS
(MAF) E COMPARAÇÃO À SUA MISTURA ASFÁLTICA DE ORIGEM.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, como parte dos requisitos necessários para encerramento do componente curricular no curso de Engenharia Civil.

Orientadora: Dra. Lêda Christiane de Figueirêdo Lopes Lucena.

Coorientador: MSc. Paulo Germano Tavares Marinho Filho.

CAMPINA GRANDE – PB

2019

AGRADECIMENTOS

A minha mãe, Filismina, por todo carinho e dedicação durante esta caminhada. A minha irmã, Illary, e todos os meus familiares, em especial a minhas tias, Maria das Lágrimas e Maria do Socorro, e tio, Valmaérico, por todo incentivo e confiança.

A minha orientadora, professora Lêda Christiane e ao meu coorientador Paulo Marinho, pela paciência, disponibilidade e colaboração no desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus amigos de longa data, Bruna, Constantino e Maria Clara por todas as vezes que estiveram presentes mesmo que fisicamente distantes.

Aos amigos que a graduação me concedeu o grande privilégio de conhecer, Alisson, Breno e Jessiane, que estiveram presentes nos momentos em que eu pensei em desistir e tornaram esta jornada menos solitária, vocês fizeram de Campina Grande a minha segunda casa, obrigada.

A toda a equipe do Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP) da UFCG, em especial a Ablenya, Joseildo e a Jadilson, pela ajuda no desenvolvimento deste trabalho. A toda a Unidade Acadêmica de Engenharia Civil da UFCG, todos os professores e funcionários, pelo conhecimento e dedicação em todos esses anos de formação.

A Deus, por ser base para todo o resto.

Muito obrigada!

RESUMO

O modal rodoviário é o mais utilizado no Brasil como meio de transporte, sendo este em sua maior parte constituído por pavimentos do tipo flexível, devendo resistir à esforços provenientes do tráfego e ações climáticas durante toda sua vida útil. Uma das maneiras de estudar o desempenho dos pavimentos flexíveis e caracterizar seus materiais ocorre por meio da sua Matriz de Agregados Finos (MAF). As vantagens da MAF é que ela apresenta resultados mais homogêneos em ensaios laboratoriais, utilizando uma menor quantidade de materiais. O presente trabalho teve por objetivo estabelecer uma correlação entre o desempenho mecânico da MAF e o comportamento da sua Mistura Asfáltica Completa (MAC) de origem. Para isto, foram realizados ensaios mecânicos como: Resistência a tração por compressão diametral (RT), Fadiga por compressão diametral à tensão controlada, Módulo de resiliência (MR), *Flow Number* (FN) e Módulo dinâmico (MD) e com isso foram propostas equações por meio de extrapolação gráfica. Os resultados obtidos para a MAC apresentaram desempenho superior ao da MAF em todos os ensaios realizados. Para o MD a curva fornecida pela MAF se aproxima da MAC e apresenta resultados mais homogêneos. As equações obtidas apontam para a viabilidade da utilização da MAF para previsão do comportamento da MAC por apresentarem valores elevados de R^2 . Conclui-se que as propriedades da MAF apresentam boas correlações com as da MAC, pois as equações propostas neste trabalho apresentam pequenas dispersões quando utilizadas com materiais e dosagens semelhantes. Entretanto, para sua validação são necessários testes com um número maior de dados.

Palavras-chave: Matriz de Agregados Finos, Mistura Asfáltica, Propriedades Mecânicas.

ABSTRACT

The road mode is the most used in Brazil as a means of transport, being this mostly composed of flexible type pavements and must resist the efforts from traffic and climate actions during all its useful life. One of the ways to study the performance of flexible pavements and to characterize their materials is by means of their Fine Aggregate Matrix (FAM). The advantages of FAM are that it presents more homogeneous results in laboratory tests, using fewer materials. The present work had as objective to establish a correlation between the mechanical performance of the FAM and the behavior of its original Complete Asphalt Mix (CAM). For this, mechanical tests were carried out as: Traction Resistance (TR), Diametral Compression Fatigue, Resilience Module (RM), Flow Number (FN) and Dynamic Module (DM) and thus, equations were proposed through graphic extrapolation. The results obtained for CAM presented superior performance to the FAM in all the performed tests. For the DM, the curve supplied by FAM approaches the CAM and presents more homogeneous results. The obtained equations point to the feasibility of using the FAM to predict the behavior of CAM because they present high values of R^2 . It is concluded that the properties of FAM have good correlations with the CAM, since the equations proposed in this work present small dispersions when used with similar materials and dosages. However, its validation requires tests with a larger number of data.

Keywords: Fine Aggregate Matrix, Asphalt Mixture, Mechanical Properties.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação de asfalto com deformação permanente em trilha de rodas.	15
Figura 2 - Representação de asfalto com trincamento por fadiga avançado.	16
Figura 3 - Estágios do processo de fadiga.	17
Figura 4 - Equação proposta por Rodrigues (2018) para o RT.	20
Figura 5 - Equação proposta por Rodrigues (2018) para os valores de MR.	20
Figura 6 - Moldes utilizados por Kim et al. (2003).	22
Figura 7 - Confeção das amostras de MAF por Castelo Branco (2008).	22
Figura 8 - Princípio proposto por Karki (2010).	24
Figura 9- Representação do método de Coutinho (2012).	26
Figura 10 - Fluxograma com as etapas de realização da pesquisa.	27
Figura 11 - Distribuição granulométrica dos agregados.	29
Figura 12 - Curvas granulométricas da MAC e da MAF.	30
Figura 13 - Execução do RT.	32
Figura 14 - Corpo de prova após execução do RT.	33
Figura 15 - Corpo de prova submetido ao ensaio de módulo de resiliência.	34
Figura 16 - Corpos de prova utilizados para o ensaio de MD.	35
Figura 17 - AMPT – Asphalt Mixture Performance Tester.	36
Figura 18 - Execução do ensaio de fadiga por compressão diametral.	36
Figura 19 - Correlação utilizada.	37
Figura 20 - Resultado do ensaio de resistência a tração por compressão diametral.	38
Figura 21 - Resultados do Módulo de Resiliência das misturas estudadas.	39
Figura 22 - Curva mestra para a MAC (SOARES, 2018).	40
Figura 23 - Curva mestra para MAF.	40

Figura 24 - Curvas mestras reunidas.	41
Figura 25 - Módulo Dinâmico 4 °C.....	41
Figura 26 - Módulo Dinâmico 21 °C.....	42
Figura 27 - Módulo Dinâmico 37 °C.....	42
Figura 28 - Ângulo de fase 4 °C.....	43
Figura 29 - Ângulo de fase 21 °C.....	43
Figura 30 - Ângulo de fase 37 °C.....	44
Figura 31 - Resultados do ensaio de <i>Flow Number</i>	45
Figura 32 - Vida de fadiga.....	46
Figura 33 - Equações propostas para o RT.....	49
Figura 34 - Equação proposta para o MR.....	50
Figura 35 - Equação proposta para o <i>Flow Number</i>	51
Figura 36 - Equação proposta para o MD (4 °C).....	51
Figura 37 - Equação proposta para o MD (21 °C).....	52
Figura 38 - Equação proposta para o MD (37 °C).....	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Caracterização do ligante asfáltico (CAP 50/70).....	28
Tabela 2. Propriedades dos agregados utilizados em estudo.....	28
Tabela 3. Porcentagem em massa dos agregados da MAC.	29
Tabela 4. Granulometria dos materiais estudados.	30
Tabela 5. Resumo dos parâmetros de dosagem da MAC.	31
Tabela 6. Composição dos corpos de prova moldados de MAF.	32
Tabela 7. Resumo de cálculos para a vida de fadiga das amostras.	47
Tabela 8. Valores esperados e experimentais para o RT.	47
Tabela 9. Valores experimentais e teóricos para o MR.	48
Tabela 10. Resumo dos parâmetros propostos.	49
Tabela 11. Resumo dos parâmetros obtidos para o MR.	50

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
AMPT	<i>Asphalt Mixture Performance Tester</i>
ASTM	American Society for Testing and Materials
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CNT	Confederação Nacional de Transportes
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EVA	Etileno Acetato de Vinila
FTIR	<i>Fourier Transform Infrared Spectroscopy</i>
FN	<i>Flow Number</i>
LAS	<i>Linear Amplitude Sweep</i>
LVDT	<i>Linear Variable Differential transformer</i>
MAC	Mistura Asfáltica Completa
MAF	Matriz de Agregados Finos
MD	Módulo Dinâmico
MR	Módulo de Resiliência
NBR	Norma Técnica
PPA	Ácido Polifosfórico
RT	Resistência à Tração
SARA	Saturados, Aromáticos, Resinas e Asfaltenos
TMN	Tamanho Máximo Nominal
UTM	<i>Universal Testing Machine</i>
UV	Ultravioleta
$\Delta\sigma$	Tensão Máxima Horizontal e Vertical
σ	Tensão de Tração
$\tau\varepsilon$	Deformação Específica Recuperável
ε_i	Deformação Específica Resiliente

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
	1.1 Objetivos	13
	1.1.1. Objetivo geral	13
	1.1.2. Objetivos específicos.....	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
	2.1 Principais problemas em pavimentos flexíveis.....	14
	2.1.1 Deformação permanente.....	14
	2.1.2 Dano por fadiga.....	15
	2.2 Matriz de Agregados Finos (MAF)	17
	2.2.1 Correlações entre a MAF e a MAC.....	18
	2.3 Dosagem da MAF.....	21
	2.3.1 Método proposto por Kim et al. (2003).....	21
	2.3.2 Método proposto por Castelo Branco (2008).....	22
	2.4.3 Método proposto por Karki (2010)	23
	2.4.4 Método proposto por Sousa et al (2011)	24
	2.4.5 Método proposto por Coutinho (2012).....	25
3	MATERIAIS E MÉTODOS	27
	3.4 Materiais	27
	3.4.3 Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP)	27
	3.4.4 Agregados.....	28
	3.5 Granulometria da Matriz de Agregados Finos (MAF)	29
	3.6 Dosagem da Matriz de Agregados Finos (MAF).....	31
	3.7 Compactação dos Corpos de Prova (CPs)	31
	3.8 Resistência à tração por compressão diametral.....	32

3.9	Módulo de resiliência (MR).....	33
3.10	Módulo dinâmico (MD)	34
3.11	<i>Flow Number</i> (FN).....	35
3.12	Fadiga por compressão diametral à tensão controlada.....	36
3.13	Extrapolação gráfica dos dados da MAF para a MAC	37
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	38
4.4	Ensaio Mecânicos	38
4.4.3	Resistência à Tração por Compressão Diametral (RT).....	38
4.4.4	Módulo de Resiliência (MR).....	39
4.4.5	Módulo Dinâmico (MD)	39
4.4.6	Flow Number (FN).....	44
4.4.7	Fadiga por Compressão Diametral à Tensão Controlada.....	45
4.5	Previsão proposta por Rodrigues (2018)	47
4.5.3	Análise da previsão proposta por Rodrigues (2018) para o RT.	47
4.5.4	Análise da previsão proposta por Rodrigues (2018) para o MR.	47
4.6	Correlações obtidas nesta pesquisa	48
4.6.3	Equação proposta para o RT	48
4.6.4	Equação proposta para o MR	49
4.6.5	Equação proposta para o FN	50
4.6.6	Equação proposta para o MD	51
5	CONCLUSÃO	53
5.4	Sugestões de pesquisas futuras	54
	REFERÊNCIAS	55

1 INTRODUÇÃO

Segundo a Confederação Nacional de Transportes (CNT) o modal rodoviário é o mais utilizado no Brasil, representando 60% do transporte de cargas e 90% do transporte de passageiros em 2018. Porém, 50% das rodovias brasileiras são classificadas como regulares, ruins ou péssimas, comprometendo o seu desempenho e segurança.

Entre os problemas que comprometem o desempenho do pavimento estão a deformação permanente, o dano por fadiga e o envelhecimento sofrido pelo pavimento. Segundo Coutinho (2012), estes tipos de danos são causados, principalmente, pelo tráfego de veículos assim como pelas mudanças climáticas a que o pavimento estará exposto, fatores estes que estarão presentes durante toda a vida útil do material.

Uma das formas de analisar a influência destes fenômenos na mistura asfáltica ocorre por meio do estudo da sua Matriz de Agregados Finos (MAF) como ficou comprovado em pesquisas como Kim et al. (2003), Zollinger (2005) e Castelo Branco (2008). A MAF pode fornecer menores variações em seus resultados, por se tratar de um meio mais homogêneo, utilizando uma menor quantidade de materiais.

A MAF pode ser definida como a mistura composta por agregados finos, fíler e ligante asfáltico e alguns pesquisadores tentaram compreender qual seria a real proporção de materiais finos por meio da identificação do seu tamanho máximo nominal (TMN) (Aragão et al., 2010; Underwood & Kim, 2011). No Brasil, Coutinho (2012) e Freire (2017) classificaram o TMN da MAF como sendo o dos materiais passantes na peneira #10 (2mm).

Os estudos sobre a matriz fina das misturas asfálticas como intermédio para estimar o comportamento da Mistura Asfáltica Completa (MAC) que é composta por agregados graúdos e miúdos, fíler e ligante asfáltico, surgiu a partir do fundamento de que o dano por fadiga, que compromete a mistura completa, está diretamente relacionado com a sua MAF (ZHU et al., 2017).

Rodrigues (2018) afirma que o conhecimento sobre a resistência à fadiga das MAFs e o quanto ela influencia no comportamento da MAC, auxiliam nas escolhas e combinações dos materiais, para formar misturas mais resistentes. A correlação observada entre as propriedades da MAF e da MAC em estudos relacionados ao dano por umidade, fadiga e deformação permanente torna satisfatório o uso da matriz fina para previsão do comportamento da mistura completa.

Portanto, este trabalho tem por objetivo estabelecer uma correlação entre o desempenho mecânico obtido para MAF com o da sua MAC de origem

1.1 OBJETIVOS

1.1.1. *Objetivo geral*

O presente trabalho tem por objetivo estabelecer uma correlação entre o desempenho mecânico da Matriz de Agregados Finos (MAF) e o da sua Mistura Asfáltica Completa (MAC) de origem.

1.1.2. *Objetivos específicos*

Como objetivos específicos deste trabalho, pode-se destacar:

- avaliar o desempenho mecânico da MAF em metodologias convencionais como: Resistência a tração por compressão diametral (RT), Fadiga por compressão diametral a tensão controlada, Módulo de resiliência (MR), Flow Number (FN) e Módulo dinâmico (MD);
- comparar o desempenho mecânico da MAF com a sua MAC de origem;
- propor equações para previsão do comportamento da MAC por meio da MAF;
- comparar o desempenho mecânico da MAF com o previsto por Rodrigues (2018).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são abordados temas relevantes para o desenvolvimento deste trabalho. Primeiramente, é feita uma abordagem sobre os principais problemas enfrentados pelos pavimentos flexíveis. Em seguida é feita uma apresentação sobre os principais conceitos a respeito da Matriz de Agregados Finos (MAF) e por fim, foram abordados os métodos de dosagem para a MAF.

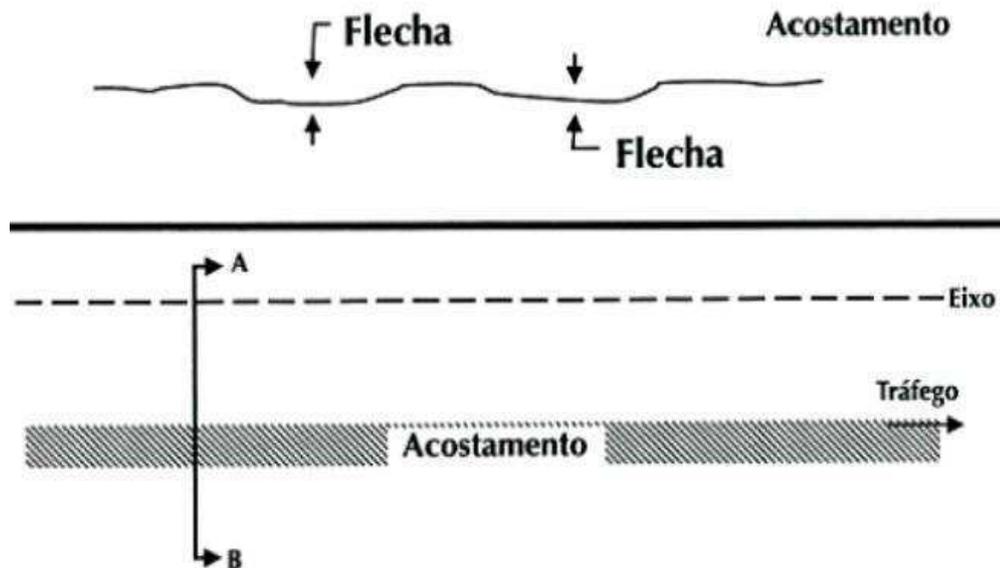
2.1 PRINCIPAIS PROBLEMAS EM PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

Existem vários tipos de defeitos que influenciam no desempenho dos pavimentos flexíveis (afundamento, ondulação, escorregamento, exsudação, desgaste, buracos ou panelas e remendos) e que estão especificados na norma do DNIT 005/2003. Entre estes, os principais problemas estruturais presentes nos pavimentos asfálticos e que podem comprometer sua vida útil são a deformação permanente e o dano por fadiga. Segundo Coutinho (2012) estes problemas são afetados pelo teor de ligante, pelas características apresentadas pelos agregados (forma, tamanho e distribuição de partículas) e pelas propriedades da interface ligante-agregado.

2.1.1 *Deformação permanente*

O principal exemplo de deformação permanente é a deformação nas trilhas de rodas (Figura 1) que consiste em uma distorção que se manifesta em depressões longitudinais e é decorrente da densificação dos materiais ou, principalmente, de ruptura por cisalhamento (ODA, 2000). O melhor desempenho dos pavimentos quanto a deformação permanente, isto é, sua resistência ao cisalhamento, está relacionado a estrutura dos agregados e também com a rigidez do ligante utilizado.

Figura 1 - Representação de asfalto com deformação permanente em trilha de rodas.



Fonte: Adaptado de Ribeiro (2017)

A deformação permanente pode ser evitada com seleção criteriosa dos materiais, compactação adequada e um bom projeto estrutural que venha a limitar as tensões atuantes aos níveis seguros (BERNUCCI et al., 2010). O aumento da resistência à deformação permanente acarreta no aumento da vida útil do pavimento e, com isso, a redução de custos adicionais com manutenção e obras de reparação.

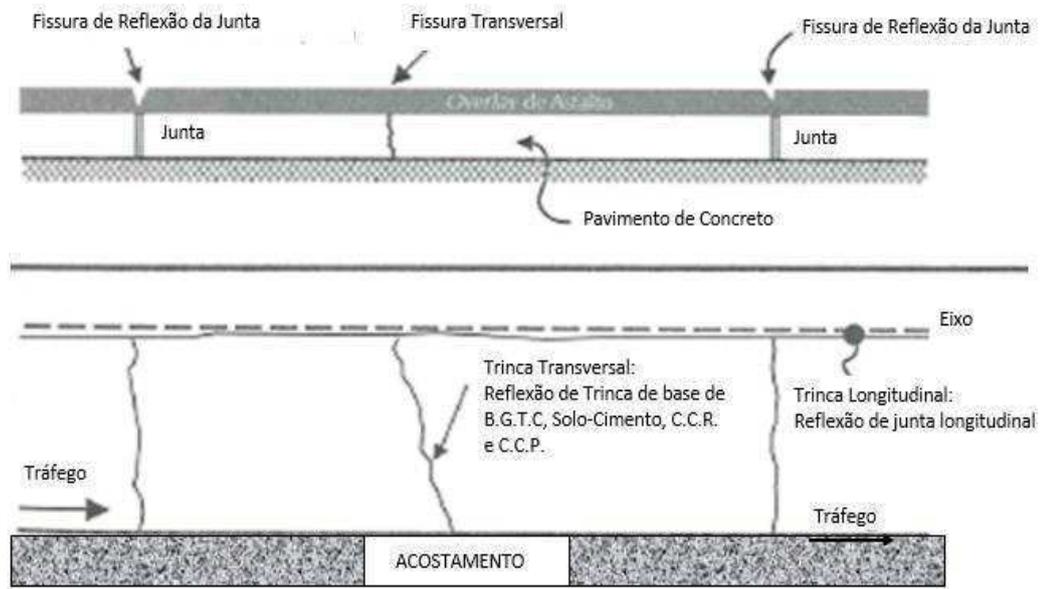
2.1.2 Dano por fadiga

O fenômeno da fadiga influencia no desempenho e durabilidade dos pavimentos flexíveis. Estudos como Santos (2005), Cavalcanti (2010) e Nuñez (2013) apontaram para a preocupação em tornar o pavimento mais resistente ao fenômeno da fadiga analisando a influência de características da mistura como o tipo de ligante e o volume de vazios. Além disso, estes apontaram modificadores (etileno acetato de vinila (EVA), ácido polifosfórico (PPA) e borracha de pneu moída) para alterar as características do ligante, obtendo melhores resultados de vida de fadiga.

O dano por fadiga (Figura 2) consiste na formação de microtrincas que se propagam até formar macrotrincas. Esse fenômeno ocorre devido a exposição a carregamentos cíclicos. Estas cargas ocasionam falhas nos materiais para valores de tensão mais baixos do que os ocasionados por cargas estáticas e produzem danos intermitentes, isto é, na fase de

carregamento o dano cresce e no descarregamento se mantém constante (BERNUCCI et al., 2010).

Figura 2 - Representação de asfalto com trincamento por fadiga avançado.



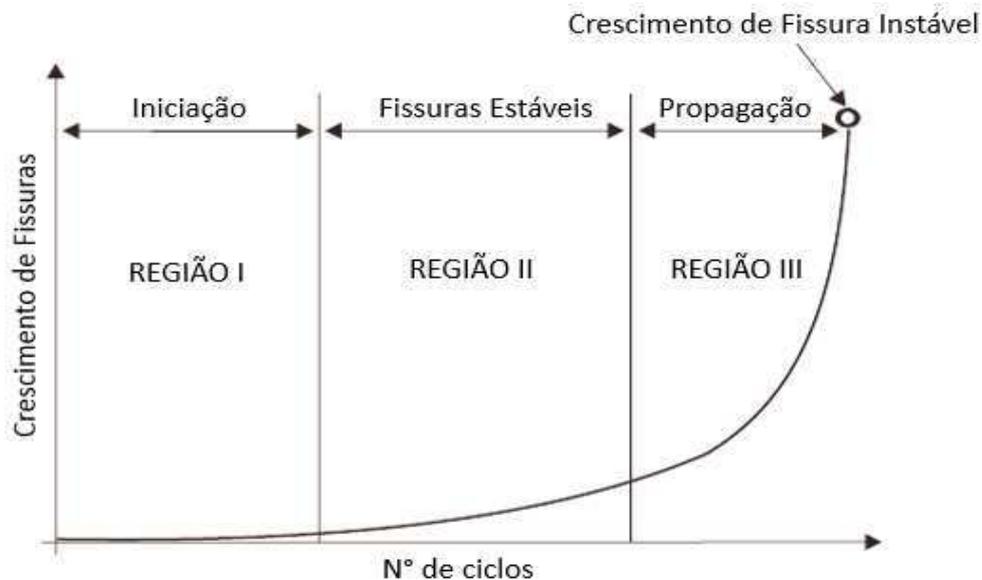
Fonte: Adaptado de Ribeiro (2017)

As trincas por fadiga se originam nas camadas inferiores do pavimento e se propagam levando o material a ruptura total. Este fenômeno está diretamente ligado ao envelhecimento sofrido pelo ligante, seu tipo e qualidade, além das condições climáticas e da mistura asfáltica utilizada (ARAO, 2014). Além disso, as cargas repetidas devido ao fluxo de veículos influenciam no seu processo de deterioração estrutural, sendo esta a principal causa da redução de desempenho estrutural dos pavimentos.

Em uma estrutura sujeita a carregamentos cíclicos, os estágios do processo de fadiga podem ser diferenciados em três regiões (BERNUCCI et al., 2010), descritas abaixo e representadas na Figura 3:

- região I: formam-se microfissuras, a densidade dos deslocamentos cresce e as zonas de danos irreversíveis se iniciam;
- região II: caracterizada pelas microfissuras originadas da coalescência das microfissuras;
- região III: crescimento pelas microfissuras conduzindo rapidamente ao colapso total.

Figura 3 - Estágios do processo de fadiga.



Fonte: Bernucci et al. (2010)

A vida de fadiga de uma mistura asfáltica pode ser definida em números de ciclos que expressa o número necessário de repetições de uma carga para reduzir o desempenho até um critério de ruptura pré-estabelecido em porcentagem de perda de rigidez. Os principais ensaios desenvolvidos recentemente para entender melhor o comportamento à fadiga do ligante asfáltico são o de varredura de tempo (*time sweep*) e o de varredura de amplitude linear (LAS).

2.2 MATRIZ DE AGREGADOS FINOS (MAF)

Segundo Klug e Faxina (2017) a Matriz de Agregados Finos (MAF) é composta pela mistura entre os agregados finos, o fíler e o ligante asfáltico, obtendo-se uma mistura mais homogênea que a mistura completa, o que implica em uma redução na variabilidade dos resultados encontrados em ensaios. A MAF representa uma escala intermediária entre o mástique (combinação formada por ligante asfáltico, fíler e ar) e a Mistura Asfáltica Completa (MAC) possibilitando a obtenção de resultados mais satisfatórios e representativos nos estudos realizados com este material quando comparados, por exemplo, aos obtidos com o uso do mástique.

Alguns pesquisadores tentaram compreender qual seria a real proporção e o Tamanho Máximo Nominal (TMN) dos materiais que compõem as MAFs, Underwood e Kim (2011) estudaram o uso da peneira com abertura de 2,38 mm com base na teoria do empacotamento,

que afirma que o diâmetro ideal do agregado é aquele que se ajusta ao espaço gerado pelo agregado graúdo, em que este espaço é representado pela divisão do TMN do agregado graúdo por três.

Embora nos padrões americanos a peneira com abertura de #16 (1,18 mm) tenha sido mais utilizada para trabalhos com a MAF, no Brasil, mais recentemente, Coutinho (2012) classificou como parte da MAF, os materiais passantes na peneira com abertura de 2 mm. Freire et al. (2017) avaliou o efeito de diferentes graduações nas propriedades da MAF e concluiu que a mistura com um tamanho nominal máximo dos agregados de 2,00 mm apresenta uma tendência de danos semelhantes às da MAC com tamanho agregado máximo de 12,50 mm.

Os estudos sobre a parte fina das misturas asfálticas como intermédio para estimar o comportamento da mistura completa, surgiu a partir do fundamento de que o dano por fadiga, que compromete a mistura completa, está diretamente relacionado com a sua MAF (ZHU et al.,2017). As fraturas se desenvolvem a partir da presença de microtrincas, na interface agregado e ligante ou até mesmo no próprio ligante, que se propagam até formar macrotrincas.

Rodrigues (2018) afirma que o conhecimento sobre a resistência à fadiga da MAF e o quanto ela influencia no comportamento da mistura asfáltica, auxiliam nas escolhas e combinações dos materiais, para formar misturas mais resistentes. A correlação observada entre as propriedades da MAF e da MAC em estudos relacionados ao dano por umidade, fadiga e deformação permanente torna satisfatório o uso da matriz fina para previsão do comportamento da mistura completa.

2.2.1 Correlações entre a MAF e a MAC

Alguns pesquisadores tentaram estabelecer correlações entre o comportamento da MAF e sua real influência no desempenho da MAC, entre estes, Gudipudi e Underwood (2015) estudaram o comportamento da MAF para melhorar o potencial de desempenho da mistura completa avaliando ensaios mecânicos de módulo e o dano por fadiga. Ao fazerem a comparação entre as respostas mecânicas das misturas testadas observaram a existência de relação entre seus comportamentos, onde a MAF e a MAC correspondente forneceram curvas de módulo que exibem dependência semelhante com as frequências utilizadas. Para os testes com fadiga, os autores constataram que a MAF pode resistir a deformações muito mais elevadas para uma mesma vida de fadiga.

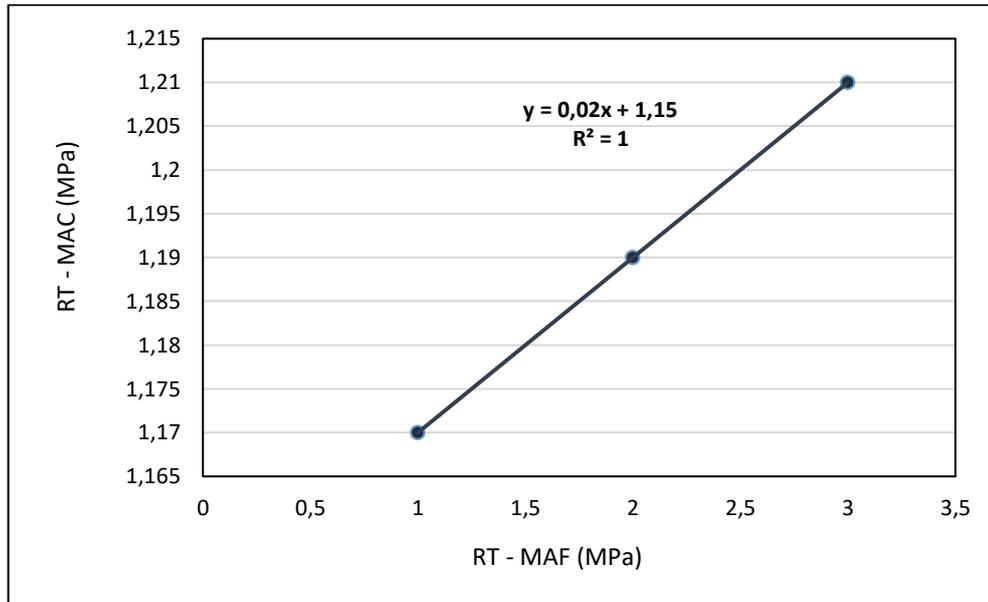
Underwood e Kim (2011) confeccionaram diferentes tipos de MAF analisando sua correlação com a mistura completa por meio dos resultados de módulo dinâmico e ângulo de fase, os autores obtiveram valores similares entre as amostras ensaiadas. Assim, devido a semelhança encontrada entre a MAF e sua MAC, os autores concluíram que ambos os materiais apresentam tendências de comportamento similar em diferentes situações de ensaio.

Todas as pesquisas citadas contribuem para a percepção da importância da análise das propriedades da matriz fina como mecanismo para estimar o comportamento da mistura asfáltica completa fornecendo meios para uma seleção mais criteriosa dos materiais utilizados e de seu desempenho.

Rodrigues (2018) introduziu em sua pesquisa uma comparação entre o comportamento da MAF e da MAC, produzidas com o mesmo ligante (CAP 50/70) e com os mesmos agregados provenientes da britagem de rocha calcária e com tamanho máximo nominal de 19 mm. O autor realizou ensaios mecânicos para Resistência à tração (RT), Módulo de Resiliência (MR), *creep estático* e fadiga por compressão diametral à tensão controlada e obteve resultados aproximados para as duas misturas ensaiadas o que pode ser verificado em valores próximos de inclinação para a curva de vida de fadiga que sugere um comportamento similar dos materiais em campo.

A Figura 4 apresenta a correlação entre os resultados da MAF e da MAC, para o RT, obtidos por Rodrigues (2018). Nela pode-se perceber um bom ajuste linear já que os pontos analisados apresentam pequena discrepância entre seus valores e $R^2=1$.

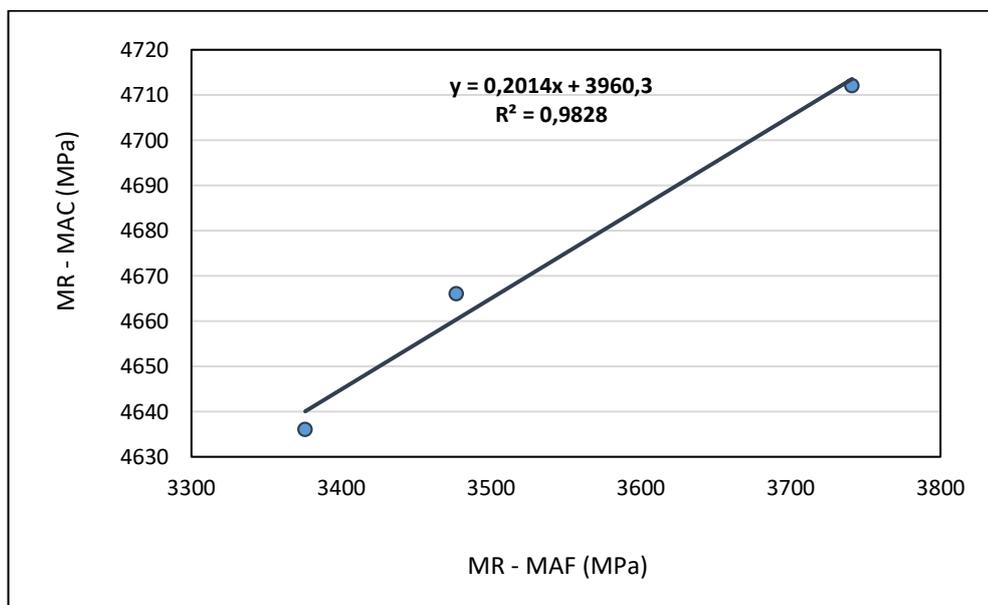
Figura 4 - Equação proposta por Rodrigues (2018) para o RT.



Fonte: Adaptado de Rodrigues (2018)

A Figura 5 apresenta a equação proposta por Rodrigues (2018) para o ensaio de Módulo de Resiliência (MR). Pode-se perceber que os resultados apresentam pequena dispersão expressos no valor alto de $R^2 = 0,9828$.

Figura 5 - Equação proposta por Rodrigues (2018) para os valores de MR.



Fonte: Adaptado de Rodrigues (2018)

Entretanto, um dos grandes problemas para utilização da MAF está na sua dosagem devido à ausência de normativas de um método ou procedimento que caracterizem a MAF com a representatividade necessária para a fração fina da mistura completa.

2.3 DOSAGEM DA MAF

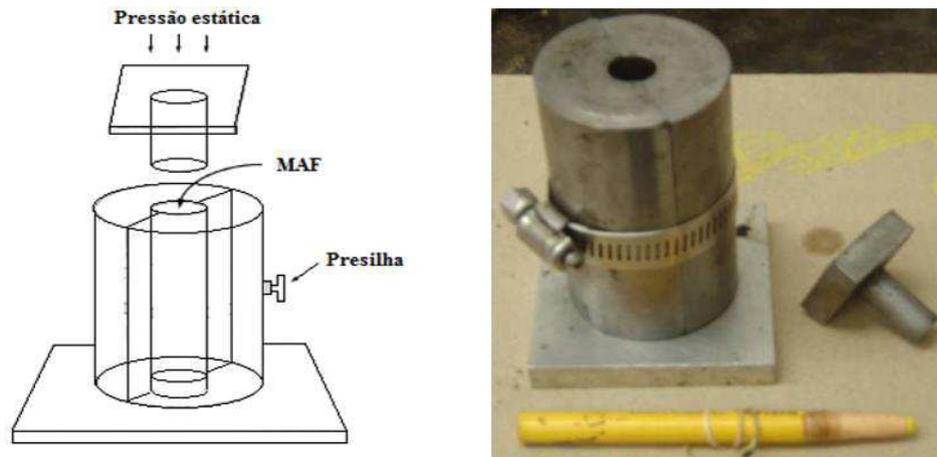
Pesquisadores como Kim et al. (2003), Castelo Branco (2008), Karki (2010) e Coutinho (2012), adaptando o método proposto por Souza et al. (2011), desenvolveram métodos experimentais para dosagem da MAF. Lima (2018) comprovou que todos os métodos listados apresentam valores distintos de dosagem para a MAF, onde a não consideração da porcentagem de ligante aderida aos agregados graúdos no método de Castelo Branco (2008) e a consideração desta fração nos outros métodos fornecem essa diferença.

2.3.1 *Método proposto por Kim et al. (2003)*

Os autores que sugeriram este método foram pioneiros no estudo da dosagem da Matriz de Agregados Finos (MAF). O método consiste em fixar um teor de CAP de 8% em massa, de forma arbitrária e sem levar em consideração características dos materiais como a granulometria e o tipo de agregado utilizado. Para os autores, o teor de 8% corresponde a quantidade de ligante necessária para obter uma espessura de aproximadamente 10 μm . A metodologia utilizada é semelhante ao processo realizado para a MAC tendo como base a norma americana ASTM 4402 (2002).

O tamanho de agregado utilizado neste método é o correspondente ao passante na peneira #16, peneira esta que não se encontra em uso no Brasil. Após a mistura, os autores propuseram a compactação em moldes especialmente confeccionados para a para o estudo em questão, com 12 mm de diâmetro e 50 mm de altura, o molde está representado na Figura 6.

Figura 6 - Moldes utilizados por Kim et al. (2003).



Fonte: Coutinho (2012)

2.3.2 Método proposto por Castelo Branco (2008)

A partir da metodologia proposta por Castelo Branco (2008) introduziu-se o conceito de que a dosagem da MAF deveria ser realizada a partir de amostras da própria MAC obtidas com o compactador giratório. Além disso, este método propunha analisar a matriz fina da mistura asfáltica e não apenas a importância do tipo e teor de fíler.

Na dosagem pelo método da Castelo Branco (2008) a porcentagem de ligante asfáltico é definida a partir do cálculo da quantidade de ligante que é necessária para recobrir totalmente os agregados graúdos, miúdos e o fíler. Após a determinação da porcentagem de ligante as amostras de MAF são confeccionadas, este processo está representado na Figura 7.

Figura 7 - Confeccção das amostras de MAF por Castelo Branco (2008).



Fonte: Castelo Branco (2008)

Os passos para execução do método de dosagem de Castelo Branco (2008) estão resumidos nos passos a seguir:

- obter as relações características da MAC, como: massa da amostra, curva granulométrica, percentual de agregados passante na peneira #16 (%pass#16), teor de ligante (% P_{bMAC}) e massa de ligante (W_b), utilizando-se a Equação (1);
- quantificar a massa de agregados presentes na MAC que passa na peneira #16 ($W_{agg(MAF)}$) utilizando a Equação (2) e assim elaborar a curva granulométrica da MAF, mantendo-se as mesmas proporções da MAC para cada agregado passa na peneira #16;
- estabelecer a massa total (W_{CP}) que vai ser utilizada na produção das amostras cilíndricas (90x150 mm);
- obter a massa de cada fração de agregado que é necessária para compor a massa de agregados de MAF ($W_{agg(MAF)}$);
- Calcular o teor de ligante presente na MAF (% P_{bMAF}) e a massa de ligante necessária para moldar as amostras cilíndricas de MAF (W_{bMAF}) por meio das Equação (3) e (4).

$$W_b = W_{MAC} \times \%P_{bMAC} \quad \text{Equação (1)}$$

$$W_{agg(MAF)} = \%pass\#16 \times W_{MAC} \quad \text{Equação (2)}$$

$$\%P_{bMAF} = \frac{W_b}{W_{agg(MAF)} + W_b} \quad \text{Equação (3)}$$

$$W_{bMAF} = W_{CP} \times \%P_{bMAF} \quad \text{Equação (4)}$$

2.4.3 Método proposto por Karki (2010)

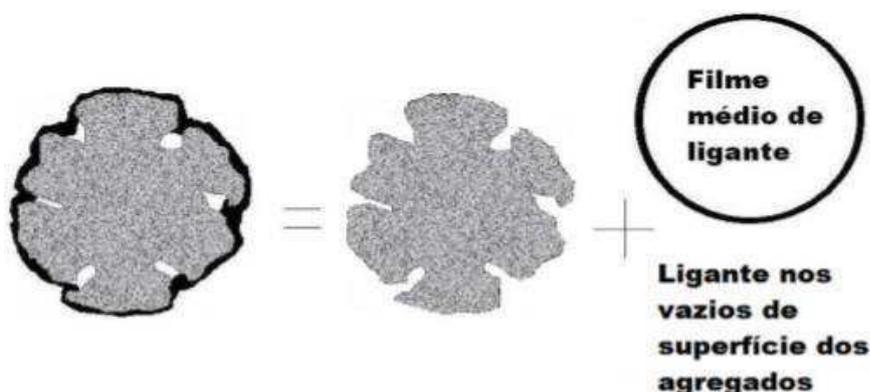
O método proposto por Karki (2010) é um método semiempírico que consiste em calcular a massa de ligante que envolve os agregados graúdos (retidos na peneira #16) e subtraí-la da massa total de ligante na mistura completa. Logo, a massa resultante representa a

quantidade de finos presente na mistura (passantes na peneira #16) e, dividida pela massa desses agregados, equivalente ao teor de ligante presente na MAF.

A massa de ligante aderida nos agregados graúdos é composta por duas quantidades distintas, sendo elas a parte 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.

Assim, as propriedades utilizadas dos materiais 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, as mais importantes verificadas são a adoção de uma espessura de filme de ligante arbitrária para obter um valor de $12\mu\text{m}$ e a consideração de que os vazios de superfície dos agregados são preenchidos de forma que o agregado passe a apresentar um volume efetivo, sendo este considerado como a média entre o volume real e o volume aparente, este processo está representado na Figura 8.

Figura 8 - Princípio proposto por Karki (2010).



Fonte: Coutinho (2012)

2.4.4 Método proposto por Sousa et al (2011)

Sousa et al. (2011) propuseram um método de dosagem da MAF baseado no mesmo princípio de Castelo Branco (2008) onde a proporção de agregados finos na composição granulométrica da MAF se mantém igual ao encontrado na MAC. Porém, com este método os agregados finos foram normalizados com respeito a maior peneira utilizada na dosagem da MAF (#16). Para determinar o teor de ligante, é realizada uma separação experimental da

porção fina (agregados menores que 1,18 mm) da porção graúda, de acordo com os passos resumidos a seguir:

- são preparadas três misturas soltas da MAC que são submetidas há um período de duas horas em estufa a 135 +/- 5 °C para o envelhecimento;
- submetem-se as misturas soltas a um resfriamento de uma hora, destorroando os possíveis grumos com as mãos durante o meio do processo;
- as misturas soltas são passadas nas peneiras #4, #8 e #16, separando-as em grupos de acordo com tamanho, sendo que o grupo um corresponderia aos materiais de maior diâmetro, enquanto que o grupo quatro o de menor tamanho;
- a seguir os materiais são secos na estufa em uma temperatura de 110 °C e cada grupo é posteriormente inserido em um recipiente, onde há o registro da massa do recipiente (W_p) e da massa do recipiente com o material (W_{MI});
- a extração do ligante é realizada com a inserção dos recipientes em uma estufa de ignição e registra-se a nova massa do recipiente em cada grupo (W_{AI});
- com isso, é possível calcular o teor do ligante para cada grupo com a fórmula da Equação (5).

$$P_{Bi} = \frac{W_{MI} - W_{AI}}{W_{MI} - W_p} \quad \text{Equação (5)}$$

As amostras de MAF são produzidas tais quais o método proposto por (Castelo Branco, 2008), variando apenas a altura obtida para as amostras produzidas pelo compactador giratório, altura de 85 mm.

2.4.5 Método proposto por Coutinho (2012)

O método de Coutinho (2012) é o mais recentemente utilizado para dosagens de MAF e consiste na utilização de ensaios de granulometria de agregados graúdos e miúdos (DNER-ME 083-94) e na extração de ligante com o uso do Rotarex, (DNER-ME 053-94), adaptando o método de dosagem de Sousa et al. (2011).

A dosagem e confecção da MAC, resfriada à temperatura ambiente, é necessária para estimar o teor de ligante da MAF seguindo os passos descritos a seguir e representados na Figura 9:

- primeiramente é realizado o fracionamento da mistura solta (após resfriada) na peneira #10, em duas massas distintas: a porção retida (agregados graúdos envoltos por mástique e agregados miúdos envoltos por ligante e aderidos aos agregados graúdos) e a porção passante (agregados miúdos envoltos por ligante);
- após isso é feita a extração de ligante para cada uma das frações obtidas. Com isso, calcula-se a massa total retida na peneira #10 ($M_{\#10ret}$), a massa de ligante 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, $M_{pass < 2,00mm} = M_{\#10pass} - M_{ligpass}$;
- assim, é feito fracionamento da massa de agregados contidos na porção da mistura retida na peneira #10 para obtenção de duas massas: massa de agregados graúdos ($M_{ret > 2,00 mm}$) e massa de agregados miúdos aderida aos agregados graúdos ($M_{ret < 2,00 mm}$).

Figura 9- Representação do método de Coutinho (2012).



Fonte: Coutinho (2012)

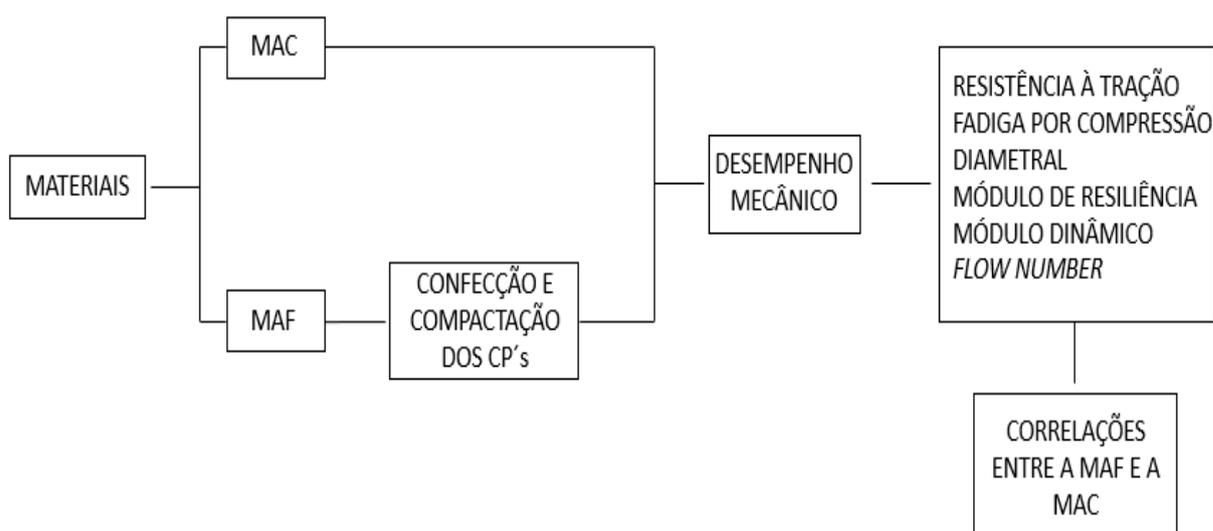
Assim, o teor de ligante é obtido seguindo a Equação 6 a seguir.

$$T_{MAF} = T_{PASSANTE} = \frac{\text{MASSA DE LIGANTE PASSANTE NA \#10}}{\text{MASSA TOTAL PASSANTE NA \#10}} \quad \text{Equação (6)}$$

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo aborda os materiais e métodos a serem utilizados para o desenvolvimento desta pesquisa. A Figura 10 apresenta um fluxograma com as etapas utilizadas. Primeiramente os corpos de prova de MAF são confeccionados e consecutivamente submetidos a ensaios mecânicos em metodologias convencionais. Com isso, são testadas correlações propostas em literaturas e sugeridas novas correlações com base nos dados deste trabalho.

Figura 10 - Fluxograma com as etapas de realização da pesquisa.



3.4 MATERIAIS

Os materiais utilizados neste trabalho têm suas características especificadas nos tópicos seguintes.

3.4.3 Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP)

O CAP 50/70 utilizado foi cedido pelo grupo Rocha Calvacante que está localizado na cidade de Campina Grande, Paraíba. A caracterização do ligante utilizado foi realizada por meio de ensaios de penetração, ponto de amolecimento e viscosidade rotacional, observando o efeito do envelhecimento nas características do ligante. A Tabela 1 apresenta os resultados obtidos para a caracterização do ligante, todos os parâmetros encontram-se de acordo com o previsto para classificá-lo como CAP 50/70.

Tabela 1. Caracterização do ligante asfáltico (CAP 50/70).

Características	Norma	Especificação	Resultado	Unidade
Penetração	DNIT 155/2010-ME	50 a 70	53	0,1 mm
Ponto de Amolecimento	DNIT 131/2010-ME	> 46	53	°C
Viscosidade Brookfield 135°C SP21	NBR 15184/2005	> 274	487	cP
Viscosidade Brookfield 150°C SP21	NBR 15184/2005	> 112	248	cP
Viscosidade Brookfield 177°C SP21	NBR 15184/2005	> 56	93	cP
RTFOT – Penetração Retida	NBR 6576	>55	68	%
RTFOT – Aumento do Ponto de amolecimento	NBR 6560	< 8	7	°C

Fonte: Ferreiro (2018)

3.4.4 Agregados

Os agregados graúdos utilizados nesta pesquisa foram: brita 3/4" (19 mm) e brita 3/8" (9,5 mm), cedidos pelo grupo Rocha Cavalcante. O pó de pedra e a areia de leito de rio foram adquiridos no comércio local, o fíler foi a cal hidratada da marca MegaÓ.

Os agregados foram submetidos a ensaios de caracterização como: massa específica do agregado graúdo (DNIT–ME 081/1998) e miúdo (DNIT-ME 084/1995), abrasão Los Angeles (DNIT-ME 035/1998); equivalente areia (DNIT–ME 054/1997). Os resultados foram como esperados para o tipo de material como apresentado na Tabela 2.

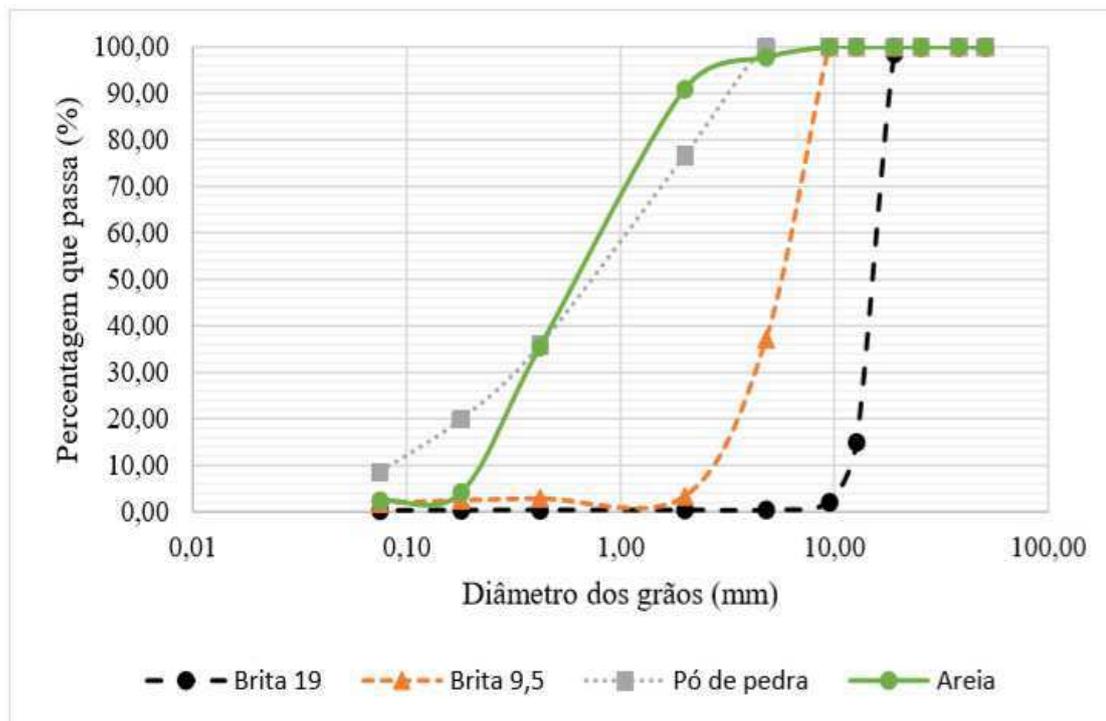
Tabela 2. Propriedades dos agregados utilizados em estudo.

Propriedades	Brita 19	Brita 9,5	Pó de pedra	Areia
Densidade real (g/cm³)	2,79	2,79	2,45	2,31
Densidade aparente (g/cm³)	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)

A Figura 11 apresenta a distribuição granulométrica dos agregados utilizados, o ensaio de granulometria dos agregados graúdos e miúdos foram executados segundo a normatização do DNIT–ME 083/1998.

Figura 11 - Distribuição granulométrica dos agregados.



Fonte: Soares (2018)

3.5 GRANULOMETRIA DA MATRIZ DE AGREGADOS FINOS (MAF)

A mistura asfáltica utilizada nesta pesquisa é classificada como de graduação densa, enquadrada na faixa C do DNIT (DNIT-ES 031/2004). A composição granulométrica da MAC foi obtida por meio da mistura dos agregados representada na Tabela 3.

Tabela 3. Porcentagem em massa dos agregados da MAC.

Material	Porcentagem em massa
Brita 19 mm	18%
Brita 9,5 mm	40%
Areia	15%
Pó de pedra	25%
Fíler	2%

Fonte: Soares (2018)

A partir da granulometria de projeto da MAC foi obtida a granulometria da MAF, onde 100% de sua massa corresponde ao passante na peneira #10 (2 mm), mantendo-se a proporção

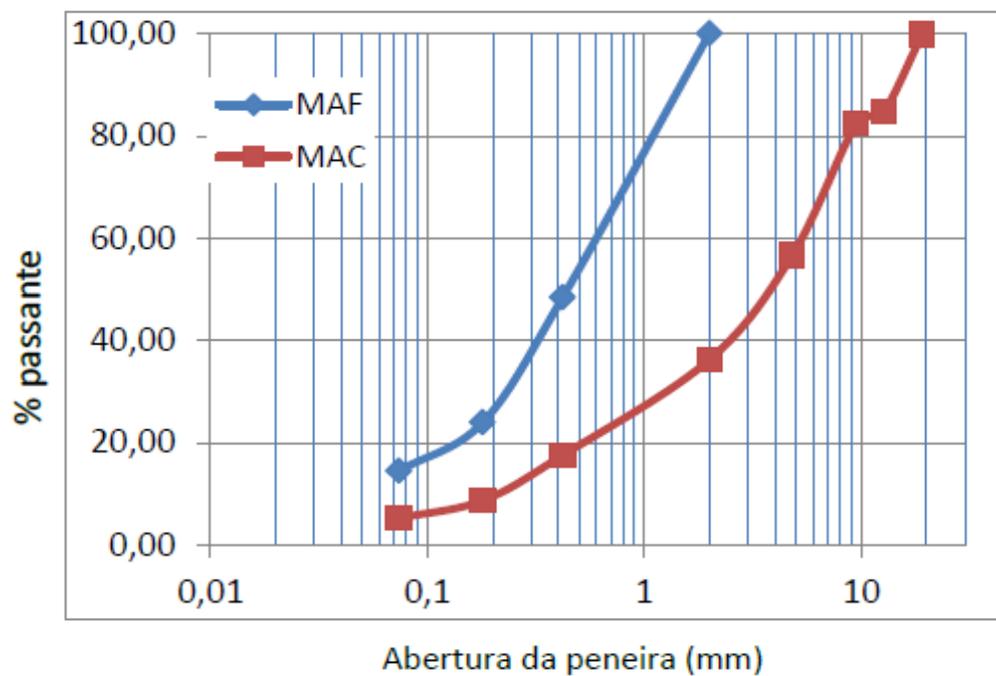
entre os agregados miúdos. A Tabela 4 apresenta a granulometria da MAF e da MAC e a Figura 12 suas curvas granulométricas.

Tabela 4. Granulometria dos materiais estudados.

Peneira	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° 4	4,8	-	56,56
N° 10	2	100,00	36,23
N° 40	0,42	48,37	17,52
N° 80	0,18	23,97	8,68
N°200	0,074	14,49	5,25

Fonte: Lima (2018)

Figura 12 - Curvas granulométricas da MAC e da MAF.



Fonte: Lima (2018)

3.6 DOSAGEM DA MATRIZ DE AGREGADOS FINOS (MAF)

Para a dosagem da MAF é necessário conhecer a dosagem da MAC seguindo a metodologia Superpave, A Tabela 5 apresenta um resumo dos principais parâmetros de dosagem obtidos para a MAC.

Tabela 5. Resumo dos parâmetros de dosagem da MAC.

Parâmetro	Resultado
Teor de Ligante (%)	4,50
Volume de Vazios (%)	4,16
Gmm (g/cm³)	2,53

Fonte: Adaptado de Soares (2018)

A dosagem da MAF foi realizada seguindo o método de Coutinho (2012) por ser o método mais atual e que tem apresentado resultados satisfatórios por considerar a quantidade de ligante aderida aos agregados graúdos.

A princípio foi preparada uma amostra de MAC que foi resfriada até a temperatura ambiente. Após o resfriamento, foi desfeito o máximo de grumos possíveis com o objetivo de tornar separável a porção de agregados graúdos da de agregados miúdos por meio do peneiramento.

A mistura fria foi separada com a peneira #10 e foram determinadas a massa de cada parcela (passante e retida). Após, foi feita a extração do ligante das duas frações do material, podendo ser determinada a massa de ligante em cada uma das frações.

O teor de ligante obtido para a MAF seguindo o procedimento de dosagem foi de 9,78%.

3.7 COMPACTAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA (CPS)

A partir da relação de que 100% da composição em massa da MAF representa apenas 42% da proporção da MAC para areia, pó de pedra e fíler, obteve-se a proporção em massa dos materiais para confecção dos corpos de prova de MAF que se encontra representada na Tabela 6.

Tabela 6. Composição dos corpos de prova moldados de MAF.

Material	Areia	Pó de Pedra	Fíler	CAP
% em Massa	32,22	53,70	51,56	9,78

A compactação dos Corpos de Prova (CPs) seguiu a mesma metodologia utilizada por Coutinho (2012). Para compactar os CPs foi utilizado o Compactador Giratório Superpave (CGS) com o objetivo de produzir amostras com volume de vazios de $4 \pm 0,5\%$.

Para obtenção do volume de vazios desejado foi utilizado como critério de parada os 200 giros que se mostrou o critério mais satisfatório após a realização de testes com critérios de paradas distintos com a altura necessária para atingir o volume de vazios desejado e com 100 giros. Todos os corpos de prova utilizados nesta pesquisa obedeceram a especificação desejada.

3.8 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

O ensaio de resistência a tração por compressão diametral foi realizado seguindo a normatização DNIT 136/2010 ME. Os corpos de prova foram submetidos a prensa como representado na Figura 13 e após isso foram obtidos os valores responsáveis por levar o corpo de prova a ruptura.

Figura 13 - Execução do RT.



Com o valor obtido de ruptura, a resistência a tração pode então ser calculada seguindo a Equação 7 a seguir.

$$\sigma_R = \frac{2F}{100\pi DH} \quad \text{Equação (7)}$$

Onde σ_R é a resistência a tração (MPa), F é a força necessária a ruptura (N), D é o diâmetro do corpo de prova (cm) e H é a altura do mesmo (cm). Os corpos de prova após a execução do ensaio apresentaram o aspecto descrito na Figura 14.

Figura 14 - Corpo de prova após execução do RT.



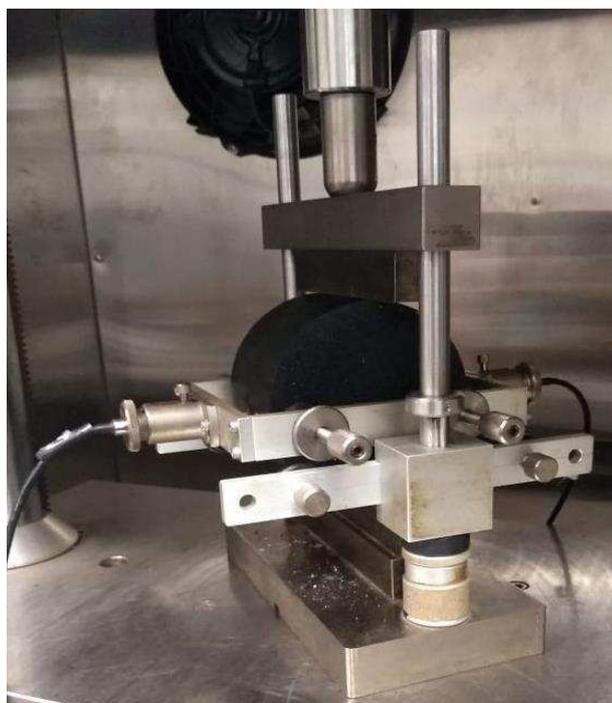
3.9 MÓDULO DE RESILIÊNCIA (MR)

O módulo de resiliência (MR) das misturas asfálticas é dado por meio da relação entre a tensão de tração, aplicada repetidamente no plano diametral vertical de uma amostra cilíndrica de mistura e a deformação específica recuperável correspondente à tensão aplicada, numa dada temperatura (DNIT 133/2009 – ME). A deformação na zona de resiliência se apresenta como uma deformação recuperável.

O ensaio de MR foi realizado seguindo os procedimentos descritos na normativa brasileira a NBR 16018/2011, onde a aparelhagem conta com um sistema pneumático de carregamento e um sistema de medição composto por transdutores mecanoeletromagnéticos do tipo LVDTs (*Linear Variable Differential transformer*).

Durante o procedimento o corpo de prova foi submetido a aplicação de uma carga vertical repetida (F) diametralmente ao corpo-de-prova, de modo a se obter uma tensão à tração igual a 10% da resistência à tração, determinada no ensaio de compressão diametral, com duração de 0,10 segundo e descanso de 0,90 segundo. O procedimento está representado na Figura 15.

Figura 15 - Corpo de prova submetido ao ensaio de módulo de resiliência.



3.10 MÓDULO DINÂMICO (MD)

O ensaio de Módulo Dinâmico (MD) ganhou importância por considerar as características viscoelásticas das misturas asfálticas possibilitando contabilizar os efeitos de diferentes temperaturas (BERNUCCI et al., 2010). A análise dos dados provenientes do MD envolve a geração de curvas mestras que permitem comparações sobre uma faixa de frequências e temperaturas.

O ensaio foi realizado com a utilização da AMPT – *Asphalt Mixture Performance Tester*, seguindo os procedimentos na norma americana AASHTO TP – 62/2009, com a utilização de corpos de prova de 100 mm de diâmetro e 150 mm de altura com um volume de vazios de $4 \pm 0,5\%$. O ensaio foi realizado para as temperaturas de 4 °C, 21 °C e 37 °C e com

frequências de 0,1; 0,5; 1; 5; 10 e 25 Hz. Os corpos de prova utilizados para o ensaio apresentaram o aspecto demonstrado na Figura 16.

Figura 16 - Corpos de prova utilizados para o ensaio de MD.



3.11 *FLOW NUMBER (FN)*

O ensaio de *Flow Number* é utilizado para prever o comportamento da mistura asfáltica a deformações permanentes. Assim, o FN é tido como o número de repetições de carga em que se inicia a deformação de cisalhamento, sob volume constante (SOARES, 2018).

O ensaio foi realizado seguindo a normatização brasileira da NBR 16505/2016 com temperatura de 60 °C e ciclos de carga uniaxial de 200 KPa. O carregamento geral foi aplicado com duração de 0,1 segundo e os intervalos entre as aplicações de carga é de 0,9 segundo de repouso com critério de ruptura de 10000 ciclos ou 50000 microstrains.

Os corpos de prova utilizados para realização do ensaio possuíam 100 mm de diâmetro, 150 mm de altura e volume de vazios de $7 \pm 0,5\%$. O suporte para realização do ensaio está representado na Figura 17.

Figura 17 - AMPT – Asphalt Mixture Performance Tester.

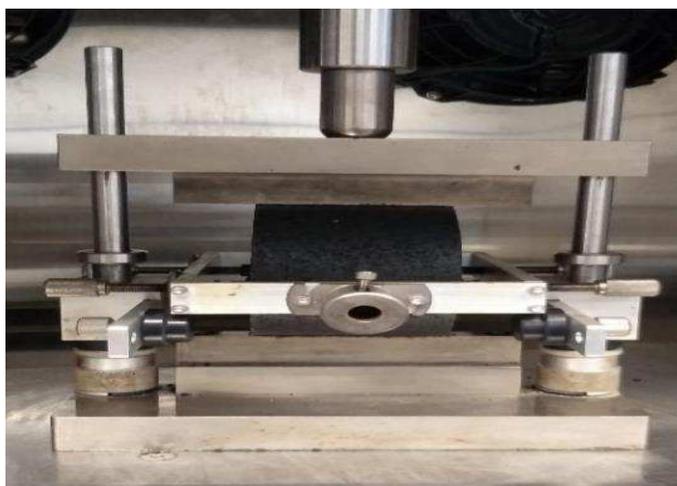


3.12 FADIGA POR COMPRESSÃO DIAMETRAL À TENSÃO CONTROLADA

O ensaio de fadiga por compressão diametral foi realizado com utilização da Universal Testing Machine (UTM) com frequência de pulso de 1 Hz (60 ciclos por minuto) com 0,1s para aplicação da carga senoidal e 0,9s de repouso. Para o procedimento foram utilizados quatro pontos de carga iniciais em porcentagens do RT. As porcentagens utilizadas foram 40%, 45% e 50%. Pois, o procedimento previsto em norma que prever uma porcentagem máxima de 40% ocasionaria uma demanda de tempo inviável ultrapassando as 48 horas de ensaio.

A partir do número de repetições de carga obteve-se o gráfico do número de ciclos (N) em função da diferença entre a tensão máxima horizontal e vertical ($\Delta\sigma$). A realização do ensaio está representada na Figura 18.

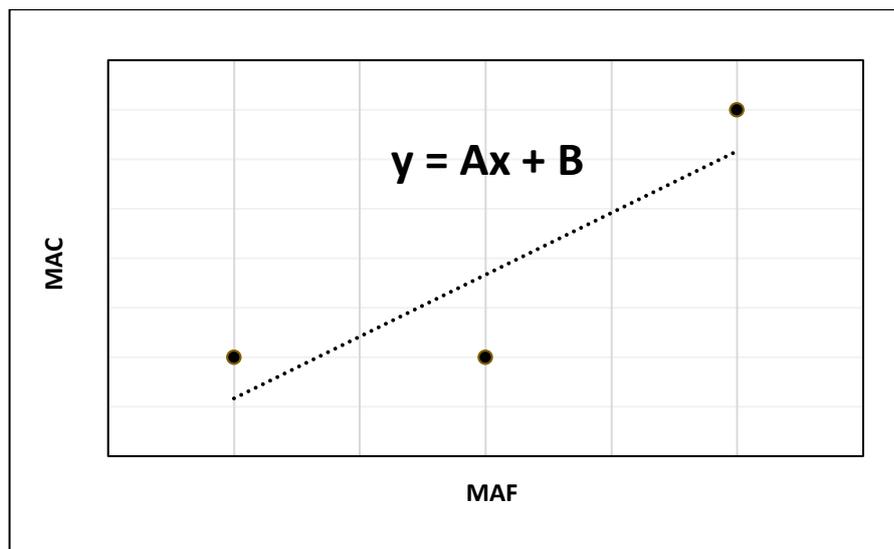
Figura 18 - Execução do ensaio de fadiga por compressão diametral.



3.13 EXTRAPOLAÇÃO GRÁFICA DOS DADOS DA MAF PARA A MAC

Os resultados dos corpos de prova de MAF e MAC foram correlacionados por meio do Excel para os valores de Rodrigues (2018) para os ensaios de Resistência à Tração e Módulo de Resiliência e também para os dados obtidos nesta pesquisa para os ensaios de Resistência à Tração, Módulo de Resiliência, *Flow Number* e Módulo Dinâmico (MD). A adequação seguiu o ajuste linear fornecendo média, desvio padrão e erro padrão entre os valores experimentais obtidos neste trabalho e os propostos por Rodrigues (2018). A Figura 19 apresenta a correlação utilizada entre as variáveis.

Figura 19 - Correlação utilizada.



4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

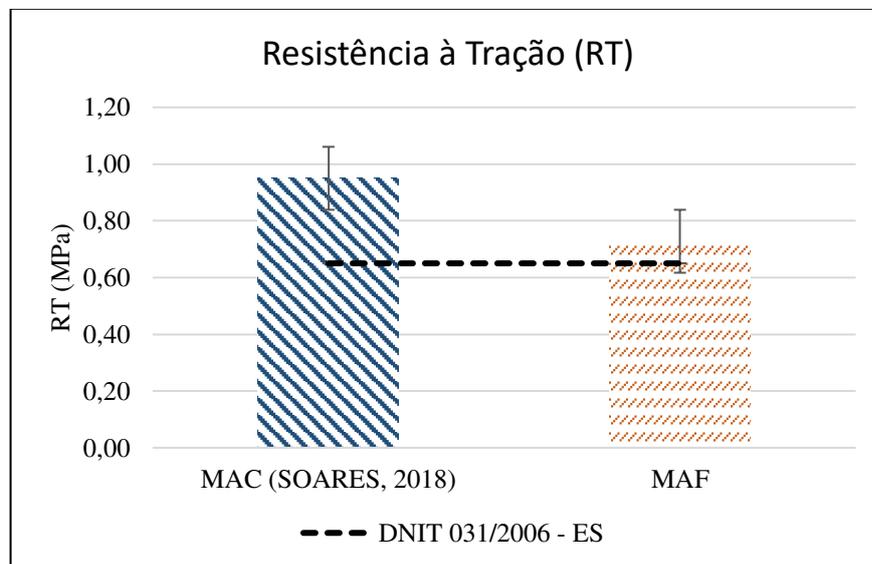
Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos com os procedimentos executados durante esta pesquisa e as relações entre o desempenho da MAF e sua MAC.

4.4 ENSAIOS MECÂNICOS

4.4.3 Resistência à Tração por Compressão Diametral (RT)

A Figura 20 apresenta os resultados obtidos para a resistência à tração para as misturas analisadas, nesta é possível perceber que ambas as misturas apresentam RT superior ao mínimo exigido pelo DNIT 031/2006 – ES que é de 0,65 MPa. Porém, a MAF apresentou uma redução de aproximadamente 23% comparada a MAC.

Figura 20 - Resultado do ensaio de resistência a tração por compressão diametral.

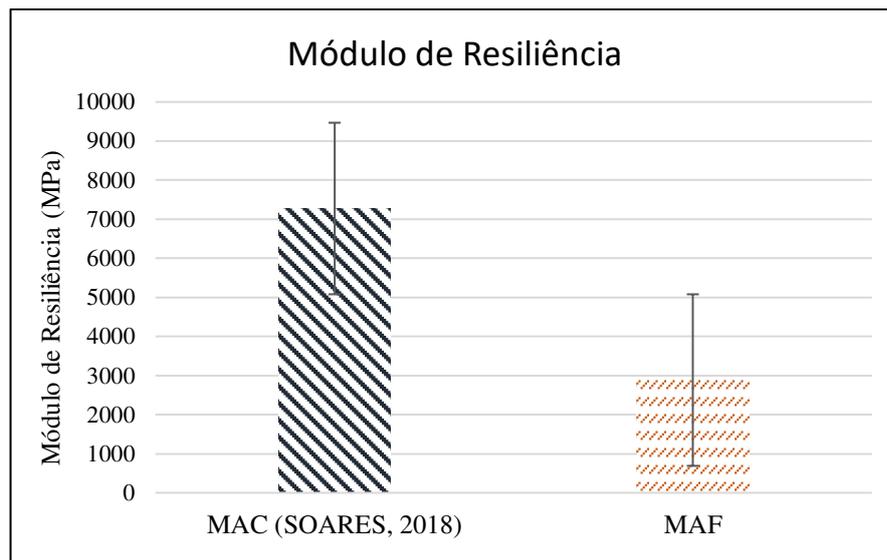


Rodrigues (2018) obteve em sua pesquisa um valor superior da MAF (RT = 1,41 MPa) quando comparada a sua MAC (RT = 1,19 MPa) de origem o que é contrário ao obtido nesta pesquisa. Porém, a dosagem utilizada pelo autor seguiu um procedimento distinto fornecendo um teor de ligante de 7% que é inferior ao utilizado no desenvolvimento deste trabalho o que aumentou a rigidez da mistura testada pelo autor.

4.4.4 Módulo de Resiliência (MR)

A Figura 21 apresenta os resultados obtidos para o Módulo de Resiliência das misturas em estudo. Nota-se que a MAF apresenta uma redução do resultado do MR em aproximadamente 60%, o que pode ser explicado pela diferença no teor de ligante entre a MAC e a MAF além da presença do esqueleto pétreo dos agregados graúdos que estão presentes na MAC e lhe fornecem maior rigidez.

Figura 21 - Resultados do Módulo de Resiliência das misturas estudadas.



Não existe atualmente uma especificação para o resultado mínimo do MR. Porém, Bernucci et al. (2010) classifica com base em dados e estatísticas que o resultado do MR, para misturas asfálticas em uma temperatura de 25 °C, costuma se situar entre 2000 e 8000 MPa onde ambas as misturas estudadas nesta pesquisa se enquadram.

Rodrigues (2018) obteve um valor de MR para a MAF (MR = 3531 MPa) inferior ao da sua MAC (MR = 4672 MPa) de origem, o que é semelhante ao resultado obtido neste trabalho. Porém, os valores obtidos pelo autor apresentam menores variações entre si o que pode ser explicado pela diferença de materiais utilizados e do método de dosagem escolhido.

4.4.5 Módulo Dinâmico (MD)

As Figuras 22 e 23 apresentam os resultados de módulo dinâmico na forma de curvas mestra para a temperatura padrão de 21°C das misturas estudadas, nelas pode-se perceber a

redução do módulo com o aumento da temperatura (4, 21, 37 °C) para as seis frequências ensaiadas.

Figura 22 - Curva mestra para a MAC (SOARES, 2018).

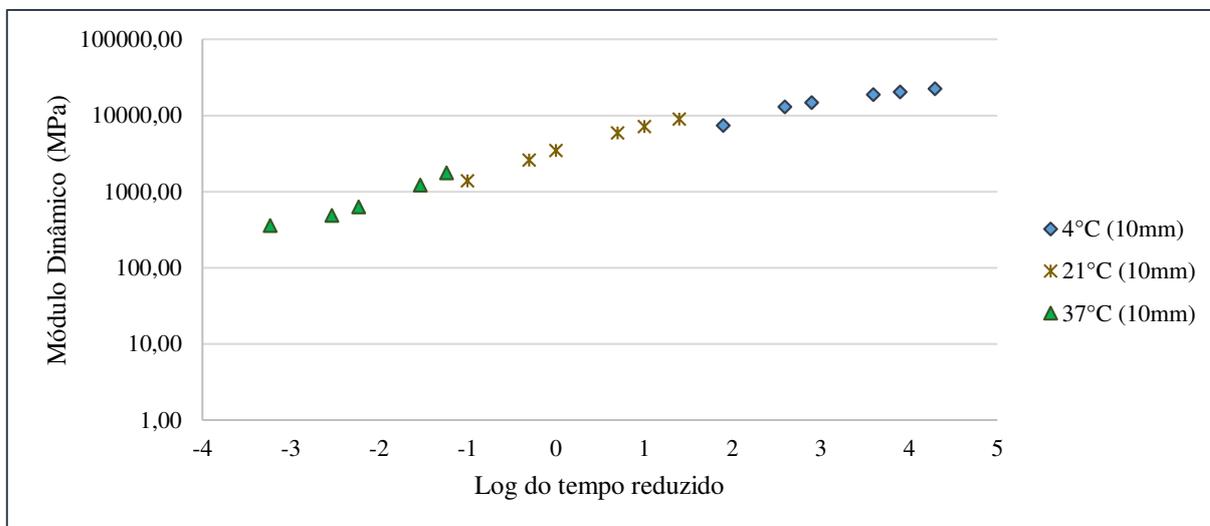
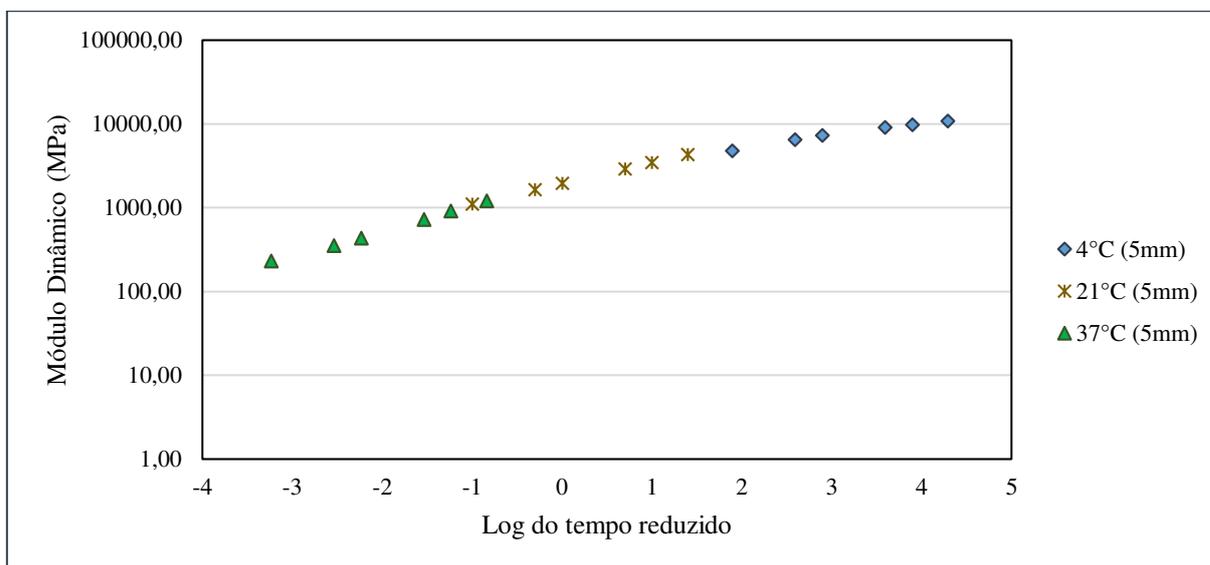
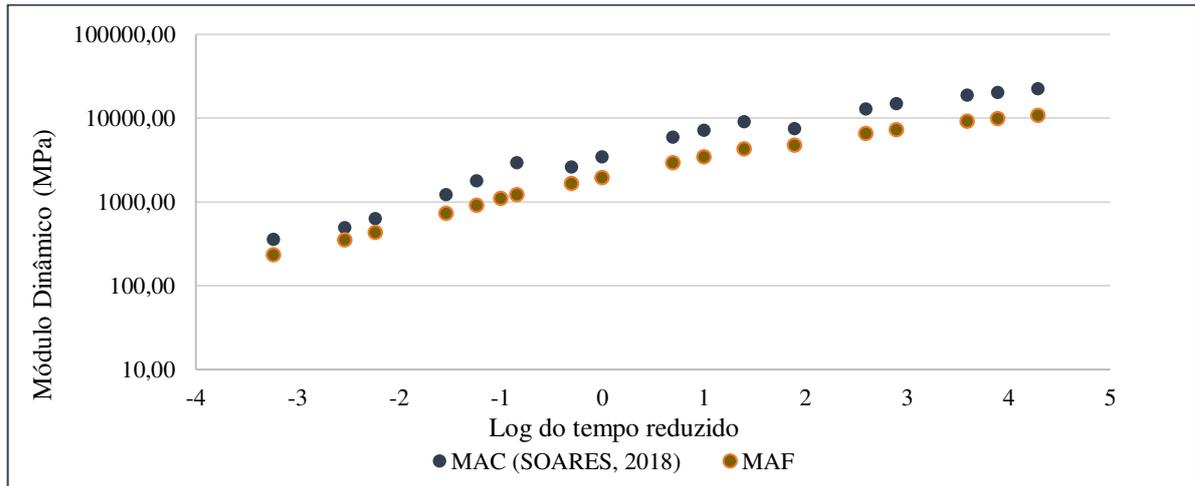


Figura 23 - Curva mestra para MAF.



A Figura 24 apresenta a comparação entre as duas curvas mestras. Nela pode-se perceber que a mistura completa exibe valores mais elevados que a MAF, ainda que para temperaturas mais baixas os valores estejam mais próximos, o que já era esperado já que o Módulo de Resiliência entre as duas se distanciou consideravelmente. Porém, os valores para a MAF se apresentam mais homogêneos fornecendo uma curva mestra melhor definida.

Figura 24 - Curvas mestras reunidas.



O comportamento rígido da MAC fica melhor representado ao se analisar o desempenho por temperatura (Figuras 25, 26 e 27) onde é possível perceber que inicialmente os valores de MD se aproximam, mas devido as temperaturas se elevam o valor para a MAC enquanto a MAF permanece com menores variações.

Figura 25 - Módulo Dinâmico 4 °C.

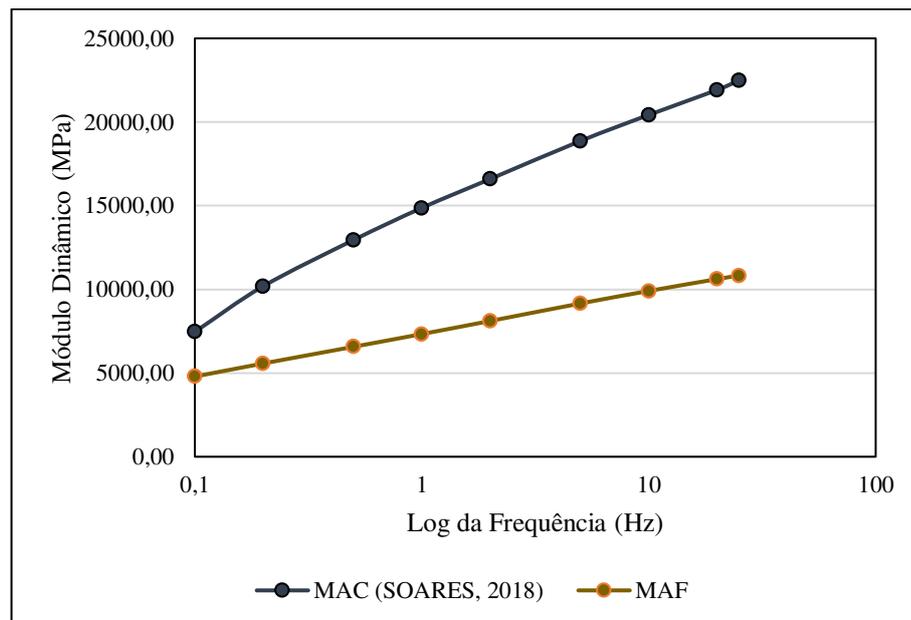


Figura 26 - Módulo Dinâmico 21 °C.

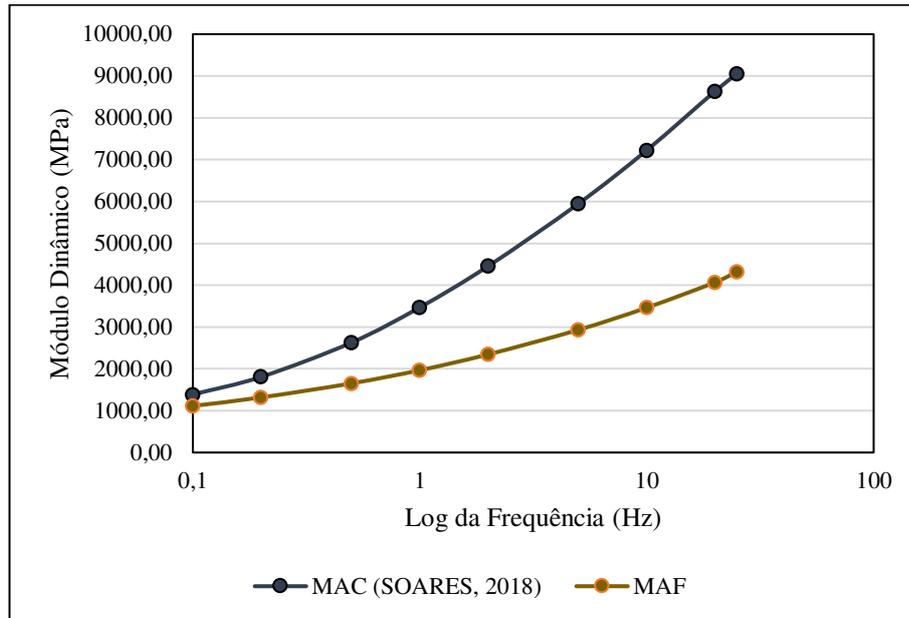
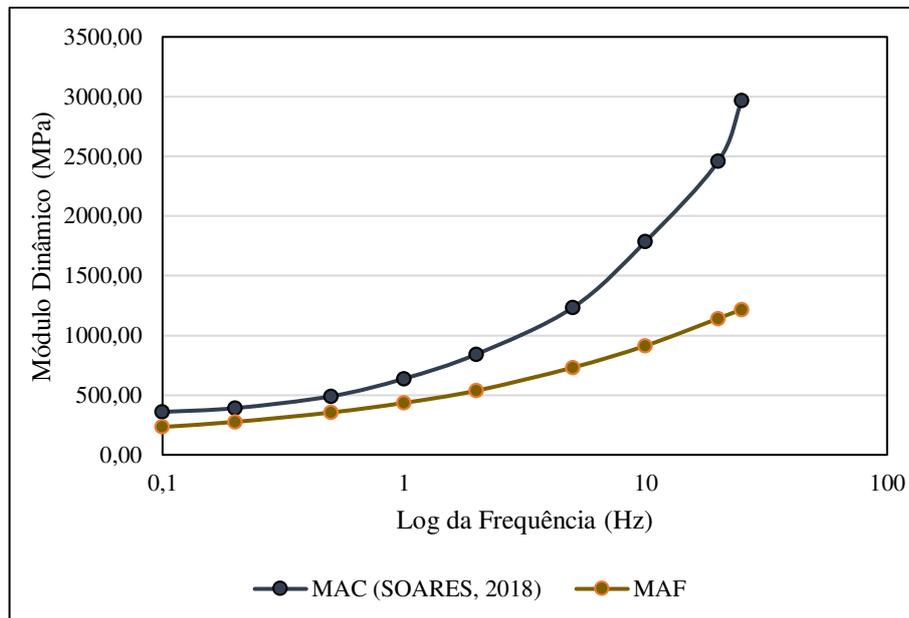


Figura 27 - Módulo Dinâmico 37 °C.

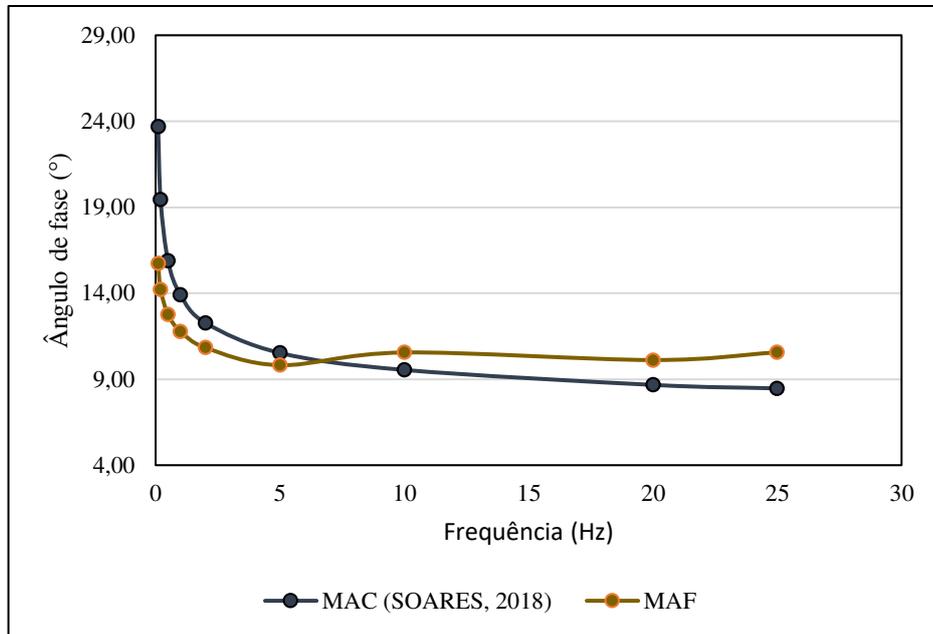


As Figuras 28, 29 e 30 apresentam os valores para o ângulo de fase referentes às frequências de carregamento utilizadas para ambas as misturas estudadas e em cada temperatura proposta. O ângulo de fase se relaciona as características viscoelásticas das misturas asfálticas.

Na Figura 28 nota-se que para baixa temperatura e baixa frequência o ângulo de fase para a MAF é inferior, porém ao aumentar a frequência o seu valor sofre uma pequena redução

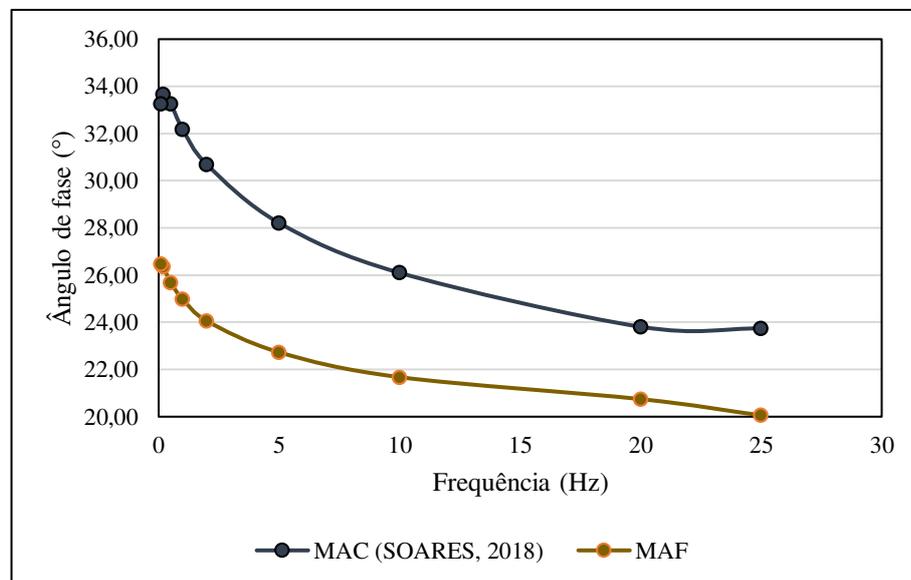
e volta a crescer, chegando a ser superior ao da MAC que sofre um decréscimo ao se aumentar a frequência.

Figura 28 - Ângulo de fase 4 °C.



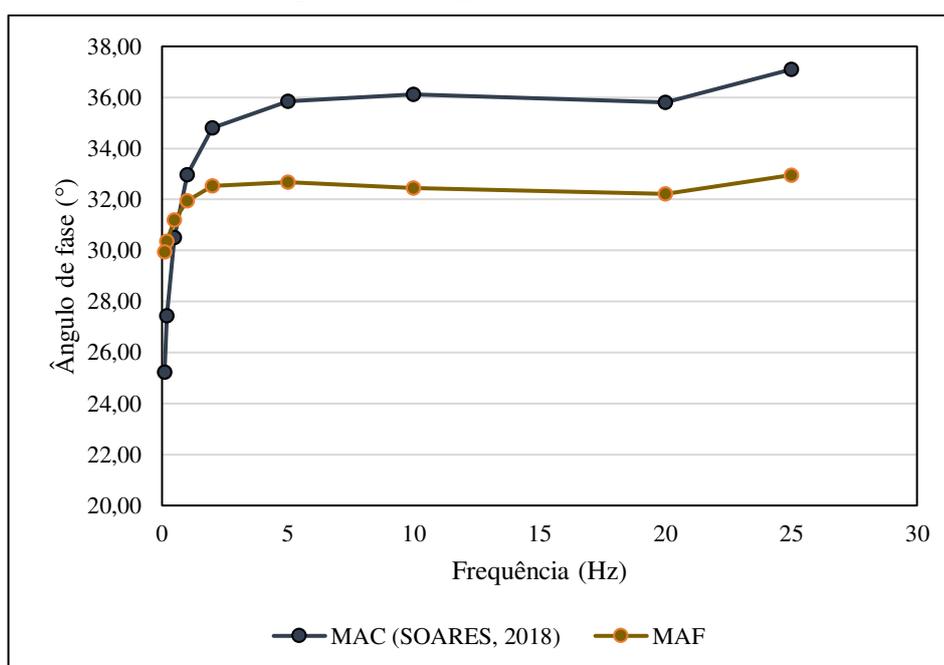
Na Figura 29 percebe-se que o ângulo de fase das misturas se distancia e ambas sofrem um decréscimo à medida que a frequência de ensaio é aumentada. Os valores para a MAC se mantiveram superiores para todos os pontos medidos o que indica a menor elasticidade do material.

Figura 29 - Ângulo de fase 21 °C.



Na Figura 30 nota-se que a tendência seguida nas figuras anteriores não se aplica visto que os valores para o ângulo de fase diminuem em baixas frequências e aumenta para frequências superiores. Segundo Ali et al. (2016) nas temperaturas anteriores o comportamento da mistura está relacionado a tendência seguida pelo ligante e em temperaturas mais elevadas à baixa frequência o comportamento da mistura é ditado pelo seu agregado, assim como a maior parte da energia dissipada é atribuída à interação entre o ligante e os agregados.

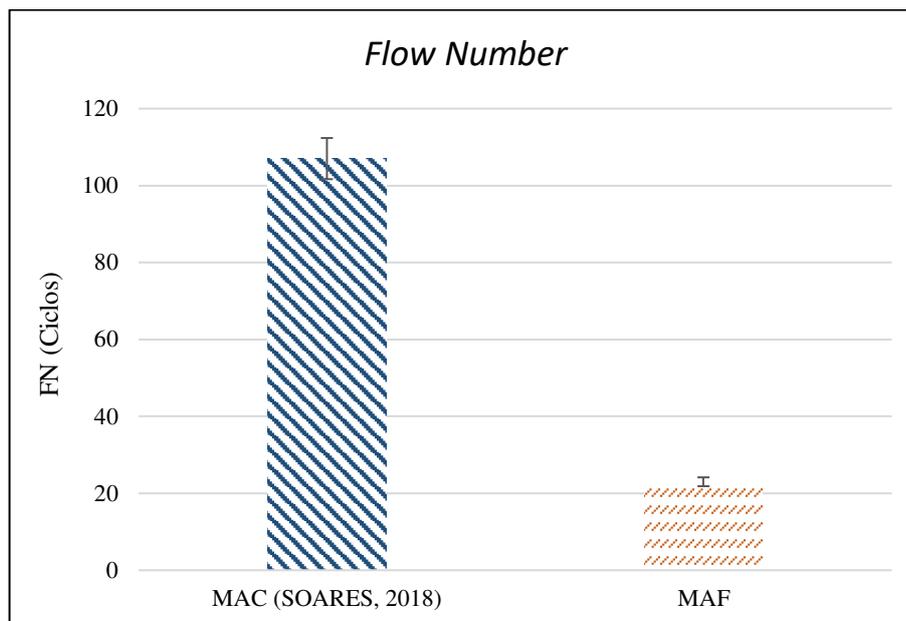
Figura 30 - Ângulo de fase 37 °C.



4.4.6 Flow Number (FN)

A Figura 31 apresenta os resultados obtidos para o ensaio de *Flow Number* nas misturas avaliadas. Pode-se perceber que a MAC apresenta um valor em número de ciclos muito elevado comparado ao valor obtido na MAF, chegando a ser o FN da MAC cerca de quatro vezes superior ao da MAF, o que indica uma menor resistência à deformação permanente da MAF.

O desempenho reduzido da MAF pode ser explicado pela ausência de agregados graúdos que fornecem maior rigidez a mistura perante o carregamento axial aplicado. Além disso, as misturas estudadas são diferentes entre si quanto ao volume de vazios, teor de ligante e a própria composição da mistura o que torna seu desempenho mais imprevisível entre si.

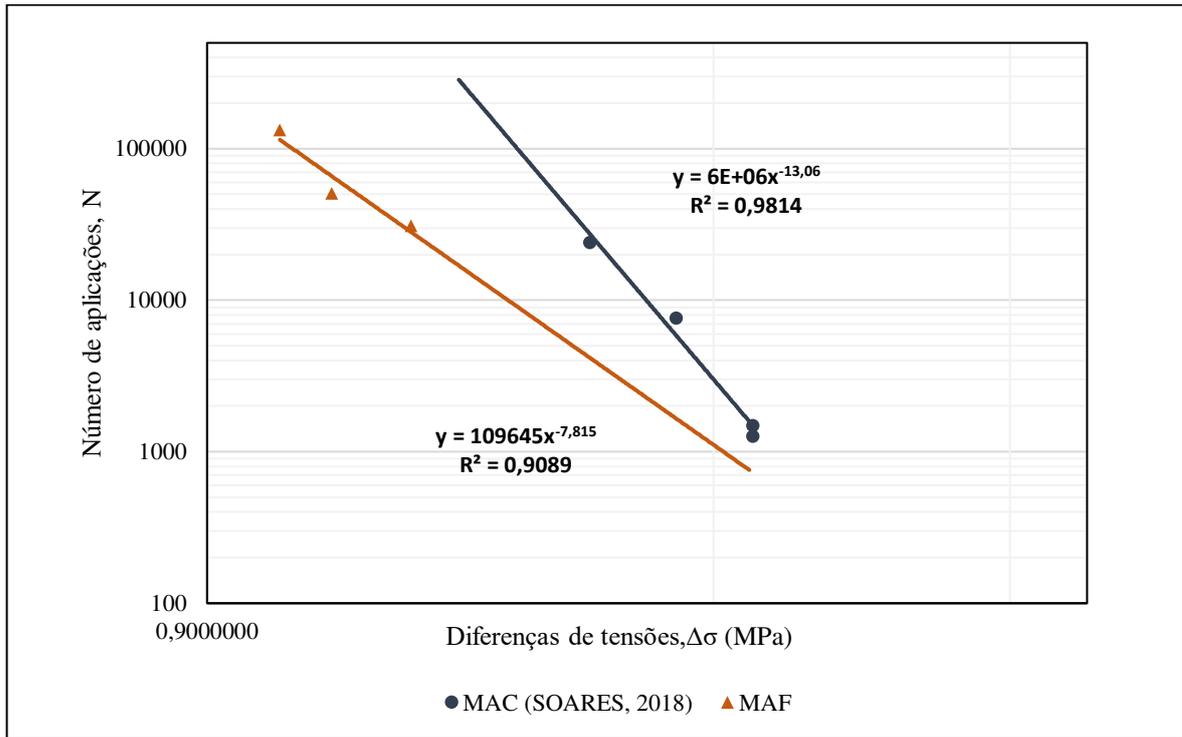
Figura 31 - Resultados do ensaio de *Flow Number*.

Rodrigues (2018) avaliou o desempenho da MAF quanto a deformação permanente por meio do ensaio de *Creep estático*. O autor obteve uma resposta superior da MAC a deformação permanente o que condiz com o obtido neste trabalho.

4.4.7 Fadiga por Compressão Diametral à Tensão Controlada

Os resultados de vida de fadiga para a MAF e MAC estão representados nas Figura 32 que apresenta o gráfico da “diferença de tensões” pelo “número de aplicações de carga”, nela pode-se perceber que o desempenho da MAF é inferior ao da MAC para todos os pontos de aplicação de cargas testados. Este desempenho difere do esperado já que a MAF deveria apresentar um desempenho superior devido a quantidade de ligante e a ausência de agregado graúdo o que se comprova nos dados dessa pesquisa apenas para uma maior diferença de tensões onde as curvas de vida de fadiga tendem a se cruzar.

Figura 32 - Vida de fadiga.



Os valores de inclinação das retas de vida de fadiga apresentam valores significativamente distintos o que difere dos resultados obtidos por Rodrigues (2018) que obteve curvas com inclinações similares e com número de ciclos superiores para a MAF. Segundo Castelo Branco (2004) no campo o número de aplicação de cargas é muito superior ao representado em laboratório, assim a inclinação da reta seria mais importante na análise. Logo, as misturas analisadas apresentam vidas de fadiga distintas em campo o que dificulta a utilização do ensaio para previsão do comportamento da mistura completa considerando a dosagem utilizada.

A Tabela 7 apresenta um resumo dos valores de cálculo, além dos detalhes geométricos dos corpos de prova ensaiados.

Tabela 7. Resumo de cálculos para a vida de fadiga das amostras.

Tipo de Mistura	Número do corpo de prova	Altura (cm)	Diâmetro (cm)	Nível de tensões (%)	Carga aplicada (N)	Diferença de tensões (MPa)	Número de aplicações
MAC (SOARES, 2018)	L1	6,47	10,00	40%	3861,96	1,52	24032
	L2	6,56	10,00	45%	4405,15	1,71	7636
	L3	6,50	10,00	50%	4849,84	1,90	1271
	L4	6,48	10,00	50%	4834,92	1,90	1491
MAF	P15	6,80	10,00	38%	2655	0,99	133921
	P11	6,81	10,00	40%	2855	1,07	50886
	P12	6,84	10,00	45%	3196	1,19	31201

4.5 PREVISÃO PROPOSTA POR RODRIGUES (2018)

Com as equações sugeridas por Rodrigues (2018) obteve-se previsões para o ensaio de Resistência à Tração (RT) e Módulo de Resiliência (MR).

4.5.3 Análise da previsão proposta por Rodrigues (2018) para o RT.

Os dados experimentais obtidos nessa pesquisa foram utilizados na equação de Rodrigues (2018), os valores teóricos obtidos estão apresentados na Tabela 6. Assim, pode-se perceber que a previsão apresentou um erro padrão baixo ($8E-06$) entre os valores teóricos e os experimentais. As diferenças de materiais utilizados e de método de dosagem escolhido favorece o distanciamento entre os valores.

Tabela 8. Valores esperados e experimentais para o RT.

Método	MAC (esperado)	MAC (experimental)
RT	1,16	0,93
	1,16	0,95
	1,16	0,97
Média	1,16	0,95
Desvio padrão	0,0002	0,0167
Erro padrão	8E-06	

4.5.4 Análise da previsão proposta por Rodrigues (2018) para o MR.

Os dados experimentais obtidos nessa pesquisa foram utilizados na equação de Rodrigues (2018), os valores teóricos obtidos estão apresentados na Tabela 7. Assim, pode-se perceber que a previsão apresentou um erro padrão elevado de aproximadamente 319 MPa entre

os valores teóricos e os experimentais. Pois, embora os resultados para os MRs das MAFs tenham apresentado valores próximos, as MACs se distanciaram consideravelmente quando comparadas com os dados do autor.

Tabela 9. Valores experimentais e teóricos para o MR.

Método	MAC (esperado)	MAC (experimental)
	4474	7165
MR	4608	7482
	3960	7799
Média	4348	7482
Desvio padrão	342	317
Erro padrão		319

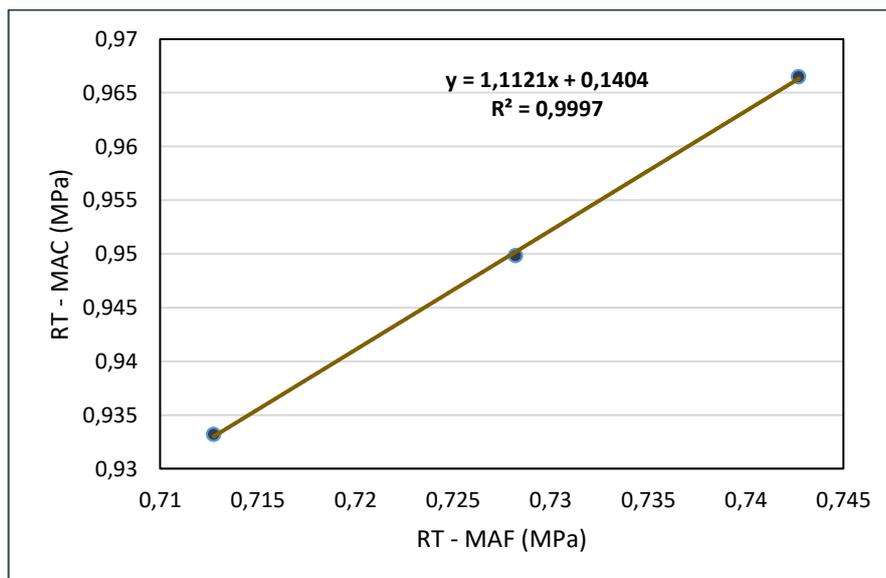
4.6 CORRELAÇÕES OBTIDAS NESTA PESQUISA

Com base nos dados obtidos nesta pesquisa obteve-se relações para os ensaios de Resistência a tração por compressão diametral (RT), Módulo de resiliência (MR), Flow Number (FN) e Módulo dinâmico (MD).

4.6.3 Equação proposta para o RT

A Figura 33 apresenta a equação proposta para previsão do comportamento da MAC a partir do desempenho de sua MAF, com base nos dados obtidos em ensaios laboratoriais de RT, para as amostras analisadas e considerando os materiais utilizados nesta pesquisa, assim como o método de dosagem escolhido. Os valores obtidos apresentam pequena dispersão fornecendo um bom nível de previsão já que os resultados de RT apresentam pequenas variações.

Figura 33 - Equações propostas para o RT.



A Tabela 10 apresenta um resumo entre os parâmetros propostos por Rodrigues (2018) e aqueles sugeridos nesta pesquisa. Percebe-se assim que ambas as previsões apresentam valores pouco dispersos.

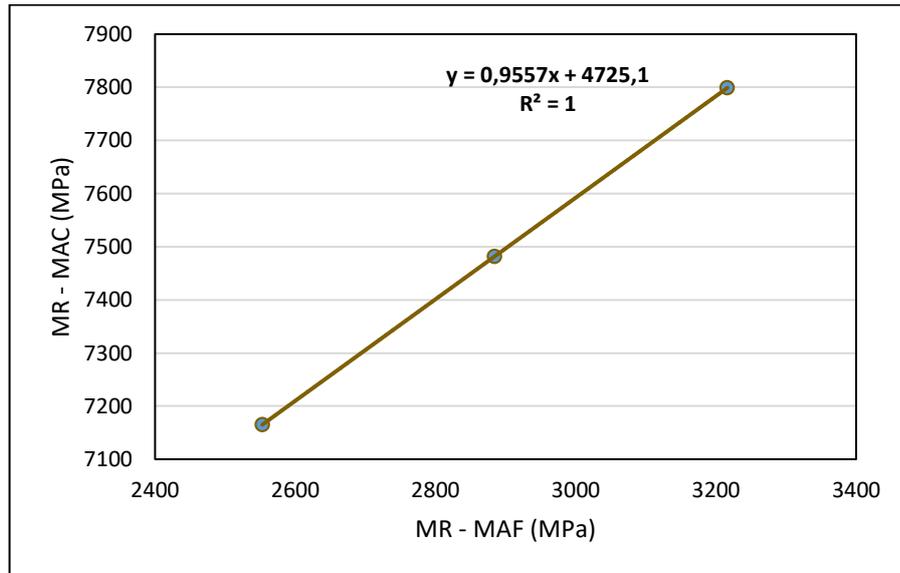
Tabela 10. Resumo dos parâmetros propostos.

Método	Equação	Parâmetro A	Parâmetro B	R ²
Rodrigues (2018)	$RT_{MAC} = 0,02RT_{MAF} - 1,15$	0,02	1,15	1,00
Silva (2019)	$RT_{MAC} = 1,11RT_{MAF} - 0,14$	1,11	0,14	0,9997

4.6.4 Equação proposta para o MR

Com base nos dados obtidos em ensaios laboratoriais de MR, está representada na Figura 34 a correlação proposta nessa pesquisa. Os valores obtidos apresentam pequena dispersão fornecendo um bom nível de previsão já que os resultados de RT apresentam pequenas variações.

Figura 34 - Equação proposta para o MR.



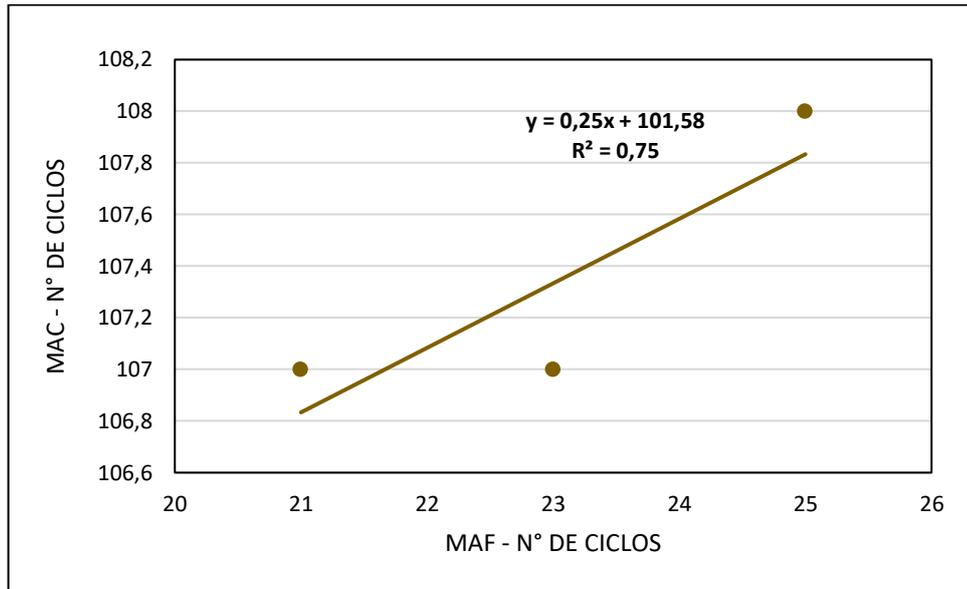
A Tabela 11 apresenta um resumo entre os parâmetros propostos por Rodrigues (2018) e aqueles sugeridos nesta pesquisa. Percebe-se assim que ambas as previsões fornecem pouca dispersão, para a escolha entre a aplicação de uma ou outra é a similaridade entre dosagem e materiais escolhidos.

Tabela 11. Resumo dos parâmetros obtidos para o MR.

Método	Equação	Parâmetro A	Parâmetro B	R ²
Rodrigues (2018)	$MR_{MAC} = 0,20MR_{MAF} - 3960,3$	0,20	3960,3	0,9828
Silva (2019)	$MR_{MAC} = 0,96MR_{MAF} - 4725,1$	0,96	4725,1	1

4.6.5 Equação proposta para o FN

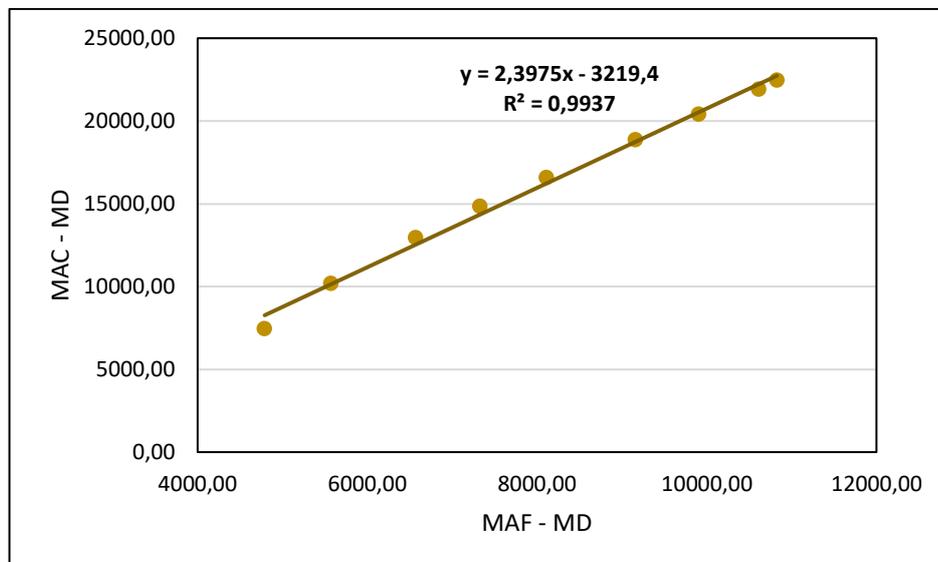
Com os dados obtidos em ensaios laboratoriais de deformação permanente por meio do *Fow Number*, a Figura 35 apresenta a correlação proposta nessa pesquisa. Os valores obtidos apresentam uma maior dispersão quando comparada as correlações entre os outros ensaios.

Figura 35 - Equação proposta para o *Flow Number*.

4.6.6 Equação proposta para o MD

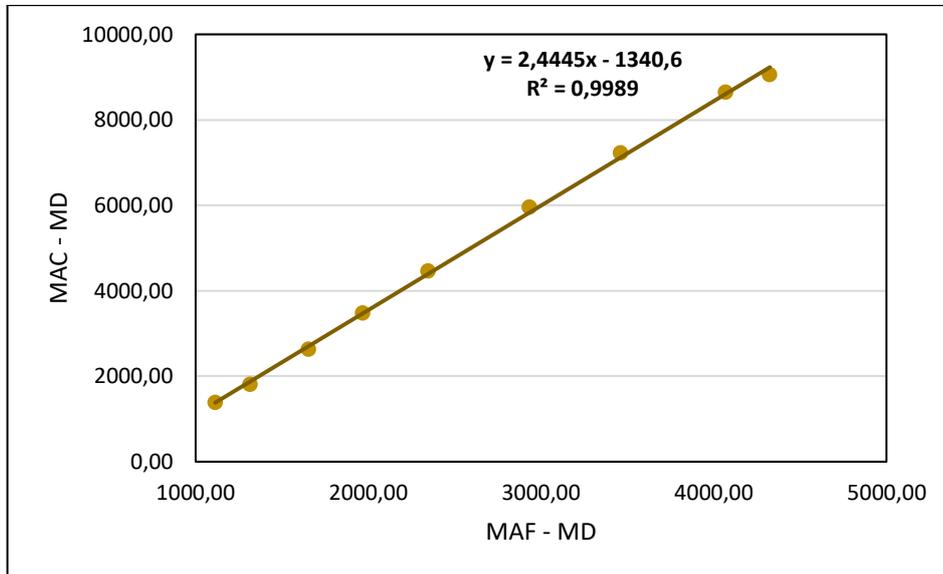
Para o MD obteve-se equações para cada temperatura de ensaio (4, 21 e 37 °C), onde cada ponto representa a relação entre o MD da MAF e MAC para cada frequência de ensaio (0,1; 0,2; 0,5; 1; 2;5; 10; 20; 25). A Figura 36 apresenta a previsão para a temperatura de 4 °C, nela percebe-se que os valores apresentam boa correlação linear ($R = 0,9937$).

Figura 36 - Equação proposta para o MD (4 °C).



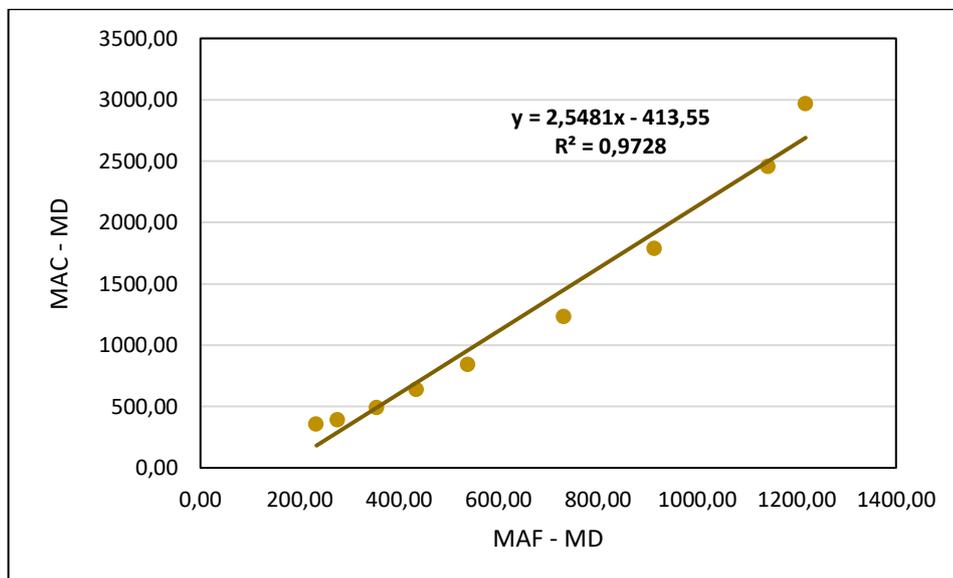
A Figura 37 apresenta a previsão para a temperatura de 21 °C, nela percebe-se que os valores apresentam boa correlação linear ($R = 0,9989$), sendo esta a temperatura que fornece o melhor ajuste linear entre seus pontos.

Figura 37 - Equação proposta para o MD (21 °C)



A Figura 38 apresenta a previsão para a temperatura de 37 °C, nela percebe-se que os valores apresentam boa correlação linear ($R = 0,9728$), embora seja menor que as obtidas nas temperaturas inferiores, isto ocorre devido a maior variação obtida nos valores individuais do MD para as temperaturas superiores com frequências maiores.

Figura 38 - Equação proposta para o MD (37 °C).



5 CONCLUSÃO

Os ensaios de RT, MR, FN e MD apresentaram boa aplicabilidade para a MAF. Para realização do ensaio de vida de fadiga as amostras de MAF necessitaram de porcentagens do RT superiores aquelas previstas em norma sendo necessário o acréscimo de porcentagem no valor de 45% para obter tempo de execução de ensaio satisfatório. A curva de vida de fadiga para a MAF apresentou bom nível de confiança ($R^2 = 0,9089$) o que sugere que o ensaio pode ser utilizado para a mesma.

Por se tratarem de misturas distintas as correlações com a MAC foram dificultadas principalmente pelo método de dosagem adotado que distanciou o teor de ligante das amostras resultando em MRs significativamente distintos, aproximadamente 60% de redução para a MAF. No ensaio de MD, a MAF apresentou valores inferiores, o que era esperado pelo aumento do teor de ligante entre as misturas. Porém a curva mestra fornecida pela MAF apresenta uniformidade maior do que a obtida para a MAC. Para a vida de fadiga as inclinações entre as retas da MAC e MAF apresentaram diferenças que sugerem vidas de fadiga distintas em campo.

As equações propostas sugerem a sua utilização para extrapolar, a partir da MAF, o comportamento da MAC tendo em vista a escolha de um teor de ligante semelhante e materiais de características aproximadas, visto que as equações propostas apresentaram pequena dispersão de valores, principalmente para os ensaios de RT e de Módulo Dinâmico.

Os testes realizados com as equações propostas por Rodrigues (2018) apresentaram valores altos para o erro padrão entre os valores previstos e os experimentais obtidos neste trabalho, este resultado era esperado visto que os materiais utilizados são distintos.

O presente trabalho utilizou o desempenho mecânico da matriz de agregados finos (MAF) para prever o comportamento da Mistura Asfáltica Completa (MAC) obtendo equações que forneceram valores pouco dispersos entre os pontos analisados levando em conta o mesmo material e o mesmo método de dosagem. Este fato indica que a MAF possui boa aplicação para prever o comportamento da sua MAC. Para validação destas equações seria necessário um maior número de dados.

5.4 SUGESTÕES DE PESQUISAS FUTURAS

A partir dos resultados obtidos com a execução deste trabalho recomenda-se os seguintes estudos a serem realizados:

- avaliar a influência do método de dosagem escolhido no desempenho mecânico da MAF, verificando assim a real influência do teor de ligante;
- avaliar tipos diferentes de MAFs confeccionadas a partir de ligantes com propriedades distintas para assim obter a influência do tipo de ligante no desempenho da Matriz fina aos ensaios mecânicos;
- realizar outros métodos de ensaio de deformação permanente além do *Flow Number*, como o creep estático ou o dinâmico, para obter maiores informações sobre o desempenho da MAF a tal fenômeno;
- comparar o desempenho da MAF em ensaios mecânicos aos ensaios realizados no reômetro para minicorpos de prova.
- testar a influência de diferentes tipos de agregados no desempenho mecânico das MAFs.

REFERÊNCIAS

ALI, Shaban Ismael Albrka et al. Performance evaluation of Al₂O₃ nanoparticle-modified asphalt binder. **Road Materials And Pavement Design**, [s.l.], v. 18, n. 6, p.1251-1268, 29 jul. 2016. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2016.1208621>.

ARAGÃO, F. T. S. et al. **Semi empirical, analytical, and computational predictions of dynamic modulus of asphalt concrete mixtures**. Transportation Research Record. 2181, p. 19–27, 2010

ARAO, Mieka. **Análise da vida de fadiga de pavimentos flexíveis em diferentes misturas**. 2014. 61 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

BERNUCCI, L. B., CERATTI J. A. P., GORETTI DA MOTTA L. M., SOARES J. B. (2010). **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros** – Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2010.

CASTELO BRANCO, Veronica Teixeira Franco. **A unified method for the analysis of nonlinear viscoelasticity and fatigue cracking of asphalt mixtures using the dynamic mechanical analyzer**. 2008. 240 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Texas A&m University, Texas, 2008.

CAVALCANTI, Leonardo Santana. **Efeito de alguns modificadores de ligante na vida de fadiga e deformação permanente de misturas asfálticas**. 2010. 225 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

Clésio Andrade. **Pesquisa CNT de Rodovias**. Disponível em: <<http://pesquisarodovias.cnt.org.br/>>. Acesso em: 18 fev. 2019.

COUTINHO, Renato Peixoto. **Utilização da parte fina de misturas asfálticas para avaliação do dano por fadiga**. 2012. 109 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Infraestrutura de Transportes, Departamento de Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.

FREIRE, Reuber A. et al. Aggregate Maximum Nominal Sizes' Influence on Fatigue Damage Performance Using Different Scales. **Journal Of Materials In Civil Engineering**, [s.l.], v. 29, n. 8, p.04017067, ago. 2017. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0001912](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001912).

GUDIPUDI, Padmini; UNDERWOOD, B. Shane. Testing and Modeling of Fine Aggregate Matrix and Its Relationship to Asphalt Concrete Mix. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, [s.l.], v. 2507, n. 1, p.120-127, jan. 2015. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.3141/2507-13>.

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.

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

LIMA, Luan Talles Vieira. **Estudo de dosagens de matriz de agregado fino**. 2018. 48 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Unidade Acadêmica de Engenharia Civil, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2018.

MARINHO FILHO, P. G. T. **Avaliação reológica de ligantes asfálticos modificados com nanopartículas de dióxido de titânio**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2017.

NUÑEZ, Javier Yesid Mahecha. **Caracterização à fadiga de ligantes asfálticos modificados envelhecidos a curto e longo prazo**. 2013. 139 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

ODA, Sandra. **Análise da viabilidade técnica da utilização do ligante asfalto-borracha em obras de pavimentação**. 2000. 280 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

RIBEIRO, Thiago Pinheiro. **Estudo Descritivo das Principais Patologias em Pavimento Flexível**. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Edição 04. Ano 02, Vol. 01. pp 733-754, Julho de 2017. ISSN:2448-0959 <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-civil/pavimento-flexivel> (figuras de deformação permanente).

RODRIGUES, Igor Augusto. **Análise do dano em mistura de agregados finos (MAF)**. 2018. 150 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, 2018.

SANTOS, Caio Rubens Gonçalves. **Avaliação das influências do tipo de ligante e do volume de vazios na vida de fadiga de algumas misturas asfálticas**. 2005. 123 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

SILVA, Letícia Socal da. **Contribuição do estudo do envelhecimento de ligantes asfálticos: influência da adição de polímeros e comportamento frente a radiação UV**. 2005. 155 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

SILVA, João Paulo Souza. **Avaliação dos efeitos de agentes rejuvenescedores em misturas asfálticas**. 2011. 166 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, 2011.

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.

SOUSA, P., KASSEM, E., MASAD, E. & LITTLE, D. (2012). **New design method of fine aggregates mixtures and automated method for analysis of dynamic mechanical characterization data**. Constr. Build. Mater., 41: 216–223.

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

UNDERWOOD, B. Shane; KIM, Y. Richard. Microstructural investigation of asphalt concrete for performing multiscale experimental studies. **International Journal Of Pavement Engineering**, [s.l.], v. 14, n. 5, p.498-516, jul. 2013. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/10298436.2012.746689>.

ZHU, Jingwen et al. Evaluating fatigue performance of fine aggregate matrix of asphalt mix containing recycled asphalt shingles. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 139, p.203-211, maio 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.060>.

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.