



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

REUBER ARRAIS FREIRE

AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO TRINCAMENTO DE MISTURAS ASFÁLTICAS
FINAS COM DIFERENTES TAMANHOS MÁXIMOS NOMINAIS

FORTALEZA

2013

REUBER ARRAIS FREIRE

AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO TRINCAMENTO DE MISTURAS ASFÁLTICAS
FINAS COM DIFERENTES TAMANHOS MÁXIMOS NOMINAIS

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Civil do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito para obtenção do Título de Engenheiro Civil.

Área de concentração: Infraestrutura de Transportes.

Orientadora: Profa. Verônica Teixeira Franco Castelo Branco, Ph.D.

Co-Orientadora: Profa. Kamilla Lima Vasconcelos, Ph.D.

FORTALEZA
2013

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

F935a Freire, Reuber Arrais.

Avaliação da resistência ao trincamento de misturas asfálticas finas com diferentes tamanhos máximos nominais / Reuber Arrais Freire. – 2013.
67 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Civil, Fortaleza, 2013.

Orientação: Profa. Dra. Verônica Teixeira Franco Castelo Branco.
Coorientação: Profa. Dra. Kamilla Lima Vasconcelos.

1. Agregado graúdo. 2. Fadiga. 3. Matriz de agregados finos. I. Título.

CDD 620

REUBER ARRAIS FREIRE

AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO TRINCAMENTO DE MISTURAS ASFÁLTICAS
FINAS COM DIFERENTES TAMANHOS MÁXIMOS NOMINAIS

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Civil do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito para obtenção do Título de Engenheiro Civil.

Aprovada em ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Profa. Verônica T. F. Castelo Branco, Ph.D. (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará – UFC

Profa. Kamilla Lima Vasconcelos, Ph.D. (Co-Orientadora)
Universidade de São Paulo – USP

Prof. Jorge Barbosa Soares, Ph.D.
Universidade Federal do Ceará – UFC

Eng. Renato Peixoto Coutinho, M.Sc.

FORTALEZA
2013

DEDICATÓRIA

*Dedico esse trabalho aos meus pais e irmãos,
por sempre me apoiar em todas as minhas
decisões, acreditando sempre em minha
capacidade.*

AGRADECIMENTOS

À minha família, Roberto, Ismênia, Roberta, Roberto Jr., Denis, Cássio e Lise, pelo apoio e carinho em todos esses anos.

À minha orientadora, Profa. Verônica Castelo Branco, por sempre acreditar em mim e me motivar durante a minha caminhada.

Aos professores, Jorge Soares e Kamilla Vasconcelos, pela co-orientação, e participação ativa na minha formação.

Aos amigos do grupo das misturas do LMP, Renato, Lucas, Rômulo, Daniel, Raul, Lorrán, Felipe, Iuri, Victor, Nathan, Iran, Ivna, Jardel, etc, pelo cooperativismo constante durante o trabalho.

Ao professor Alexandre Bertini, em nome de todo o grupo PET Engenharia Civil, pela construção do meu caráter e pelo impacto causado na minha formação.

Aos grandes amigos que a Engenharia Civil me trouxe, Eugênio, João André, Braga Neto, Marlon, PH, Alexandre, Samuel, Pedro, Talita, Arnaldo, etc, pelas grandes experiências vividas juntos durante esse percurso.

Aos amigos de coração, Paulo César, Remir, Leonardo, Fernando, Felipe, Laura e Amanda, pela companhia e companheirismo em todos os momentos da minha vida.

RESUMO

Um dos problemas mais comuns nos pavimentos flexíveis no Brasil e no mundo é o trincamento motivado pelo processo de fadiga das misturas asfálticas. A fadiga nesses materiais é relacionada a um fenômeno de pequena escala. A literatura atribui ao agregado a responsabilidade por 80% da resistência a deformação permanente de misturas asfálticas, e os outros 20% são pelas propriedades do ligante asfáltico. Com relação à fadiga, 60% da resistência é atribuída ao ligante asfáltico, e 40% aos agregados, seja pelas suas próprias características, ou pela distribuição granulométrica da combinação dos mesmos. Recentemente, autores têm utilizado a parte fina da mistura asfáltica, denominada Matriz de Agregados Finos (MAF), como ferramenta para estimar o comportamento da Mistura Asfáltica Completa (MAC) com relação ao dano por fadiga. Por definição, a MAF é composta por agregados miúdos, fíler e ligante asfáltico. Esse estudo tem como objetivo avaliar a influência dos agregados graúdos no processo de trincamento por fadiga nas misturas asfálticas usando as suas correspondentes partes finas. Uma MAC com Tamanho Máximo Nominal (TMN) de 12,5mm foi dosada usando a metodologia Superpave. A partir desta MAC original, foram dosadas três diferentes MAFs com diferentes TMNs, quais sejam: 1,18mm; 2,00mm e 4,00mm. As amostras de MAF foram submetidas à caracterização do dano por fadiga à deformação controlada usando o Reômetro de Cisalhamento Dinâmico (DSR). As amostras de MAF foram submetidas à caracterizações lineares, para obtenção das curvas mestras de módulo dinâmico. A MAC, e suas correspondentes MAFs, foram submetidas a ensaios de fratura na geometria de semicírculo (SCB), a fim de medir a energia dissipada pela propagação da trinca. Nos resultados do DSR, as curvas mestras de módulo dinâmico foram diferentes, indicando diferentes rigidezes entre as misturas. Os resultados de fratura à 15°C foram diferentes para as MAFs com diferentes TMNs, entretanto à 25°C não obteve-se diferenças consideráveis entre as misturas com diferentes TMNs.

Palavras-chave: Agregado Graúdo, Fadiga, Matriz de Agregados Finos.

ABSTRACT

Fatigue cracking is one of the most common problems in asphalt pavements. This distress is related to a small-scale phenomena. The literature attributes to the aggregate properties approximately 80% of the mixture resistance to rutting, and the other 20% to the asphalt binder properties. Regarding to the fatigue cracking, 60% of this responsibility is attributed to the binder characteristics and the other 40% to the aggregates properties. Recently, authors have used the fine portion of the hot mix asphalt (HMA), known as Fine Aggregates Matrix (FAM), as an intermediate step to estimate the HMA fatigue resistance. By definition, the FAM portion is composed by fine aggregates, asphalt binder and filler. This study aims to understand the influence of the coarse aggregate properties in the HMA fatigue cracking process using the correspondent FAM portion. The HMA, with 12.5mm Maximum Nominal Size (MNS), was designed using the Superpave mix design protocol. Following the original HMA design, the FAM design was evaluated using three different aggregate MNS, 1.18 mm, 2.00 mm, and 4.00 mm. The FAM samples were subjected to controlled strain fatigue damage characterization using the Dynamic Shear Rheometer (DSR). The HMA and the corresponding FAM mixtures were also subjected to the semicircular bending (SCB) fracture test in order to measure the dissipated energy during the crack propagation. For the DSR results, master curves of dynamic modulus were different, indicating different stiffnesses between mixtures. The fracture test results obtained at 15°C were different for the FAM mixtures with different MNS. However, at 25°C, there were no considerable differences between the mixtures with different MNS.

Keywords: Fatigue, Coarse Aggregate, FAM.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características das misturas avaliadas por Sousa <i>et al.</i> (1998).....	11
Tabela 2 - Características dos agregados utilizados no estudo.....	23
Tabela 3 - Características do CAP 50/70 (cedidas pela Lubnor conforme ensaios da especificação ANP realizados na própria refinaria)	25
Tabela 4 - Parâmetros de dosagem	26
Tabela 5 - Características das MAFs utilizadas no estudo	35
Tabela 6 - Volume de vazios das amostras semicirculares	36
Tabela 7 - Resumo dos resultados do ensaio de fratura	37
Tabela 8 - Parâmetros estatísticos para resultados à 25°C	40
Tabela 9 - Parâmetros estatísticos para resultados à 15°C	41
Tabela 10 - Resultado do ensaio de varredura de tempo, MAF 1 e 2	45
Tabela 11 - Resultado do ensaio de varredura de tempo, MAF 3	45

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Principais curvas granulométricas segundo o Superpave	7
Figura 2 - Revestimentos deteriorados por fadiga.....	8
Figura 3 - Matriz de Agregados Finos (MAF)	12
Figura 4 - Os três modos básicos de fratura	15
Figura 5 - Esquema da geometria de uma viga SE(B)	16
Figura 6 - Dimensões (mm) da amostra para ensaio de DC(T).....	17
Figura 7 - Ilustração da amostra semicircular	18
Figura 8 - Obtenção da energia de fratura	22
Figura 9 - Distribuição granulométrica dos agregados para a MAC e suas respectivas MAFs com diferentes TMNs	24
Figura 10 - (a) Misturador de escala laboratorial; (b) Compactador Giratório Superpave (CGS).....	26
Figura 11 - Ilustração do procedimento para determinação do teor de ligante asfáltico da MAF com um TMN de 2,00mm	28
Figura 12 - Amostras de MAF para o DSR	30
Figura 13- Procedimento para serragem das amostras na geometria de semicírculo.....	30
Figura 14 - Amostra após o entalhe.....	31
Figura 15 - Amostra sendo ensaiada.....	32
Figura 16 - Reômetro de Cisalhamento Dinâmico (DSR).....	32
Figura 17 - Ensaio de varredura de deformação (Pré-teste)	34
Figura 18 - Curva do ensaio com dados de Força × Deslocamento	36
Figura 19 - Resultados de semicírculo	37
Figura 20 - Energia total de cada mistura avaliada nas temperaturas de (a) 25°C e (b) 15°C. 39	
Figura 21 - Energia até a carga máxima ($P_{máx}$) de cada mistura avaliada nas temperaturas de (a) 25°C e (b) 15°C.....	40
Figura 22 - Médias das energias totais para cada mistura nas temperaturas de (a) 25°C e (b) 15°C.....	40
Figura 23 - Curvas mestras do módulo dinâmico para a temperatura de referência de 20°C ..42	
Figura 24 - Curvas mestras do ângulo de fase para a temperatura de referência de 20°C	42
Figura 25 - Resultados da varredura de deformação para a MAF 3, #16 (1,18mm).....	43
Figura 26 - Resultados da varredura de deformação para a MAF 2, #10 (2,00mm).....	44

Figura 27 - Resultados da varredura de deformação para a MAF 1, #5 (4,00mm).....	44
Figura 28 - Varredura de tempo para as amostras de 1,18mm de TMN	46
Figura 29 - Varredura de tempo para as amostras de 2,00mm de TMN	46
Figura 30 - Varredura de tempo para as amostras de 4,00mm de TMN	47

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Problemática e Problema de Pesquisa.....	1
1.1.1	Problemática	1
1.1.2	Problema de Pesquisa	3
1.2	Objetivos	3
1.2.1	Objetivo Geral	3
1.2.2	Objetivos Específicos	3
1.3	Estrutura da Monografia	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1	Pavimentos Asfálticos.....	5
2.2	Fadiga em Misturas Asfálticas.....	8
2.2.1	Influência do Agregado no Dano por Fadiga	9
2.2.2	Matriz de Agregados Finos (MAF)	12
2.3	Mecânica da Fratura.....	14
2.3.1	Métodos de Ensaio	15
2.3.2	Mecânica da Fratura Aplicada à Misturas Asfálticas	18
3	MATERIAIS E MÉTODOS	23
3.1	Materiais	23
3.1.1	Agregados.....	23
3.1.2	Ligante Asfáltico	24
3.1.3	Dosagem da Mistura Asfáltica Completa (MAC).....	25
3.1.4	Dosagem das Matrizes de Agregados Finos (MAFs).....	27
3.1.5	Moldagem e Extração dos CPs de MAF	29
3.1.6	Fabricação das Amostras Semicirculares para Ensaio de Fratura	30
3.2	Procedimento do Ensaio de Fratura em Semicírculo.....	31

3.3	Ensaio Usando o DSR	32
3.3.1	Caracterização do Comportamento Viscoelástico Linear das MAFs.....	33
3.3.2	Vida de Fadiga.....	33
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	35
4.1	Resultados das Dosagens das Matrizes de Agregados Finos (MAFs).....	35
4.2	Ensaio de Fratura.....	35
4.3	Ensaio no DSR	41
4.3.1	Ensaio de caracterização do comportamento viscoelástico linear das MAFs	41
4.3.2	Ensaio de varredura de deformação a 25°C	43
4.3.3	Ensaio de varredura de tempo a 25°C	45
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES	48
5.1	Conclusões	48
5.2	Sugestões para trabalhos futuros.....	49
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50

1 INTRODUÇÃO

1.1 Problemática e Problema de Pesquisa

1.1.1 Problemática

Os pavimentos asfálticos devem possuir uma qualidade mínima para que estejam adequados às necessidades de seu uso. Para isso, devem ser combinadas, corretamente, diferentes etapas dos processos de projeto e de execução dos mesmos, a fim de se construir um pavimento durável. Isso é possível, também, a partir de um projeto de mistura, ou dosagem, adequado, que é realizado escolhendo-se combinações e proporções corretas de agregados e de ligante asfáltico. Essa proporção ideal de ligante asfáltico é chamada de teor de projeto. O objetivo da dosagem é obter uma mistura que garanta durabilidade para o revestimento asfáltico, além de estabilidade suficiente de acordo com a demanda de tráfego com um nível aceitável de deformações para a mistura asfáltica compactada (DNER, 1997).

Nos revestimentos das principais rodovias do Brasil são utilizadas misturas do tipo Concreto Asfáltico (CA), constituídas de Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP), agregados graúdos, agregados miúdos e fíler, além dos vazios presentes nesse tipo de material. Por possuírem propriedades distintas entre si, é fundamental a caracterização individual desses constituintes. Sabe-se que a microestrutura formada por esses materiais desempenha papel importante na resistência do pavimento com relação à deformação permanente, ao trincamento por fadiga e ao trincamento térmico (MONISMITH, 1991; VINSON *et al.*, 1999; BERNUCCI *et al.*, 2007).

Entre os problemas mais comuns nos pavimentos flexíveis no Brasil e no mundo encontra-se o trincamento motivado pelo processo de fadiga das misturas asfálticas (MEDINA, 1997; HUANG, 2004). Além disto, a resistência ao trincamento por fadiga da camada de revestimento é um dos parâmetros usados nos métodos de dimensionamento empírico-mecanísticos de pavimentos asfálticos no Brasil (MOTTA, 1991; SILVA, 1995; BENEVIDES, 2000). A fadiga em misturas asfálticas é relacionada a um fenômeno de pequena escala. À medida que aumentamos a quantidade dos componentes (agregados e ligante) das misturas asfálticas, também alteramos a sua susceptibilidade com relação aos parâmetros de desempenho do pavimento. O aumento no teor de ligante asfáltico eleva a susceptibilidade da mistura à deformação permanente. Por outro lado, o aumento na fração volumétrica dos agregados pode aumentar a susceptibilidade da mistura ao trincamento por

fadiga. Segundo a FHWA (2002), o agregado é responsável por aproximadamente 80% da resistência a deformação permanente de misturas asfálticas, e os outros 20% são dados pelas propriedades do ligante asfáltico. Com relação à fadiga, 60% da resistência é atribuída às propriedades do ligante asfáltico, e 40% às propriedades dos agregados, seja pelas suas características individuais, ou seja pela distribuição granulométrica da combinação dos mesmos.

Recentemente, autores têm utilizado a parte fina de misturas asfálticas, denominada Matriz de Agregados Finos (MAF), como ferramenta para estimar o comportamento da Mistura Asfáltica Completa (MAC). Por definição, a MAF é composta por agregados miúdos, fíler e ligante asfáltico. Kim *et al.* (2003) foram os primeiros a propor um procedimento para a dosagem desse tipo de mistura. Visando melhorar algumas das limitações presentes no método de dosagem proposto por Kim *et al.* (2003), Castelo Branco (2008), com influência de Zollinger (2005), propôs um método mais realista, mudando inclusive a forma de compactação das amostras e a determinação do teor de ligante asfáltico contido na parte fina das misturas. Mais recentemente, Karki (2010), Coutinho *et al.* (2011) e Sousa *et al.* (2011) propuseram algumas mudanças no procedimento de dosagem, tanto com relação a determinação do teor de ligante asfáltico, como na metodologia utilizada para a dosagem desta parte da MAC.

Com relação à fadiga, alguns autores (KIM *et al.*, 2003; MASAD *et al.*, 2007) afirmam que a parte fina da mistura asfáltica exerce influência importante nesse processo. Porém, na literatura não existe um consenso com relação a essa questão. Existem indicativos de que a parte fina exerce influência na resistência ao dano por fadiga em misturas asfálticas. Dessa forma, esta pode ser utilizada como passo intermediário na previsão do comportamento da MAC. Além do já citado, ainda existem outras questões na literatura com relação ao uso da MAF para o estudo de fadiga, como a determinação da peneira que limita o tamanho máximo do agregado miúdo a ser utilizado nessa fase da mistura. Alguns trabalhos (KIM *et al.*, 2003; ZOLLINGER, 2005; ARAMBULA, 2007; MASAD *et al.*, 2007; CARO *et al.*, 2008; CASTELO BRANCO, 2008; VASCONCELOS *et al.*, 2009; ARAGÃO, 2011) ao moldar amostras de MAF definiram a peneira #16 (1,18mm) como limite superior. Aragão *et al.* (2010) e Daí e You (2007) utilizaram peneiras diferentes (0,6 e 2,36mm, respectivamente) para separar a parte graúda da parte miúda da mistura asfáltica. No Brasil, a maior parte das pesquisas desenvolvidas utilizando MAFs (COUTINHO *et al.*, 2010, 2011, 2012) usa a

peneira #10 (2,00mm) pelo fato da peneira #16 (1,18mm) não pertencer à série de peneiras normatizadas no Brasil, e esta ser a mais próxima da peneira americana.

Dada essa problemática, o presente estudo tem como objetivo principal avaliar a influência dos diferentes tamanhos de agregados no processo de trincamento por fadiga em misturas asfálticas finas. Para isso serão moldadas MAFs com diferentes Tamanhos Máximos Nominais (TMNs) de agregados (diferentes peneiras para separação da parte graúda da parte miúda), observando o fator de três para manter a representatividade dos resultados observado por Kim *et al.* (2004), e estas serão caracterizadas com relação à fadiga no Reômetro de Cisalhamento Dinâmico (*Dynamic Shear Rheometer - DSR*), e em seguida amostras de MAF e de MAC serão submetidas à ensaios de fratura utilizando amostras semicirculares para medida da energia dissipada no processo.

1.1.2 Problema de Pesquisa

O desempenho das misturas asfálticas com relação à fadiga está diretamente ligado à composição formada por agregados miúdos, fíler e ligante asfáltico. Porém, a fadiga é um fenômeno complexo e não sabemos, ao certo, a influência de cada constituinte da mistura asfáltica no fenômeno. Sabe-se que o agregado graúdo é de fundamental importância no combate à deformação permanente. Pretende-se nesse estudo avaliar sua influência de seus fino também no desempenho da mistura com relação à fadiga.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral neste estudo é avaliar a influência da variação do TMN de MAFs em sua resistência ao trincamento, a partir de observações em laboratório.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Comparar o teor de ligante e a viabilidade da metodologia de dosagem de MAFs proposta por Coutinho (2011) para misturas com diferentes TMN;
- Avaliar se o método proposto por Coutinho *et al.* (2011) é aplicável para diferentes TMNs de MAFs;

- Comparar o desempenho de diferentes MAFs, com diferentes TMNs, com relação ao trincamento por fadiga utilizando ensaios realizados com o uso do DSR;
- Verificar o efeito na mudança do TMN dos agregados nos resultados de módulo dinâmico nas MAFs;
- Verificar o efeito do TMN dos agregados na energia dissipada durante o ensaio de fratura em amostras semicirculares para MAC e diferentes MAFs para ensaios realizados em diferentes temperaturas.

1.3 Estrutura da Monografia

- O Capítulo 1 (Introdução) apresenta o tema de estudo da monografia, mostrando os tópicos a serem pesquisados. Descreve, ainda, a problemática, o problema de pesquisa, os objetivos geral e específicos, e finaliza com a descrição da estrutura da monografia.
- O Capítulo 2 (Revisão Bibliográfica) descreve o tema relacionado ao problema de pesquisa com maiores detalhes. Além disso, define todos os conceitos e parâmetros utilizados no trabalho.
- O Capítulo 3 (Materiais e Métodos) é o capítulo que mostra as fontes dos agregados e do ligante asfáltico utilizados na pesquisa, como base para a moldagem das amostras a serem ensaiadas. Descreve também: (i) a metodologia de preparação das amostras; (ii) o procedimento dos ensaios utilizados no estudo e (iii) a metodologia para análise dos resultados.
- O Capítulo 4 (Resultados e Discussões) apresenta os dados e as análises dos resultados dos ensaios de fadiga realizados utilizando o DSR, e de energia dissipada pelo processo de fratura obtida através da execução dos ensaios realizados em amostras semicirculares.
- O Capítulo 5 (Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros) apresenta as conclusões obtidas através da avaliação dos resultados da presente pesquisa, bem como as recomendações para pesquisas e trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Pavimentos Asfálticos

De acordo com Bernucci *et al.* (2007), pavimento pode ser definido como uma estrutura de várias camadas, construída sobre a superfície final de terraplenagem, destinada a resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos e das ações do clima. Este deve também fornecer aos seus usuários boas condições de rolamento, com níveis de conforto, economia e segurança adequados. Existem dois tipos de pavimento: (i) rígido; e (ii) flexível. O foco desta pesquisa está nos pavimentos flexíveis, mais especificamente na camada final destes, ou seja, no revestimento asfáltico.

Pavimentos asfálticos são aqueles cuja camada de superfície, ou de revestimento, é composta por uma mistura constituída de agregados e ligante asfáltico. Os pavimentos são formados geralmente por quatro camadas: (i) revestimento; (ii) base; (iii) sub-base; (iv) e reforço de subleito. Além dessas, podem existir camadas intermediárias ou camadas de ligação que compõem o revestimento, e a depender do nível de tráfego e dos materiais empregados, algumas camadas podem ser suprimidas.

O revestimento asfáltico é a camada mais superficial de um pavimento, ou seja, é a camada que recebe diretamente as ações do tráfego e transmite para as outras camadas da estrutura. A maioria dos pavimentos asfálticos brasileiros utiliza como camada de revestimento uma mistura composta por agregados minerais, que variam em tamanho, fonte, e ligante asfáltico. Essa mistura, que deve ser dosada adequadamente de acordo com os materiais disponíveis e as outras camadas do pavimento, precisa possuir requisitos de durabilidade, de estabilidade e de resistência aos diversos mecanismos de dano, de acordo com o tráfego e com o clima ao qual esta será submetida. As misturas asfálticas se diferenciam na forma em que são usinadas, podendo ser misturadas em uma usina e em seguida transportadas para a compactação no campo, ou usinadas *in situ*, onde a mistura entre os agregados e o ligante asfáltico ocorre no local de aplicação e compactação.

Entre as misturas usinadas, existem aquelas usinadas à temperatura ambiente, chamadas de misturas a frio, e aquelas usinadas a temperaturas elevadas, chamadas de misturas a quente. As misturas a quente podem possuir agregados com graduações distintas, fornecendo estruturas diferentes. O tipo de mistura mais utilizado no Brasil é o CA, também denominado de CBUQ (Concreto Betuminoso Usinado a Quente). Este costuma ser o tipo de mistura com os melhores padrões de resistência, possuindo uma graduação mais densa, ou

bem-graduada, obtida através do equilíbrio entre os tamanhos dos grãos (BERNUCCI *et al.*, 2007). O CA, chamado nesse estudo de MAC, será o tipo de mistura a ser explorado e estudado nesta pesquisa, com um foco na influência das propriedades de seus agregados na resistência ao dano por fadiga.

A ABNT NBR 9935/2005 define agregado como sendo “um material sem forma ou volume definido, geralmente inerte, de dimensões e propriedades adequadas para produção de argamassas e de concreto”. Os agregados podem ser classificados de acordo com sua natureza, tamanho e distribuição dos seus grãos. Além disso, suas características podem estar ligadas aos processos de britagem, como o tipo de operação realizada e o tipo de britador utilizado. Roberts *et al.* (1996) mencionam que é desejável a produção de agregados com formato cúbico e não achatado ou alongado.

O tipo de agregado escolhido em um projeto de mistura asfáltica deve apresentar propriedades adequadas para suportar as tensões impostas pelo tráfego. A escolha desses agregados e a forma com que eles estarão dispostos dependerão do comportamento que se espera dos mesmos. Por isso, deve ser feita uma completa caracterização dos agregados antes de utilizá-los em uma mistura asfáltica. Essa caracterização é realizada através de ensaios laboratoriais que costumam prever o comportamento dos agregados de acordo com suas diversas propriedades.

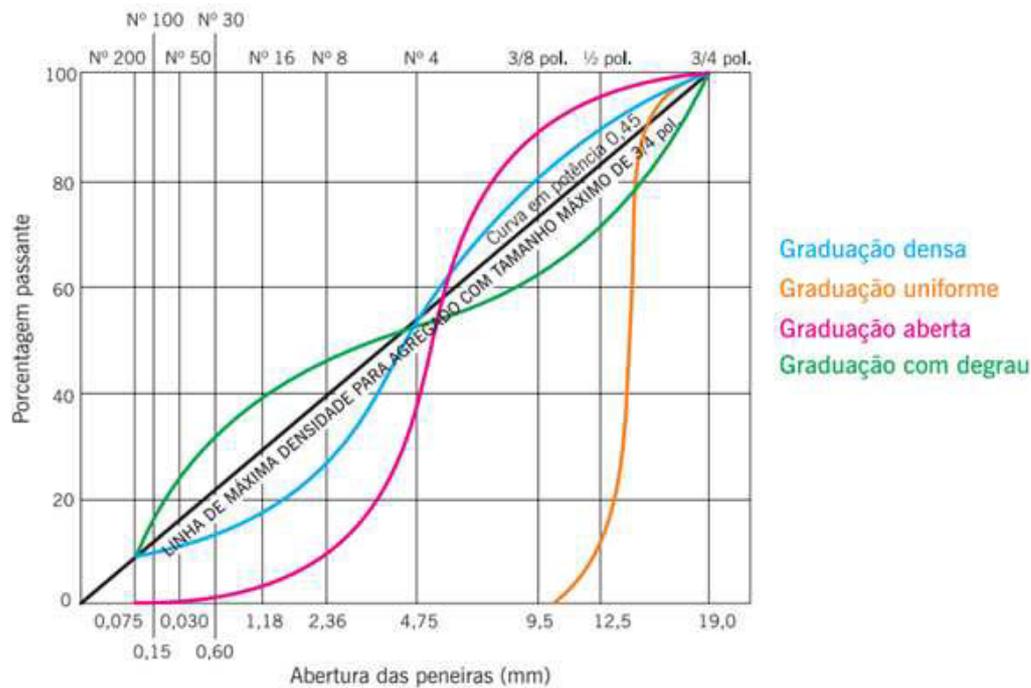
O agregado também pode ser classificado de acordo com o seu tamanho. Essa classificação divide os agregados em graúdos, miúdos e material enchimento ou fíler (DNIT - ES 031/2004). Os materiais graúdos são aqueles maiores do que 4,75mm (retidos na peneira #4), os materiais miúdos são aqueles maiores do que 0,075mm (retidos na peneira #200) e menores do que 4,75mm (passantes na peneira #4) e o fíler é o material menor do que 0,075mm (passante na peneira #200).

A combinação desses agregados forma o esqueleto mineral das misturas asfálticas. Uma distribuição granulométrica adequada é um fator preponderante para a confecção de uma mistura de bom desempenho a curto, médio e longo prazos, uma vez que esta tem influência direta em diversas propriedades importantes das misturas (VASCONCELOS, 2004). A norma do DNER-ME 035/95 estabelece a forma de distribuição granulométrica através do processo de análise por peneiramento, e os tamanhos das malhas das peneiras que devem ser utilizadas.

A forma de apresentação da granulometria de acordo com o Superpave é feita através de um gráfico onde a porcentagem de agregados passante em uma certa peneira está no eixo y, enquanto o tamanho dessa malha elevado à uma potência n (normalmente $n = 0,45$) está no

eixo x (BERNUCCI *et al.*, 2007). Assim, forma-se uma curva característica da granulometria que mostra a combinação dos agregados utilizados na mistura. Bernucci *et al.* (2007) citam as graduações mais importantes: (i) densa, (ii) aberta, (iii) uniforme e (iv) descontínua ou com degrau, conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1 - Principais curvas granulométricas segundo o Superpave



(Fonte: Bernucci *et al.*, 2007)

O *United States Army Corps of Engineers* (USACE) ainda subdivide as misturas densas em convencionais CBUQ, *large-stone* e Areia Asfáltica Usinada a Quente (AAUQ). As misturas abertas são subdivididas como porosas e base permeável tratada com asfalto. E por fim, as misturas descontínuas como convencionais (*Intermediate Stone Content*) e *Stone Matrix Asphalt* (SMA).

Segundo os pesquisadores do *Strategic Highway Research Program* (SHRP), os agregados têm propriedades que influenciam diretamente no desempenho das misturas asfálticas. Dessa forma, as propriedades dos agregados são classificadas em duas categorias: (i) de consenso e (ii) de origem. As propriedades de consenso são aquelas que são consideradas de exigência fundamental para o bom desempenho dos revestimentos (angularidade do agregado gráudo e do agregado miúdo, partículas alongadas e achatadas, e

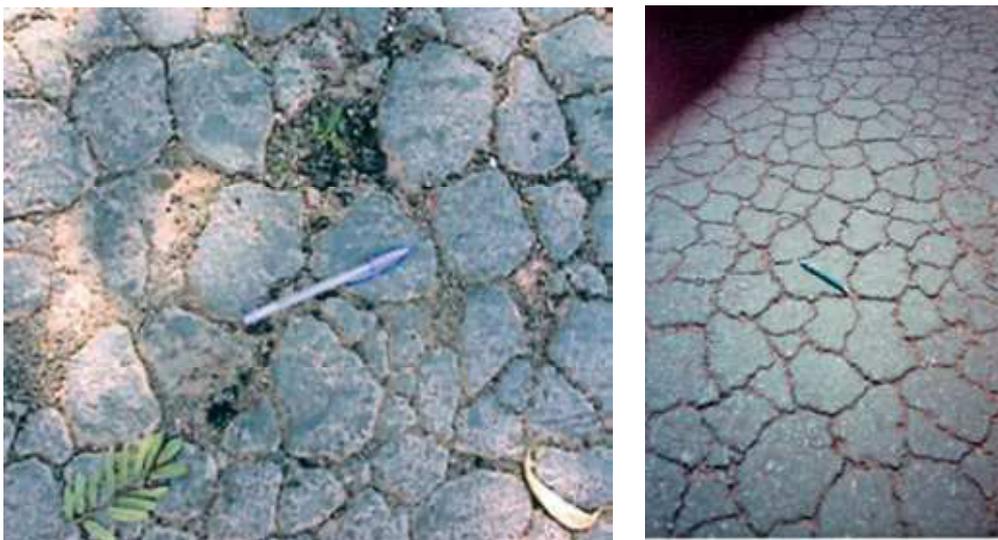
teor de argila). As propriedades de origem são aquelas inerentes ao local de obtenção dos agregados (resistência à abrasão, sanidade, presença de materiais deletérios, etc).

O CAP é o derivado mais denso do petróleo, e possui um comportamento dependente da temperatura e da taxa de carregamento. O CAP ao receber um carregamento rápido, decorrente de um tráfego de maior velocidade, tem um comportamento comparável a um sólido elástico, e ao receber um carregamento lento, decorrente de um baixo volume de tráfego, tem um comportamento comparável a um fluido viscoso, além de sofrer influência da temperatura, por isso é considerado um material termoviscoelástico.

2.2 Fadiga em Misturas Asfálticas

O dano por fadiga (formação e propagação de micro e macro trincas) ocasionado pelo carregamento dinâmico repetido é um dos principais defeitos que ocorrem em pavimentos asfálticos. Este tipo de dano é provocado pelo tráfego de veículos e pela constante mudança nas condições climáticas às quais a mistura asfáltica está submetida (COUTINHO *et al.*, 2011). A vida de fadiga em revestimentos asfálticos é um dos parâmetros usados nos métodos de dimensionamento empírico-mecanístico de pavimentos no Brasil (MOTTA, 1991; SILVA, 1995; BENEVIDES, 2000). A Figura 2 ilustra pavimentos deteriorados por este processo de dano.

Figura 2 - Revestimentos deteriorados por fadiga



Fonte: Bernucci *et al.* (2007)

O entendimento do processo de fadiga em misturas asfálticas não é simples devido à heterogeneidade do material, que é na realidade um compósito formado por partículas elásticas (agregados) e o mástique (ligante asfáltico e fíler) com propriedades viscoelásticas. O mástique leva a mistura a um comportamento dependente da taxa de carregamento, sendo sensível à temperatura, além de sofrer um processo de endurecimento devido ao envelhecimento do ligante asfáltico (SHRP, 1994).

No estudo de fadiga no Brasil, o ensaio a tensão controlada é o mais utilizado. Esse ensaio é realizado em equipamento pneumático, sob compressão diametral, com frequência de 1Hz e a temperatura de 25°C. Apesar de sua simplicidade, esse ensaio possui uma série de desvantagens como aquelas relatadas por Monismith (1958). Durante o processo de fadiga, ocorre dano no material (mudança em sua estrutura causando diminuição da rigidez do mesmo) e dissipação de energia. A resistência à fadiga depende, portanto, do montante de energia dissipada nos ciclos de tensão-deformação onde, para a mesma frequência, a onda de deformação fica defasada de um determinado valor (ângulo de fase) em relação à de tensão, formando o que se conhece por *loop* de histerese (TAYEBALLI *et al.*, 1993; SHAMES, 1997). O conceito de energia dissipada já vem sendo amplamente utilizado em universidades europeias e norte americanas, e muitos trabalhos têm sido desenvolvidos usando esse conceito também no Brasil (ZOLLINGER, 2005; ARAMBULA, 2007; MASAD *et al.*, 2007; CARO *et al.*, 2008; CASTELO BRANCO, 2008; VASCONCELOS *et al.*, 2009; COUTINHO, 2012).

Durante o processo de fadiga, a interpretação do comportamento do material é complexa. Este comportamento é comum nos materiais asfálticos, podendo ser abordado basicamente por duas teorias: (i) mecânica da fratura e (ii) mecânica do contínuo. A primeira capta fenômenos ocorrendo na escala das microtrincas para representar o comportamento do material, enquanto a segunda representa globalmente os fenômenos da microescala através do uso de variáveis de estado. Dessa forma, reduz-se a complexidade do problema e os consequentes custos computacionais, ao preço de uma análise menos detalhada e da necessidade de alguns experimentos para a determinação da lei evolutiva das variáveis de estado (COUTINHO, 2012).

2.2.1 Influência do Agregado no Dano por Fadiga

Muitos estudos relatados na literatura mostram a importância das propriedades dos agregados no desempenho das misturas asfálticas, tanto com relação à resistência à deformação permanente (MASAD *et al.*, 2003; SOUZA, 2009; BESSA, 2012), quanto com

relação à resistência ao dano por fadiga (MONISMITH, 1970; SOUSA *et al.*, 1998; VASCONCELOS, 2004; MASAD *et al.*, 2005). Esse desempenho está diretamente relacionado às propriedades de forma dos agregados, e ao tipo de graduação da mistura asfáltica.

Vasconcelos (2004) avaliou misturas asfálticas com diferentes granulometrias contínuas e descontínuas mantendo o volume de vazios (Vv) igual à 4%. Foram selecionadas granulometrias passando abaixo, acima e através da Zona de Restrição (ZR) preconizadas na especificação Superpave. Estas misturas foram dosadas tanto pela metodologia Superpave quanto pela metodologia Marshall. Duas misturas do tipo SMA, com diferentes TMNs (12,5 e 9,5mm), além das misturas do tipo MAC, também foram utilizadas nesse estudo. A caracterização do dano por fadiga para essas misturas foi feita através do ensaio de compressão diametral a tensão controlada. Os resultados mostraram que a mistura do tipo SMA com TMN de 12,5mm apresentou uma curva de fadiga com a mesma inclinação (porém passando acima da mesma mistura com TMN de 9,5mm), o que é indicativo de maior vida de fadiga. A mistura com a curva granulométrica passando através da ZR apresentou uma menor vida de fadiga, e a mistura com granulometria que passou abaixo da ZR, apresentou vida de fadiga semelhante àquelas encontradas para as misturas do tipo SMA.

Nejad *et al.* (2010) utilizaram o ensaio de compressão diametral para caracterização de misturas asfálticas convencionais e do tipo SMA, com relação à fadiga. Foram utilizadas duas misturas convencionais com diferentes TMNs (12,5 e 9,5mm) e três misturas do tipo SMA também com diferentes TMNs (19; 12,5 e 9,5mm). As misturas do tipo MAC, tiveram teores de ligante asfáltico muito próximos (5,1% e 5,0%, respectivamente), enquanto as misturas SMA tiveram teores de ligante asfáltico bem diferentes para as misturas com os respectivos TMNs (7,8%; 5,5% e 6,5%). O ensaio foi realizado em três temperaturas (5, 25 e 40°C). Os autores concluíram que o aumento da temperatura reduziu a rigidez das amostras e a vida de fadiga das mesmas, e essa tendência ocorreu independente da granulometria utilizada. Os valores de vida de fadiga e rigidez encontrados para as misturas convencionais foram maiores quando comparados aos valores obtidos para as misturas do tipo SMA, quando o TMN foi avaliado. Segundo os autores, as misturas com menores TMNs são mais densas, e esta característica levou a valores de desempenho superiores, com relação à fadiga. Finalmente, foi concluído que o a graduação do agregado tem maior influência se comparada ao efeito do ligante asfáltico no dano por fadiga para as misturas analisadas.

Sousa *et al.* (1998) utilizaram o ensaio de fadiga em viga apoiada em quatro pontos (*Four-point bending fatigue test*) para determinação do desempenho de fadiga para misturas asfálticas com nove diferentes composições granulométricas. Misturas asfálticas com diferentes TMNs e com curvas granulométricas passando abaixo, acima e através das ZR foram confeccionadas com três diferentes teores de CAP para cada granulometria (sendo um alto, um médio e um baixo, onde o médio era o valor determinado na dosagem). A Tabela 1 mostra os TMNs, os teores de CAP e a classificação Superpave dos ligantes asfálticos. Foi percebido que as misturas com graduações mais finas obtiveram um melhor desempenho com relação à fadiga, e isso foi atribuído ao fato do teor de ligante para esse tipo de mistura ser superior.

Tabela 1 - Características das misturas avaliadas por Sousa *et al.* (1998)

Mistura	TMN (mm)	Teor de CAP (%)			Classificação
		Baixo	Médio	Alto	
A	25,0	4,7	5,2	5,7	PG 64-18
B	19,0	4,5	4,9	5,4	PG 58-16
C	19,0	4,8	5,3	5,8	PG 64-18
D	19,0	4,5	4,9	5,4	PG 64-18
H	19,0	4,0	4,4	5,0	PG 64-18
J	25,0	3,7	4,0	4,4	PG 64-18
M	25,0	3,7	4,0	4,4	PG 58-16
Q	12,5	4,5	5,0	5,5	PG 64-18
S	35,0	3,8	4,1	4,8	PG 64-18

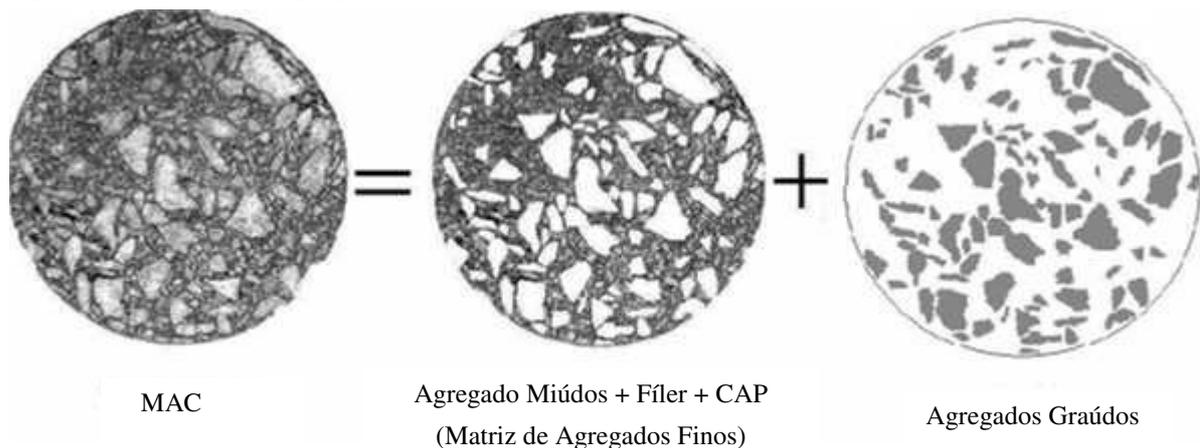
Souza *et al.* (2012) avaliaram o efeito da angularidade do agregado graúdo e do agregado miúdo na resistência ao dano por fadiga, através da quantificação da energia de fratura obtida durante o ensaio de compressão diametral conduzido com deslocamento controlado de 0,833mm/s. Foram fixados parâmetros volumétricos para as misturas asfálticas avaliadas (cinco MACs e duas MAFs), junto com a combinação de diferentes valores de angularidade para os agregados graúdos e miúdos, a fim de se observar a influência dessa propriedade com relação à resistência a fadiga. O teor de ligante asfáltico se caracterizou como outra variável na análise, uma vez que as misturas possuíam teores diferentes entre si, entre 4,7% à 6,0% (EPPS *et al.*, 1998). A influência da angularidade do graúdo não pode ser avaliada de forma conclusiva, uma vez que as misturas possuíam diferentes teores de ligante, e o efeito do ligante pode ter se sobreposto ao efeito da variação da angularidade do agregado. Quanto à angularidade do agregado miúdo, as MAFs com mesmo teor de ligante foram

testadas, e percebeu-se que quanto maior a angularidade, maior foi também o potencial de trincamento (maior facilidade da ocorrência de trincas), devido à concentração de tensões nos cantos das partículas.

2.2.2 Matriz de Agregados Finos (MAF)

A MAF é a porção fina da MAC, Figura 3. Enquanto a MAC é a combinação de agregados graúdos, miúdos, fíler e ligante, a MAF é a combinação de agregados miúdos, fíler e ligante asfáltico. Estudos recentes realizados na Universidade americana Texas A&M propuseram um procedimento de teste experimental de fadiga que se realiza primeiramente na MAF, que tem uma estrutura interna relativamente mais uniforme em comparação com a MAC (COUTINHO *et al.*, 2011).

Figura 3 - Matriz de Agregados Finos (MAF)



Fonte: Coutinho *et al.* (2011)

Pesquisadores da Texas A&M foram os pioneiros ao usarem essa ferramenta para o estudo de misturas asfálticas. A peneira #16 foi escolhida para dividir os agregados em graúdos e miúdos, onde as amostras de MAF possuem TMN de 1,18mm. A maioria dos trabalhos com o uso de MAFs adota o TMN de 1,18mm para suas amostras (KIM *et al.*, 2003; ZOLLINGER, 2005; ARAMBULA, 2007; MASAD *et al.*, 2007; CARO *et al.*, 2008; CASTELO BRANCO, 2008; VASCONCELOS *et al.*, 2009; ARAGÃO, 2011). Outros autores (DAI e YOU, 2007; ARAGÃO *et al.*, 2010) moldaram MAFs com TMN diferentes das convencionais. Aragão *et al.* (2010) usou a peneira #30 (0,6mm) na confecção das MAFs, justificado pelo processamento digital de imagens realizado em suas amostras de MAC.

Porém, a escolha do TMN por esse método, é limitada pela sensibilidade do software de análise utilizado. Dai e You (2007) também utilizaram uma peneira diferente para moldar as MAFs. A peneira #8 (2,36mm) foi utilizada. No Brasil foi utilizada a peneira #10 (2,00mm) pelo fato da peneira #16 não pertencer à série de peneiras normatizadas (COUTINHO *et al.*, 2010, 2011, 2012).

A qualidade do mástique (interação físico-química de CAP com material de enchimento, passante na peneira #200) e da MAF exerce influência no desempenho das misturas asfálticas. A uniformidade da estrutura interna desses materiais em relação à MAC possibilita uma caracterização mais precisa dos mesmos em laboratório. Além disso, por se utilizar amostras de tamanho reduzido, há uma considerável economia de material e de tempo (COUTINHO, 2012).

O DSR pode ser utilizado, para avaliar as propriedades de MAFs, com relação ao potencial para trincamento das mesmas. Amostras cilíndricas de 12mm de diâmetro e 50mm de altura são geralmente utilizadas. Esse equipamento aplica carregamento torcional cíclico, e pode realizar testes tanto à tensão quanto à deformação controlada.

Kim *et al.* (2003) foram os primeiros a usar o DSR para caracterizar o dano por fadiga e o potencial para *healing* em MAFs. Estes autores usaram uma abordagem baseada na mecânica do dano contínuo e na energia dissipada no processo de dano, para a avaliação da influência de diferentes fíleres e diferentes ligantes asfálticos na resistência ao dano por fadiga das MAFs. Foram realizados ensaios a deformação controlada com frequência de 10Hz e a temperatura de 25°C. As mudanças no módulo dinâmico, *pseudo* rigidez e a energia de deformação dissipada foram monitoradas em teste com diferentes amplitudes de deformação.

Zollinger (2005) usou também uma abordagem baseada na mecânica do dano contínuo para caracterizar o dano por umidade induzida em MAFs. As amostras, condicionadas ou não, foram caracterizadas na região viscoelástica linear com ensaios conduzidos a baixos valores de deformação controlada (0,0065%) e frequência de 10Hz. Essas amostras foram ensaiadas também com relação à resistência ao trincamento por fadiga em testes conduzidos a deformação controlada de 0,2% ou 0,3% (em função da rigidez das amostras). A abordagem mostrou que o dano por umidade induzida muda a resistência à fadiga das misturas. Na utilização do DSR para caracterização do dano por umidade induzida, Arambula (2007) avaliou a influência da variação da distribuição de vazios na suscetibilidade à umidade de MAFs. A autora realizou a comparação entre CAs e suas respectivas MAFs. Na caracterização das MAFs, foi usada abordagem baseada na mecânica da fratura.

Castelo Branco (2008) avaliou a influência do modo de carregamento na resistência ao trincamento por fadiga para diferentes MAFs. A autora usou diferentes abordagens, porém relacionadas entre si para conduzir a análise. Esta também usou uma abordagem baseada na mecânica da fratura para avaliar o modelo proposto por Masad *et al.* (2007), realizando ensaios no DSR com diferentes amplitudes de tensão e deformação. Através desse trabalho, os autores conseguiram um parâmetro de dano por fadiga, que gera resultados comparáveis para diferentes materiais mesmo quando diferentes formas de carregamento são utilizadas.

Coutinho (2012) utilizou a caracterização de MAFs como passo intermediário para previsão do comportamento do dano por fadiga em MACs. Foi feita uma análise convencional de fadiga, com uma varredura de tempo (tensão e deformação controladas). Estes resultados foram comparados com aqueles obtidos através de um método inicialmente proposto por Johnson (2010), que consiste em uma varredura linear de amplitude de deformação e na aplicação de conceito de dano contínuo em meio viscoelástico. Para isso, foram avaliadas três misturas, sendo duas com o mesmo agregado granítico e CAPs diferentes (convencional e modificado com o polímero EVA), e outra com agregados de diferentes origens e CAP convencional. Ensaios de varredura de tempo foram realizados a 10Hz, durante 24h, mantendo-se a deformação controlada. A temperatura de ensaio foi de 25°C para todas as misturas. A vida de fadiga foi caracterizada como sendo o ponto onde houve diminuição de 50% da rigidez da mistura para os ensaios conduzidos a deformação controlada. Nas análises de fadiga convencional, foram encontrados valores opostos para a vida de fadiga considerando as diferentes formas de carregamento. A MAF com maior vida de fadiga à deformação controlada apresentou também menor vida de fadiga quando o ensaio foi conduzido à tensão controlada. Com relação ao ensaio de varredura linear de amplitude de deformação, os resultados foram próximos aqueles encontrados com o uso da metodologia convencional de análise (varredura de tempo a deformação controlada), com diferenças de 15% no máximo.

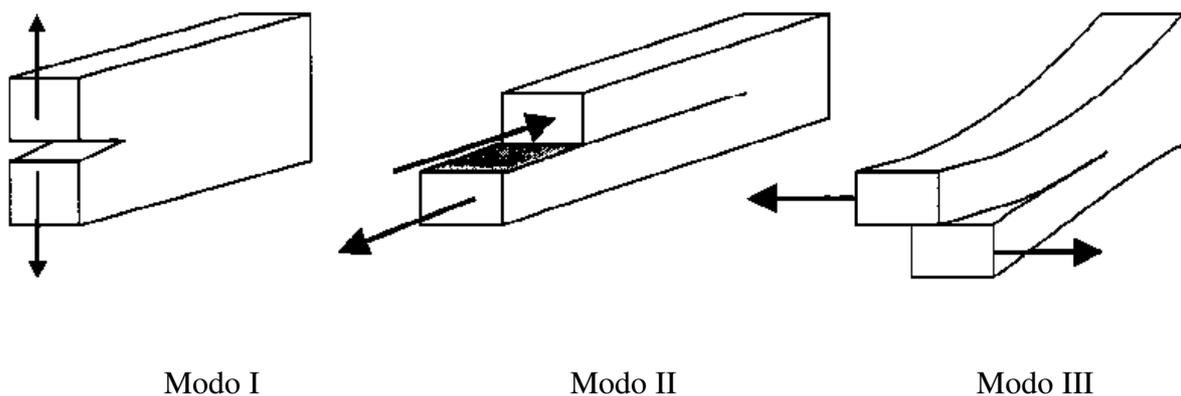
2.3 Mecânica da Fratura

A mecânica da fratura fornece os princípios que governam o início e a propagação de trincas em diversos materiais, dentre eles os materiais asfálticos. Fissuras, ou mesmo pequenos defeitos existentes no material, intensificam a concentração de tensões locais. Se a energia armazenada na extremidade dessa fissura for igual à energia necessária à formação de

uma nova superfície, haverá o início da propagação dessa fissura, ou trinca (MONTESTRUQUE *et al.*, 2010).

A teoria da mecânica da fratura foi desenvolvida no início do século XX, para estudar falhas em materiais frágeis (quebradiços), mas avanços na mecânica computacional levaram a teorias de falhas que consideram também materiais como: metais dúcteis, cerâmicos, concreto de cimento Portland e também concreto asfáltico (RODRIGUES, 1991). Ao se estudar o trincamento no processo de fratura, três tipos de movimentos cinemáticos podem ser observados em uma trinca (parte superior, com relação à parte inferior). Esses três modos de fissura, ilustrados na Figura 4, podem ocorrer individualmente ou simultaneamente no processo de fratura.

Figura 4 - Os três modos básicos de fratura



Fonte: Wagoner (2006)

2.3.1 Métodos de Ensaio

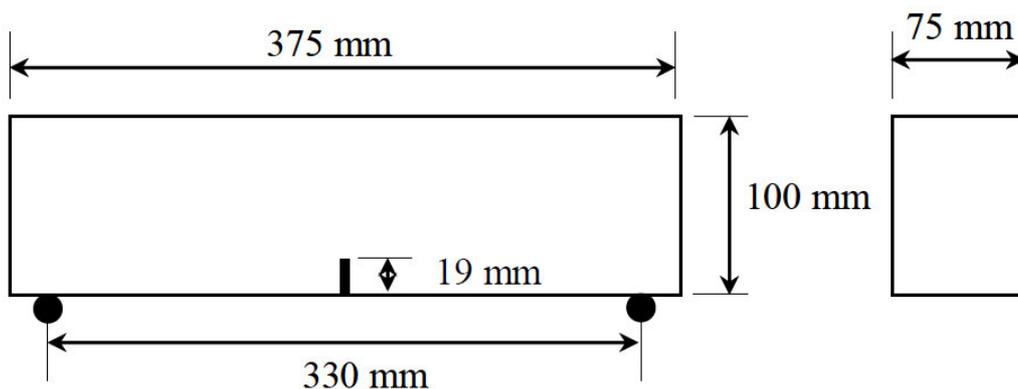
No estudo da fratura, vários métodos e geometrias de amostras já foram propostos. A geometria dos Corpos de Prova (CP) utilizados no ensaio de fratura em misturas asfálticas é influenciada por dois fatores principais: dificuldade de preparação da amostra e compatibilidade com os atuais equipamentos utilizados para a moldagem e a realização dos ensaios mecânicos (HIRSCH, 2009).

O ponto de partida para a determinação da geometria do CP a ser utilizado no ensaio de fratura veio do campo da metalurgia. Várias geometrias são apresentadas no método da ASTM E399, 2002 (*Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture*

Toughness K_{Ic} of Metallic Materials). Essa normatização foi usada no desenvolvimento de uma configuração de CP para o ensaio de fratura em CAs (HIRSCH, 2009).

O ensaio de flexão em três pontos adotando a geometria de viga com um entalhe prévio (*Single edge notched beam - SE (B)*) foi utilizado para os estudos de trincamento em baixas temperaturas. Hirsch (2009) listou como vantagens do uso desta geometria, o fato deste ter uma configuração de carregamento simples, uma vez que o ensaio de fratura em viga é amplamente utilizado na análise de fratura em concreto de cimento Portland. Como desvantagem, este autor fala da dificuldade de obtenção de amostras extraídas de campo. A Figura 5 mostra o esquema deste ensaio, contendo as dimensões utilizadas na preparação da amostra por Marasteanu *et al.* (2007).

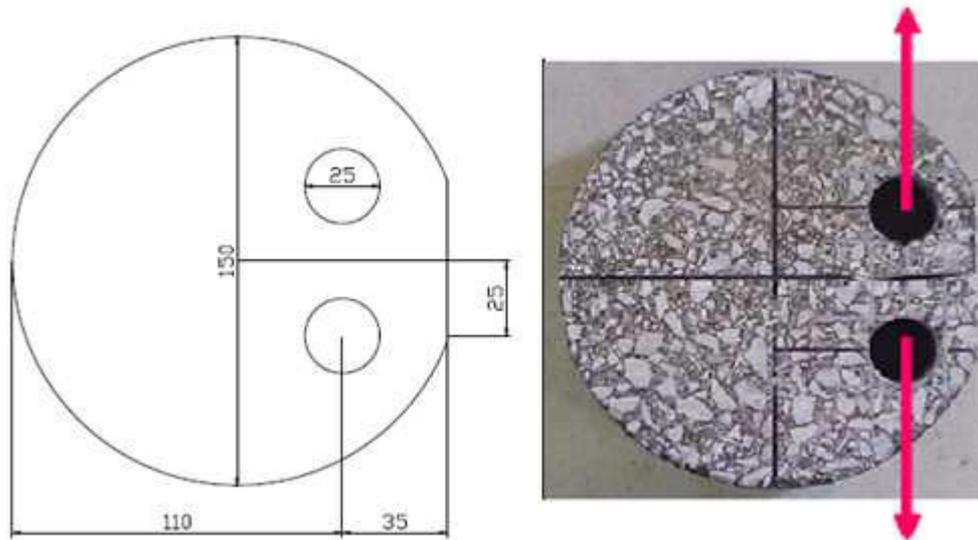
Figura 5 - Esquema da geometria de uma viga SE(B)



Fonte: Marasteanu *et al.* (2007)

Outra geometria utilizada para o estudo de fratura em misturas asfálticas é a de Disco Circular com Fenda (*Disk-Shaped Compact - DC(T)*). Esta geometria foi incorporada à ASTM E399-90 e passou a ser utilizada para a obtenção da energia de fratura em misturas asfálticas. Essa geometria surgiu através da tentativa de Wagoner *et al.* (2004) de maximizar a área de fratura (área do CP onde ocorre a propagação da pré-trinca). O CP para esse ensaio tem a forma de um disco circular, com dimensões de 150mm de diâmetro e 50 ± 5 mm de espessura, medida em quatro pontos igualmente espaçados que não devem apresentar variação maior do que 2,5mm entre as medidas, de acordo com a ASTM 7313/07. A Figura 6 mostra as dimensões da amostra.

Figura 6 - Dimensões (mm) da amostra para ensaio de DC(T)



Fonte: Marasteanu *et al.* (2007)

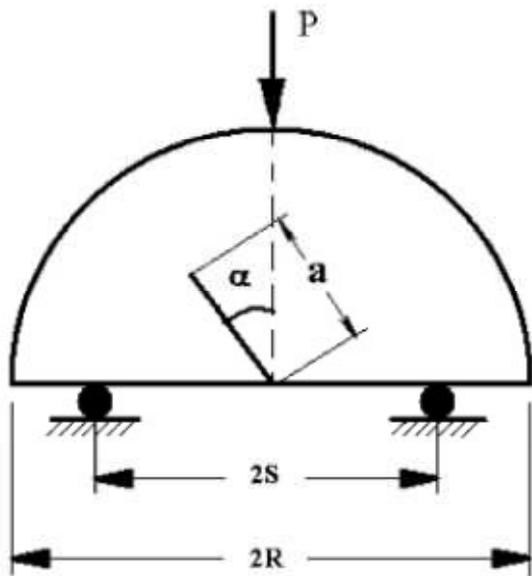
Hirsch (2009) numerou algumas vantagens e desvantagens da geometria DC(T). A facilidade de obtenção das amostras em campo foi uma vantagem citada por este autor. Como desvantagem mencionou-se o fato do carregamento ser excêntrico, que foi atribuído por Wagover (2004) como o motivo do desvio na propagação da trinca em algumas amostras. Outra desvantagem citada, ainda, é a dificuldade na preparação das amostras.

Outra geometria bastante utilizada para análise de fratura é a semicircular (*semi circular bending* - SCB). Esta geometria se caracteriza como uma evolução do ensaio de flexão em três pontos, pois se tem uma facilidade de extração em campo, de moldagem em laboratório, e de economia de material, uma vez que cada amostra gera dois semicírculos. Hirsch (2009) citou como desvantagem do uso dessa geometria, a complexidade do estado de tensão gerado, e o tamanho do ligamento por onde a trinca deve propagar.

Chong e Kuruppu (1988) propuseram a geometria SCB enquanto procuravam uma geometria de ensaio que pudesse facilmente ser extraída de campo, que requeresse uma pequena quantidade de material e fornecesse dados significativos e reproduzíveis para os ensaios de fratura convencionais. Por exclusão, estes autores concluíram que a geometria de semicírculo era adequada para realizar testes nos três modos de fratura. O CP SCB é um meio disco com um entalhe de a -mm de comprimento, que faz um ângulo α com o eixo central do disco (HIRSCH, 2009). Nesse tipo de ensaio, um carregamento P é aplicado na amostra

semicircular de raio R , biapoada a distância S do centro. A Figura 7 ilustra o ensaio de fratura com amostras semicirculares.

Figura 7 - Ilustração da amostra semicircular



Fonte: Montestruque *et al.*(2010)

Lim *et al.* (1993) se concentraram nessa geometria (SCB) e deram prosseguimento ao estudo original realizado por Chong e Kurrupu (1988). Estes autores determinaram numericamente a variação do fator de intensidade de tensão (K), usando o Método dos Elementos Finitos (MEF), para fraturas nos modos I, II e III. Para obter os fatores nos modos II e III, estes mudaram o ângulo do entalhe (α), uma vez que o α igual à zero fornece o fator para o modo I de fratura (LIM *et al.*, 1993).

2.3.2 Mecânica da Fratura Aplicada à Misturas Asfálticas

A mecânica da fratura tem sido aplicada ao estudo de macro trincamento em misturas asfálticas desde meados da década de 1950. Alguns dos primeiros estudos de fratura em materiais asfálticos foram realizados por Paris e Erdogan (1963) (empírico) e Rice (1968) (analítico), que desenvolveram essa abordagem através da teoria originalmente aplicada ao campo da metalurgia. Os primeiros autores obtiveram a taxa de crescimento da trinca (dc/dN), através de um fator K , usando a lei de Paris (Equação 1).

$$\frac{dc}{dN} = AK^n \quad (1)$$

Onde:

A e n são consideradas constantes do material;

A partir da lei de Paris, no âmbito da Mecânica da Fratura Elástica Linear (MFEL), a vida de fadiga pode ser apresentada como:

$$N_f = \int_{C_0}^{C_f} \frac{1}{AK^n} dc \quad (2)$$

Onde:

N_f é o número de ciclos para a falha do material;

C_0 é o comprimento inicial da trinca;

C_f é o comprimento final da trinca no momento da falha.

Tratando da fratura causada por carga monotônica, usando o princípio do balanceamento global de energia, o trabalho realizado por uma força P com deslocamento δ correspondente, formará energia. Uma parte desta energia é estocada no corpo em forma de energia de deformação e a outra parte é usada para a propagação de trincas (XU *et al.*, 2006). Isso pode ser escrito na forma:

$$G_{Fi}A_i = W_i - \Delta U_i = \int_0^{\delta_i} Pd\delta - \Delta U_i \quad (3)$$

Onde:

G_{Fi} é a energia média necessária, por unidade de propagação de trinca, durante o início do trincamento até qualquer instante de tempo i ;

A_i é a área de fratura formada neste intervalo de tempo;

W_i é o trabalho realizado pela força externa P durante esse intervalo de tempo;

ΔU_i é o incremento de energia de deformação elástica do corpo até o tempo i .

Se o tempo i se aproximar do ponto de falha que caracteriza o fim do ensaio $\delta_i = \delta_I$, onde o carregamento se aproxima de zero, então o G_{Fi} na Equação 3, é reduzido a:

$$G_F = \frac{W}{A} = \frac{\int_0^{\delta_1} P d\delta}{A} \quad (4)$$

Onde:

G_F é a energia de fratura;

W é a energia total realizada pela força externa P para a propagação das trincas;

A é a área perpendicular à direção da tensão.

No período de propagação estável do trincamento, a força deve aumentar até o valor de pico $P_{máx}$, com o deslocamento δ_c correspondente. Assim, pode-se calcular a energia nesse período como sendo:

$$G_{FS} = \frac{W_S}{A_S} = \frac{W_P - \Delta U_S}{A_S} = \frac{\int_0^{\delta_c} P d\delta - \Delta U_S}{A_S} \quad (5)$$

Onde:

G_{FS} é a energia estável de fratura;

A_S é a área de fratura até o pico de tensão;

W_S é o trabalho total para a propagação de trincas até o pico de tensão;

W_P é o trabalho realizado pela força externa P até o pico de tensão;

ΔU_S é o incremento de energia de deformação elástica no corpo.

Estudos sobre o uso da mecânica da fratura para a caracterização do trincamento térmico em misturas asfálticas são encontrados na literatura. Estudos de fratura para caracterização do dano por fadiga é menos comum. Na temperatura ambiente, onde se estuda o dano por fadiga, outros mecanismos de dano interferem na energia de fratura, dificultando a análise.

Marasteanu *et al.* (2002) utilizaram a geometria de viga para caracterizar propriedades de fratura no trincamento térmico, e obtiveram uma relação de dependência entre a temperatura e o desempenho da mistura asfáltica quanto a fratura. Braham *et al.* (2007) seguiram a linha de estudo de fratura ocasionada pela baixa temperatura. Estes autores

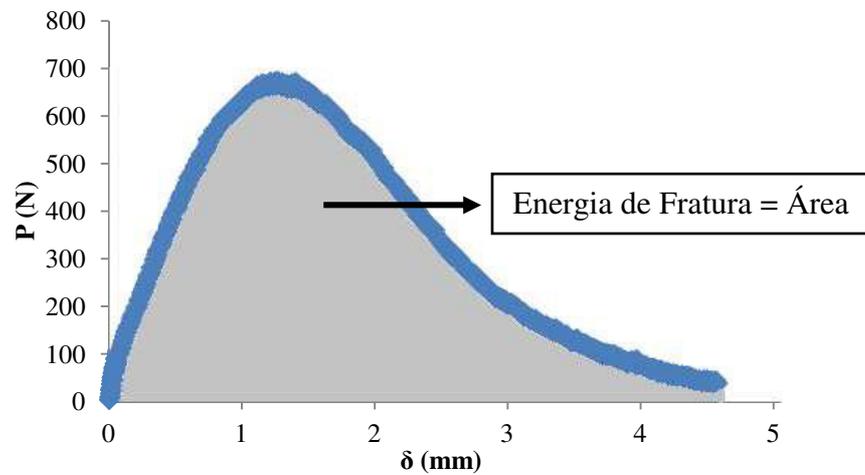
utilizaram a geometria de disco circular com fenda DC(T), justificando pelo fato dessa geometria ter um maior ligamento entre o entalhe e a borda da amostra, tendo assim amostras com uma maior área de fratura. Na sua análise, estes autores modificaram o tipo de agregado, o ligante asfáltico, o Vv das amostras e a temperatura do ensaio. Os autores perceberam que o agregado de origem granítica quando utilizado em misturas asfálticas resultou em maior energia de fratura, se comparado ao agregado de origem calcária. Porém, para temperaturas mais baixas, o inverso ocorre. Estes autores perceberam também que um baixo teor de ligante asfáltico faz com que a mistura se comporte como um material frágil, e um teor maior de ligante asfáltico faz com que esta se comporte de forma dúctil. Por fim, perceberam que o Vv não é um fator significativo na energia de fratura para médias (variando entre -30°C e -12°C , dependendo do ligante) e baixas (variando entre -24°C e -42°C , dependendo do ligante) temperaturas.

Hirsch *et al.* (2010) usaram o ensaio de tração de disco circular com fenda para avaliação das propriedades de fratura de misturas asfálticas com mesma granulometria, variando o tipo de ligante asfáltico, em duas temperaturas diferentes. Um CAP com PG 70-16 modificado com polímero foi comparado a um ligante asfáltico convencional com PG 64-16 para misturas moldadas em laboratório, bem como para amostras extraídas em campo. Para a temperatura de 10°C , a mistura com ligante asfáltico modificado com polímero apresentou maior energia de fratura quando comparada com a outra mistura com ligante asfáltico convencional, tanto comparando as misturas moldadas em laboratório, quanto as misturas extraídas de campo. Para a temperatura de 25°C , a tendência se manteve para as misturas moldadas em laboratório, mas quando comparadas as misturas de campo, a mistura com ligante asfáltico convencional apresentou uma maior energia de fratura se comparada à mistura com ligante asfáltico modificado por polímero. A energia de fratura pode ser obtida através da área formada pela curva P por δ , como mostra a Figura 8. Os autores em questão não recomendaram esse ensaio em temperaturas mais elevadas (acima de 10°C), pois a parcela elástica da mistura deve ser considerada, e em ensaios realizados em altas temperaturas esta parcela encontra-se misturada com outros fatores que afetam a energia de fratura.

Montestruque *et al.* (2010) usaram amostras semicirculares para avaliar o potencial de trincamento de amostras de AAUQs, moldadas com diferentes ligantes asfálticos modificados para funcionar como camadas anti reflexão de trincas. Estes autores tentaram perceber a influência na energia de fratura causada pela mudança do ligante asfáltico. Estes encontraram

diferença de aproximadamente 40% entre os valores das energias de fratura das duas misturas. Este tipo de ensaio foi capaz de diferenciar os ligantes asfálticos, mostrando a influência do mesmo nos resultados desse tipo de ensaio. Os autores salientaram ainda que esse ensaio quando conduzido a temperaturas mais baixas poderia gerar uma inversão na hierarquização das misturas, no que diz respeito aos parâmetros de fratura.

Figura 8 - Obtenção da energia de fratura



3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

3.1.1 Agregados

Os agregados utilizados nesse estudo são naturais, proveniente de diferentes pedreiras no estado do Ceará, e diferentes origens mineralógicas: (i) Gnáissica e (ii) Fonolítica. Foram usados como agregados graúdos as britas 1/2" e 3/8", como agregado miúdo o pó de pedra e a areia de campo proveniente do sítio Maninho localizado na cidade de Maracanaú - CE e como material de enchimento o fíler natural. Algumas características dos agregados utilizados estão descritas na Tabela 2. Os agregados foram submetidos aos ensaios de caracterização segundo as normas do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT): granulometria (DNER-ME 83/98), densidade do agregado miúdo e graúdo (DNER-ME 81/98 e DNER-ME 84/95) e índice de forma (DNER-ME 86/94).

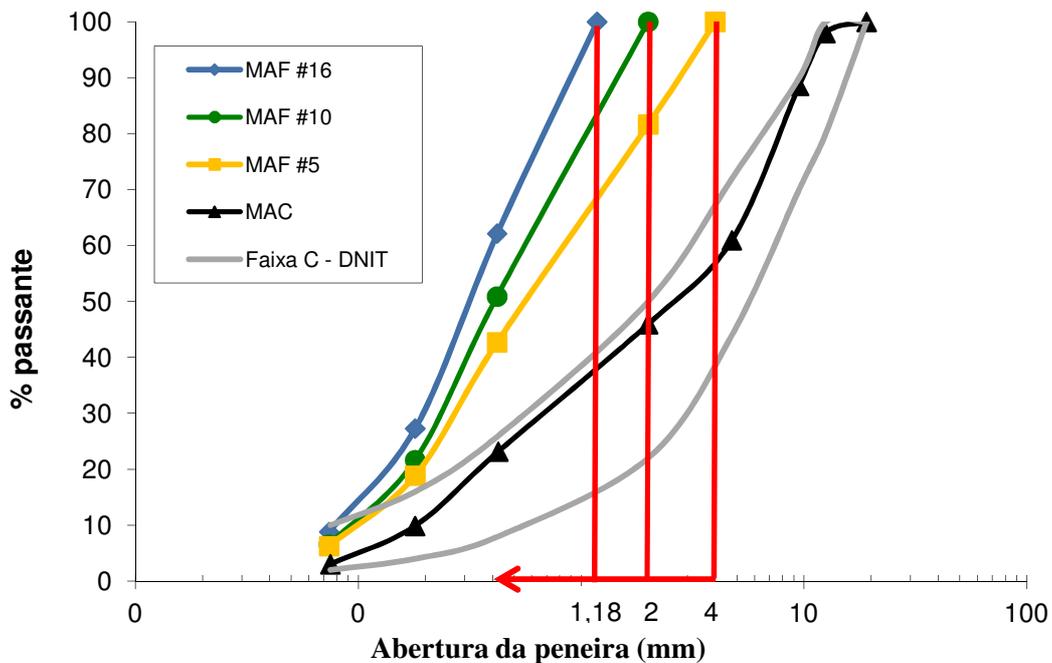
Tabela 2 - Características dos agregados utilizados no estudo

Agregado	Origem Mineralógica	Densidade Real	Densidade Aparente	Absorção (%)	Utilização na Mistura (%)
Brita 1/2"	Fonolítica	2,47	2,43	0,9	23
Brita 3/8"	Fonolítica	2,49	2,43	1,1	30
Pó de Pedra	Gnáissica	2,72	-	-	22
Areia	-	2,64	-	-	25

A curva granulométrica da mistura de concreto asfáltico utilizada no trabalho é densa e foi enquadrada na faixa C do DNIT (DNIT-ES 031/2004). A Tabela 2 mostra ainda os percentuais de utilização de cada agregado na composição da mistura asfáltica. As curvas granulométricas das MAFs foram determinadas a partir da curva da MAC. No estudo em questão, foram geradas três curvas para três diferentes TMNs. Muitos trabalhos desenvolvidos adotando a MAF como ferramenta (KIM *et al.*, 2003; ZOLLINGER, 2005; ARAMBULA, 2007; MASAD *et al.*, 2007; CARO *et al.*, 2008; CASTELO BRANCO, 2008; VASCONCELOS *et al.*, 2009; ARAGÃO, 2011), utilizam a peneira #16 (1,18mm) como a limitadora do TMN dos agregados nas misturas. No Brasil, pesquisadores têm utilizado a

peneira #10 (2,00mm), devido ao fato da peneira #16 (1,18mm) não pertencer à série de peneiras da especificação brasileira, e pela proximidade das aberturas das malhas de ambas (COUTINHO, 2010). Kim *et al.* (2004) recomendaram um fator igual a três na relação entre o TMN do agregado e a geometria da amostra, para manter a representatividade dos resultados. Pela limitação da geometria do diâmetro de 12mm da amostra de MAF utilizada para ensaios no DSR, tem-se um TMN máximo de 4mm para que seja mantida essa representatividade. Baseado nisso, foram escolhidas as peneiras #5, #10 e #16, para a moldagem das MAFs, e os TMNs, de 4,00, 2,00 e 1,18mm, respectivamente. A Figura 9 mostra as distribuições granulométricas para a MAC e as MAFs utilizadas nesse estudo.

Figura 9 - Distribuição granulométrica dos agregados para a MAC e suas respectivas MAFs com diferentes TMNs



3.1.2 Ligante Asfáltico

Foi utilizado um CAP caracterizado por penetração como CAP 50/70, de acordo com as especificações brasileiras regulamentadas pela Agência Nacional de Petróleo (ANP, 2005). O ligante asfáltico é um produto derivado do petróleo brasileiro proveniente do Campo Fazenda Alegre, no Espírito Santo, e processado na refinaria Lubnor da Petrobras, a partir da destilação a vácuo do petróleo. Este CAP foi também caracterizado pela especificação superpave como PG 70-28, e suas características são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Características do CAP 50/70 (cedidas pela Lubnor conforme ensaios da especificação ANP realizados na própria refinaria)

Característica	Método	Especificação	Resultado	Unidade
Penetração	D 5	50 a 70	59	0,1 mm
Ponto de Amolecimento	D 36	46 min	51,2	°C
Viscosidade Saybolt Furol a 135°C	E 102	141 min	226	s
Viscosidade Brookfield 135°C-SP21 20 RPM	D 4402	274 min	444	cP
Viscosidade Brookfield 150°C SP21	D 4402	112 min	215	cP
Viscosidade Brookfield 177°C SP21	D 4402	57 a 285	77	cP
RTFOT - Penetração Retida	D 5	56 min	75	%
RTFOT - Aumento do Ponto de Amolecimento	D 36	8 max	4,8	°C
RTFOT - Ductilidade a 25°C	D 113	20 min	>150	cm
RTFOT - Variação % Massa	D 2872	0,5 max	0,050	%
Ductilidade a 25°C	D 113	60 min	>150	cm
Solubilidade no Tricloroetileno	D 2042	99,5 min	100,0	% massa
Ponto de Fulgor	D 92	235 min	294	°C
Suscetibilidade Térmica	X 018	-1,5 a 0,7	-0,5	N/A
Aquecimento a 177°C	X 215	NESP ⁽¹⁾	NESP	N/A

Nota: ⁽¹⁾NESP = Não espuma

3.1.3 Dosagem da Mistura Asfáltica Completa (MAC)

A MAC utilizada nesse estudo foi dosada seguindo a metodologia Superpave. A compactação nesse tipo de dosagem é feita através de amassamento (giros), onde a quantidade de giros é fixa (100) e o teor de ligante é variado até que a mistura atinja um Vv de 4%. Mais detalhes sobre essa metodologia de dosagem podem ser encontrados em Bernucci *et al.*

(2007). A Figura 10(a) ilustra o misturador onde foi realizado o processo de usinagem da mistura em escala laboratorial e a Figura 10(b) mostra o Compactador Giratório Superpave (CGS).

Figura 10 - (a) Misturador de escala laboratorial; (b) Compactador Giratório Superpave (CGS)



(a)



(b)

Os parâmetros resultantes desta dosagem foram obtidos por Coutinho (2012). Estes e os resultados das faixas de Temperaturas de Usinagem (TU) e Temperatura de Compactação (TC) para o ligante utilizado neste estudo, determinados por Alencar (2009), estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Parâmetros de dosagem

Parâmetro	MAC
CAP (%)	5,0
Vv (%)	4,3
G_{mm}	2,374
TU (°C)	157 - 164
TC (°C)	187 - 191

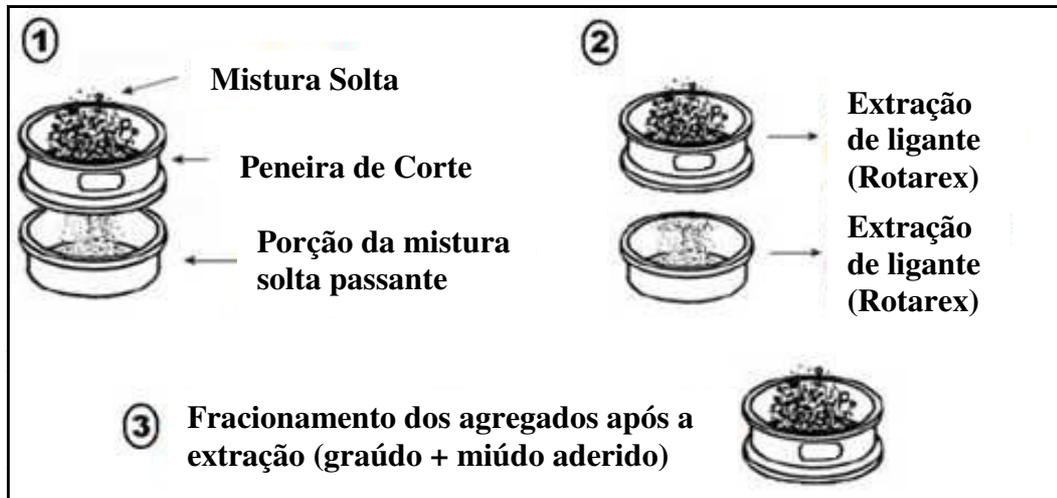
3.1.4 Dosagem das Matrizes de Agregados Finos (MAFs)

O método de dosagem das MAFs utilizadas nesse estudo foi desenvolvido por Coutinho *et al.* (2011), onde o teor de CAP utilizado nas amostras de MAF é definido baseado nos ensaios de granulometria (DNER-ME 035-95) e de extração de ligante asfáltico (DNER-ME 053-94). Cada amostra de MAF é usinada, utilizando um misturador de escala laboratorial, e em seguida resfriada. O procedimento de resfriamento é bastante minucioso, a fim de evitar a formação de grumos de agregados miúdos com ligante e de agregados graúdos envolvidos por agregados miúdos aderidos. Ao fim da preparação, têm-se agregados, da mistura completa, misturados ao ligante na forma solta, sem a completa adesão entre as partículas.

Segundo Coutinho *et al.* (2011), após a preparação das amostras deve-se seguir os seguintes passos para a dosagem da MAF:

- 1) Fracionamento da mistura solta, por volta de 1000g, resfriada na peneira que definirá o TMN da mistura em duas massas distintas: porção da mistura solta retida (agregados graúdos envolvidos por mástique e agregados miúdos envolvidos por ligante e aderidos aos agregados graúdos) e passante na peneira em questão (agregados miúdos envolvidos por ligante);
- 2) Extração do ligante asfáltico de cada uma das duas massas. Obtém-se: a massa total retida na peneira de corte (#PC) ($M_{\#ret}$), a massa de ligante asfáltico ali contida (M_{ligret}), a massa total passante na peneira de corte ($M_{\#pass}$) e a massa de ligante asfáltico ali contida ($M_{ligpass}$). Chama-se de $M_{pass<TMN}$ a diferença entre a massa total e a de ligante asfáltico, ambas contidas no material passante na #PC, ou seja, $M_{pass<TMN} = M_{\#pass} - M_{ligpass}$;
- 3) Fracionamento da massa de agregados contidos na porção da mistura retida na peneira de corte para obtenção de duas massas: massa de agregados graúdos ($M_{ret>TMN}$) e massa de agregados miúdos aderidos aos agregados graúdos ($M_{ret<TMN}$). A Figura 11 ilustra o procedimento.

Figura 11 - Ilustração do procedimento para determinação do teor de ligante asfáltico da MAF com um TMN de 2,00mm



Fonte: Coutinho *et al.* (2011)

Essas massas podem ser equacionadas segundo a massa total de agregados e a massa total de ligante asfáltico da seguinte forma:

$$M_{Ag} = \text{miúdo pass na } \#PC + \text{gráúdo ret na } \#PC + \text{miúdo ret na } \#PC \quad (6)$$

$$M_{Ag} = M_{pass < TMN} + M_{ret > TMN} + M_{ret < TMN}$$

$$M_{lig} = \text{ligante ret na } \#PC + \text{ligante pass na } \#PC = M_{ligret} + M_{ligpass} \quad (7)$$

O teor de ligante asfáltico na porção que passa na peneira de corte (T_{pass}) é definido como segue:

$$T_{pass} = T_{MAF} = \frac{\text{massa de ligante passante na } \#PC}{\text{massa total passante na } \#PC} = \frac{M_{ligpass}}{M_{\#PCpass}} \quad (8)$$

A massa de ligante envolvendo os agregados miúdos aderidos à massa retida na peneira de corte ($M_{lig < TMN}$) é então estimada por:

$$M_{lig<TMN} = (\text{massa de agregados aderidos aos grãos}) \div (1 - \text{teor de CAP passante})$$

$$M_{lig<TMN} = \frac{M_{ret<TMN}}{1 - T_{MAF}} \quad (9)$$

Assim, o percentual de ligante asfáltico presente nos agregados grãos (%Lig_{env,grãos}) é expresso por:

$$\%Lig_{env,grão} = 100 \times \frac{(\text{massa de ligante retida nos agregados grãos})}{(\text{massa total de ligante})}$$

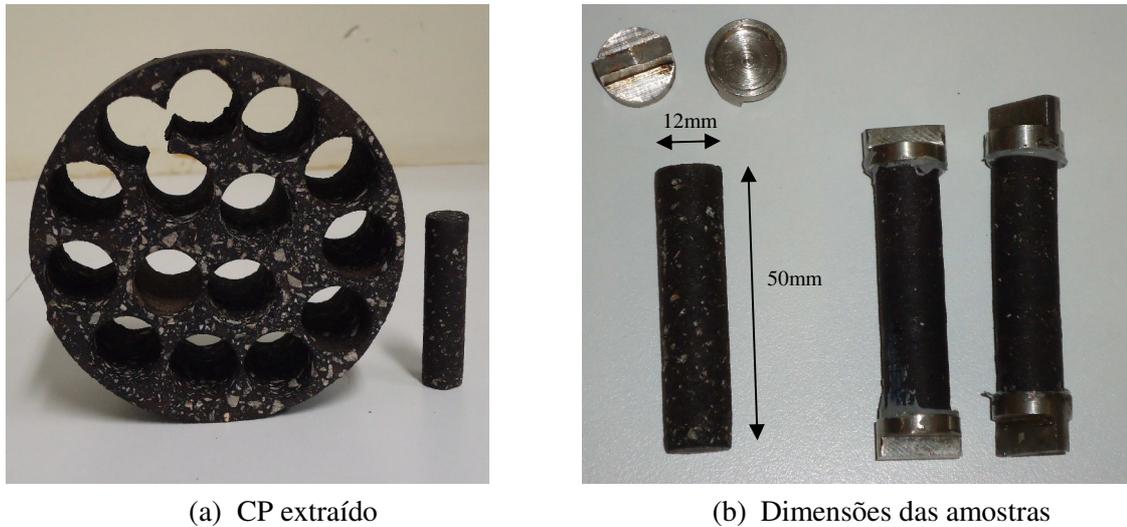
$$\%Lig_{env,grão} = 100 \times \frac{(M_{lig} - M_{ret<TMN} - M_{ligpass})}{M_{ligante}}$$

O procedimento descrito acima é repetido para obtenção do teor de ligante asfáltico das MAFs com diferentes TMNs, substituindo-se apenas a peneira de corte. O procedimento realizado para a obtenção do teor de ligante para o MAF de TMN equivalente a 2,00mm está descrito em Coutinho *et al.* (2011).

3.1.5 Moldagem e Extração dos CPs de MAF

Para a moldagem das amostras de MAFs é utilizada a metodologia descrita em Zollinger (2005). As amostras são preparadas através da compactação Superpave, sendo moldadas amostras cilíndricas de 101,5mm de diâmetro e 80mm de altura. O topo e a base das amostras são serradas de forma que a amostra fique com altura de 50mm. Em seguida, as amostras são extraídas, utilizando-se uma serra-copo acoplada a uma furadeira de bancada com as dimensões necessárias para a realização dos ensaios usando o DSR. A Figura 12(a) apresenta as amostras extraídas juntamente com o CP de 100mm de diâmetro. Cada CP extraído tem a geometria de um cilindro, com diâmetro de 12mm e altura de 50mm. No topo e na base das amostras de MAF são colado *holders* para suporte no DSR, como pode ser observado na Figura 12(b).

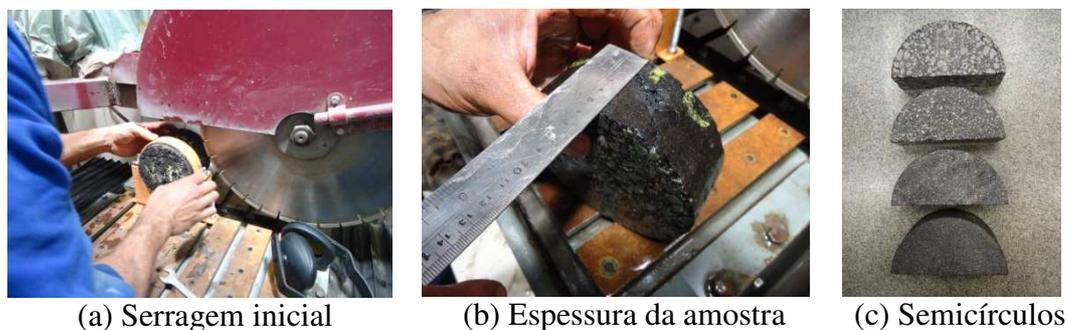
Figura 12 - Amostras de MAF para o DSR



3.1.6 *Fabricação das Amostras Semicirculares para Ensaio de Fratura*

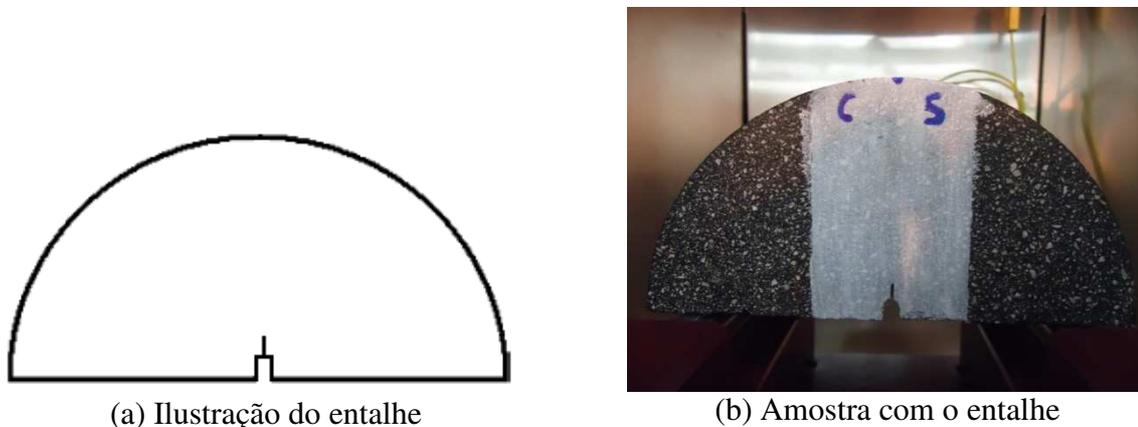
As quatro misturas, uma MAC e três MAFs, foram preparadas usando o CGS com uma geometria cilíndrica de 120mm de altura por 150mm de diâmetro. As amostras foram submetidas a um procedimento de serragem, de acordo com a Figura 13. Na Figura 13(a) é mostrado o primeiro corte, no sentido transversal, dividindo a amostra inicial ao meio. Em seguida, outro corte no sentido transversal, removendo 10mm do topo e da base da amostra original a fim de evitar um possível efeito de borda devido à compactação, Figura 13(b). As amostras, de 50mm de altura, são serradas no sentido longitudinal, de forma que a geometria se assemelhe a um semicírculo, Figura 13(c). Cada CP dá origem a quatro semicírculos. Um total de oito amostras semicirculares para cada tipo de mistura são geradas.

Figura 13- Procedimento para serragem das amostras na geometria de semicírculo.



Em cada semicírculo é feito um entalhe de aproximadamente 10mm, de forma que este funcione como uma pré-trinca, guiando o ponto de maior concentração de tensão na amostra e, conseqüentemente, o caminho de propagação do trincamento. Duas serras foram utilizadas para criar esse entalhe nas amostras. A Figura 14(a) ilustra a forma do corte. A primeira metade do entalhe é feita usando a serra padrão. A segunda metade é feita com uma serra de 0,4mm de espessura, e de serragem mais precisa. Por fim, a superfície do CP é pintada de forma a possibilitar a visualização do trincamento ao longo do processo. A Figura 14(b) mostra o CP final preparado para o ensaio.

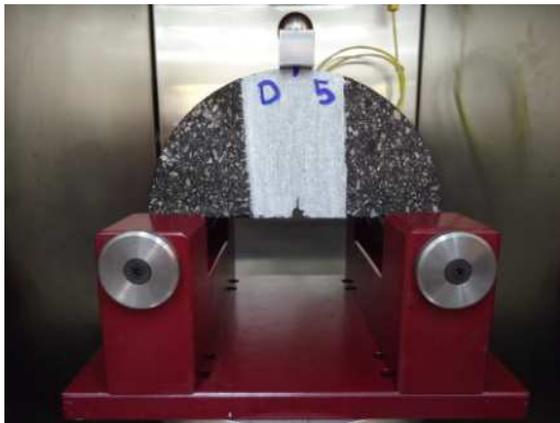
Figura 14 - Amostra após o entalhe



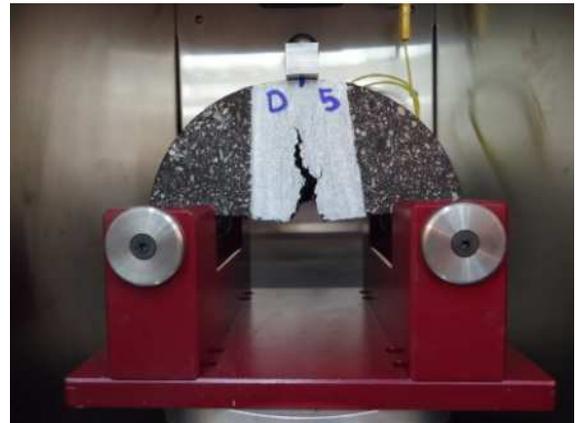
3.2 Procedimento do Ensaio de Fratura em Semicírculo

O ensaio de fratura em semicírculo é feito utilizando uma prensa hidráulica, modelo MTS, onde é aplicado um carregamento monotônico com uma taxa de deslocamento constante de 0,03mm/s, através de um pistão, que aplica a carga sobre um friso metálico acoplado ao topo do CP, garantindo a distribuição de tensão por todo o topo da amostra. A amostra é condicionada nas temperaturas de 25°C e 15°C e, através de uma câmara acoplada à MTS, a temperatura é mantida durante todo o ensaio. Durante o teste, é monitorado o deslocamento vertical da amostra e a carga necessária em cada ponto do deslocamento. A Figura 15(a) mostra o CP no momento inicial do ensaio e a Figura 15(b) mostra o CP ao final do ensaio.

Figura 15 - Amostra sendo ensaiada



(a) Início



(b) Fim

3.3 Ensaio Usando o DSR

O procedimento para o ensaio de fadiga é feito utilizando o DSR modelo TA AR 2000[®], Figura 16(a). Esse ensaio é caracterizado por aplicações de carregamentos torcionais em uma amostra com dimensões padrões, como foi mostrado no item 3.1.5. Este reômetro é capaz de aplicar torque de $0,1\mu\text{N}\cdot\text{m}$ até $200\text{mN}\cdot\text{m}$, frequência entre $1,2\times 10^{-7}$ a 100Hz , e controlar a temperatura dentro do intervalo de -160 até 600°C . A amostra fica presa na região central do equipamento, através de *holders* (Figura 16(b)), em seguida é fechada a câmara para o controle de temperatura ao longo do ensaio.

Figura 16 - Reômetro de Cisalhamento Dinâmico (DSR)



(a) Equipamento DSR



(b) Amostra posicionada

3.3.1 Caracterização do Comportamento Viscoelástico Linear das MAFs

Para a caracterização do comportamento viscoelástico linear das amostras de MAF, foram utilizadas três amostras de cada mistura, com um Vv variando entre 3,5 e 4,5%. As frequências pré-determinadas são baseados nos ensaios de módulo dinâmico realizados em amostras de MACs, enquanto as temperaturas são baseadas nas utilizadas por Coutinho (2012), atendendo a sugestões propostas pelo autor. Assim, é feita uma varredura de frequência de 0,01 a 15Hz, para as temperaturas de -10, 0, 10, 20, 30, 40, 50 e 60°C. O ensaio é realizado à deformação controlada, e a amplitude utilizada é de $6,5 \times 10^{-5} \mu\epsilon$. Esse nível de deformação garante que o material não sofre dano durante o procedimento.

Os materiais asfálticos apresentam comportamento termoviscoelástico, ou seja, um comportamento mecânico dependente da frequência de carregamento e da temperatura. O Princípio de Superposição Tempo Temperatura (PSTT) afirma que dados de propriedades dos materiais obtidos para diferentes temperaturas podem ser superpostos em uma curva mestra. Assumindo que o material é termoreologicamente simples, a temperatura afeta a propriedade do material com relação à dependência do tempo, assim um fator de deslocamento, *shift factor*, pode ser aplicado para a obtenção dos valores de módulo e ângulo de fase com relação à uma dada temperatura de referência. Esse fator de deslocamento pode ser obtido de diversas formas. No trabalho em questão, foi utilizado o fator derivado da equação de Arrhenius, a partir de observações de Coutinho *et al.* (2011).

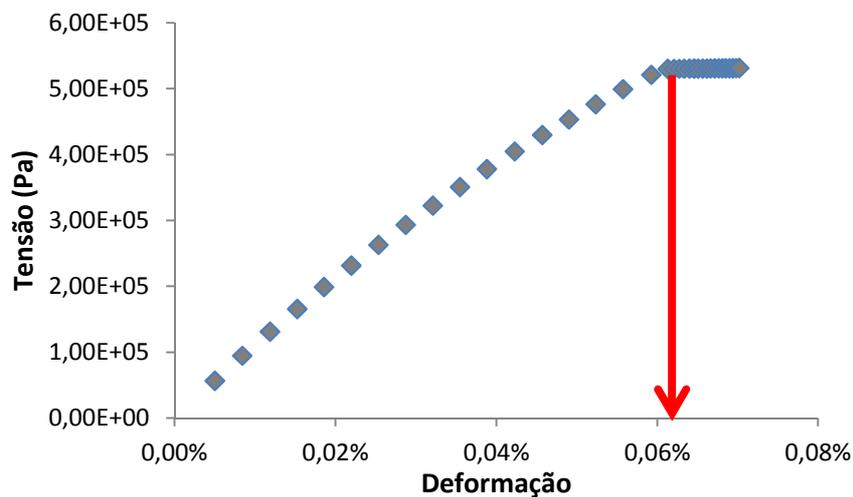
3.3.2 Vida de Fadiga

Para o ensaio de vida de fadiga, foi utilizado o procedimento descrito em Castelo Branco (2008) e Coutinho (2012). Uma varredura de tempo é realizada no DSR em amostras com Vv de aproximadamente 3,5%. É utilizada uma frequência de carregamento constante no valor de 10Hz, à uma taxa de deformação controlada em ensaios com duração de 24h ou até atingir o critério de ruptura adotado (perda de 50% da rigidez inicial ($|G^*|$) da amostra). Durante o ensaio conduzido à deformação controlada, a amplitude de tensão é ajustada de forma que a amplitude de deformação se mantenha constante durante o ensaio. Como o material sofre dano durante o ensaio, a tensão é diminuída com relação à condição inicial. Tanto a rigidez da mistura como a quantidade de dano ao qual o material foi induzido exercem influência sobre os resultados destes testes. É comum que a vida de fadiga de MAFs

aumente com a diminuição da rigidez da mistura para ensaios conduzidos a deformação controlada (CASTELO BRANCO, 2008).

O critério de escolha da amplitude de deformação foi definido através de uma varredura de deformação. Durante o ensaio, chamado neste trabalho de pré-teste, deformações entre 0,065% e 0,1% são aplicadas na amostra, com incrementos lineares, a uma frequência controlada de 10Hz, como pode-se ver na Figura 17. Triplicatas de cada mistura foram utilizadas para obtenção da maior amplitude de deformação comum entre as misturas a serem analisadas. Esse valor será a amplitude utilizada na varredura de tempo para o ensaio de vida de fadiga, e o maior valor é escolhido, para evitar um ensaio muito demorado.

Figura 17 - Ensaio de varredura de deformação (Pré-teste)



Durante o ensaio, as amostras foram submetidas ao carregamento torsional a uma temperatura de 25°C. A amplitude de 0,06% de deformação foi a resultante das varreduras de deformação. Para garantir que o equipamento não chegue ao seu limite de utilização, a amplitude de 0,05% de deformação foi utilizada no ensaio de varredura de tempo. O valor inicial de rigidez (IG^*) da amostra foi obtido através da curva mestra de cada mistura, obtida na caracterização viscoelástica linear.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Resultados das Dosagens das Matrizes de Agregados Finos (MAFs)

Três misturas do tipo MAF foram dosadas. As misturas foram projetadas utilizando diferentes TMNs. Buscou-se o fator máximo igual a três entre o TMN do agregado e o diâmetro da amostra, proposto por Kim *et al.* (2004), mantendo um elemento de volume representativo. A Tabela 5 abaixo mostra as características das misturas avaliadas.

Tabela 5 - Características das MAFs utilizadas no estudo

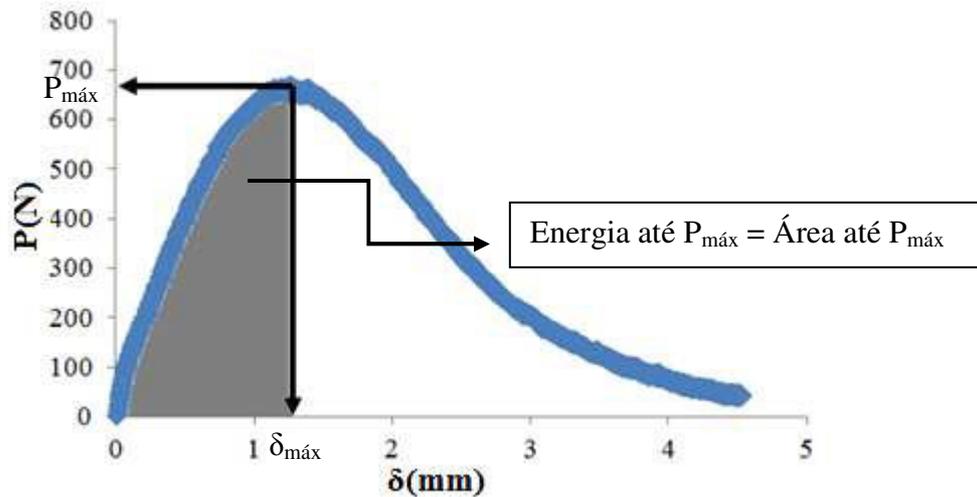
Mistura (MAF)	Peneira de divisão	TMN (mm)	% CAP	G_{mm}
1	#5	4,00	8,3	2,321
2	#10	2,00	8,9	2,350
3	#16	1,18	10,3	2,278

O procedimento proposto por Coutinho *et al.* (2011) foi utilizado na dosagem, variando-se a peneira de corte das misturas. A Tabela 5 mostra também o teor de projeto do ligante asfáltico obtido para cada MAF. Através dos resultados da dosagem, é possível perceber que à medida que se diminui o TMN dos agregados, aumentando também a quantidade de finos e a área de superfície específica das partículas, maiores teores de CAP são requeridos (KARKI, 2010).

4.2 Ensaios de Fratura

O ensaio de flexão em três pontos em amostras semicirculares foi realizado em quatro amostras para cada mistura e em cada temperatura de ensaio (15°C e 25°C). A curva de força \times deslocamento do pistão é monitorada ao longo de todo o ensaio. A Figura 18 mostra um exemplo de curva gerada pelo ensaio para uma das amostras.

Figura 18 - Curva do ensaio com dados de Força × Deslocamento



Através de dados obtidos no ensaio, é possível determinar: i) a carga máxima ($P_{máx}$), ii) o deslocamento no ponto de carga máxima ($\delta_{máx}$), iii) a energia dissipada até o ponto de carga máxima, $EP_{máx}$ (Figura 18), além da energia total dissipada, como mostrado na Figura 8. Das oito amostras semicirculares geradas pelo procedimento de serragem, quatro amostras foram ensaiadas para cada temperatura. As amostras de 1 à 4, são provenientes dos CPs 1 de cada mistura, enquanto que às amostras de 5 à 8, são provenientes do CP 2, Tabela 6. Quatro amostras foram ensaiadas para cada mistura e em cada temperatura de ensaio. A Tabela 6 mostra, ainda, os valores de V_v de cada amostra semicircular.

Tabela 6 - Volume de vazios das amostras semicirculares

CP	Semicírculo	MAC	MAF 1	Vv (%)			Temperatura (°C)
				MAF 2	MAF 3		
1	1	3,8	4,3	3,1	3,9	25	
	2	3,5	4,3	3,2	4,0		
2	5	3,9	3,6	3,1	2,5		
	6	4,0	3,5	3,2	2,6		
1	3	4,2	4,0	3,8	3,9	15	
	4	4,9	3,8	3,7	4,0		
2	7	3,8	3,5	3,3	3,0*		
	8	4,3	3,7	3,4	3,0		

* descartado

A Tabela 7 apresenta as médias para as quatro amostras ensaiadas de cada mistura e em cada temperatura. Os valores de E_{Total} mostram a energia total durante o processo de

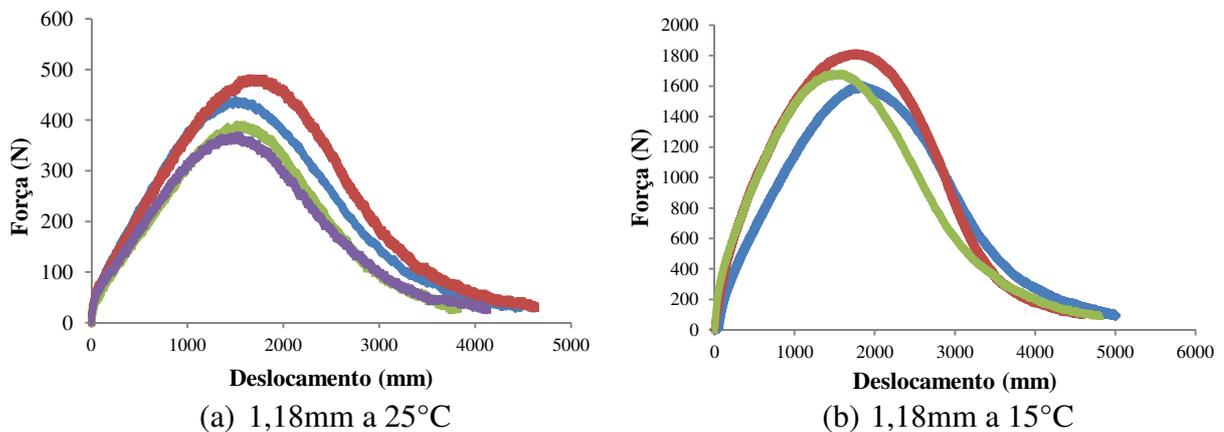
fratura. Os valores de $E_{P_{m\acute{a}x}}$ mostram os valores de energia até a carga máxima, pela média das quatro amostras ensaiadas, obtidos.

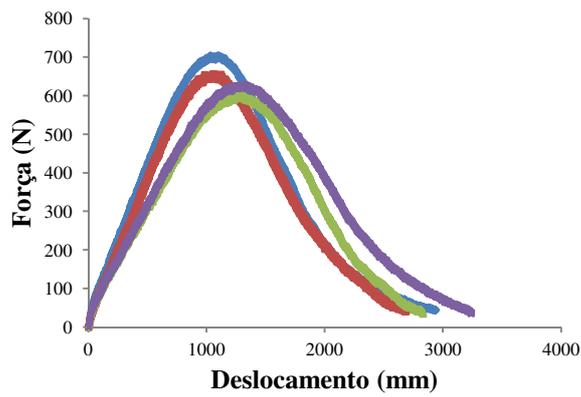
Tabela 7 - Resumo dos resultados do ensaio de fratura

Amostra	Temperatura (°C)	$P_{m\acute{a}x}$ (N)	$\delta_{m\acute{a}x}$ (mm)	E_{Total} (N.mm)	$E_{P_{m\acute{a}x}}$ (N.mm)
MAF 3	25	422,3	3,87	2.296,2	1.027,6
MAF 2	25	649,3	2,94	2.456,6	1.141,7
MAF 1	25	492,6	2,45	1.850,3	776,7
MAC	25	641,2	1,31	1.422,2	550,5
MAF 3	15	1701,7	4,21	10.581,7	4.780,5
MAF 2	15	2339,7	2,69	9.288,4	4.208,9
MAF 1	15	1989,5	2,40	7.715,6	3.285,3
MAC	15	2324,7	1,26	5.048,4	1.994,0

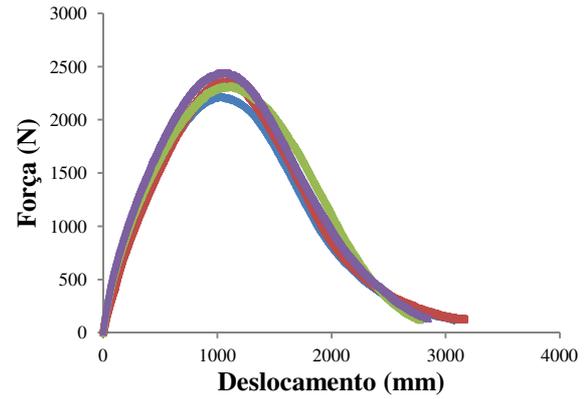
Podemos observar desta tabela, que o valor obtido de $\delta_{m\acute{a}x}$ aumenta, a partir da diminuição do TMN, e do aumento do teor de ligante. As curvas Força × Deslocamento para cada amostra ensaiada estão apresentadas na Figura 19.

Figura 19 - Resultados de semicírculo

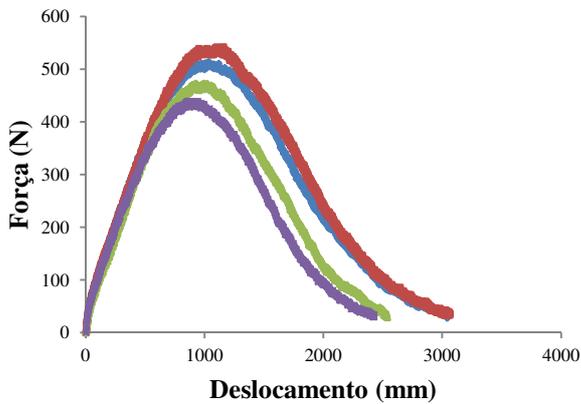




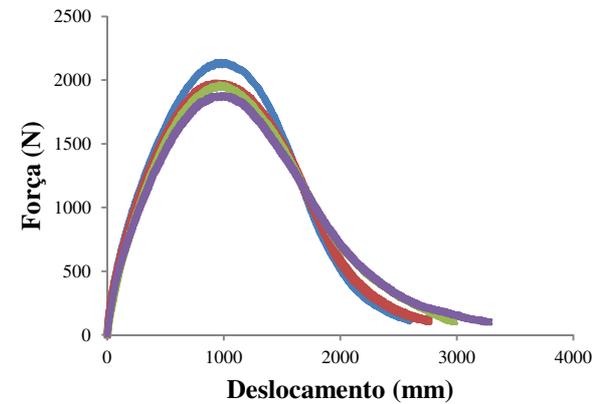
(c) 2,00mm a 25°C



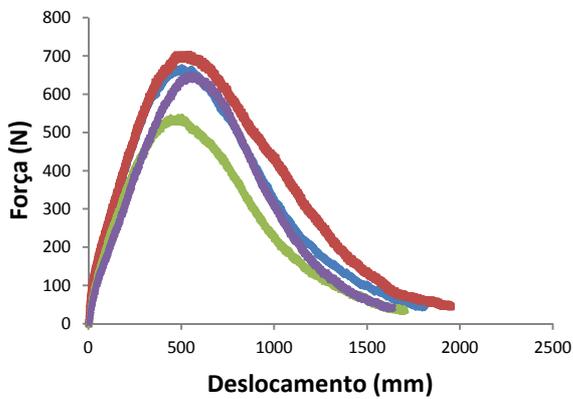
(d) 2,00mm a 15°C



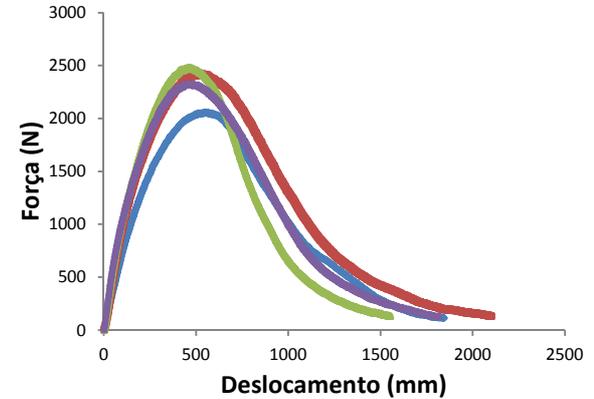
(e) 4,00mm a 25°C



(f) 4,00mm a 15°C



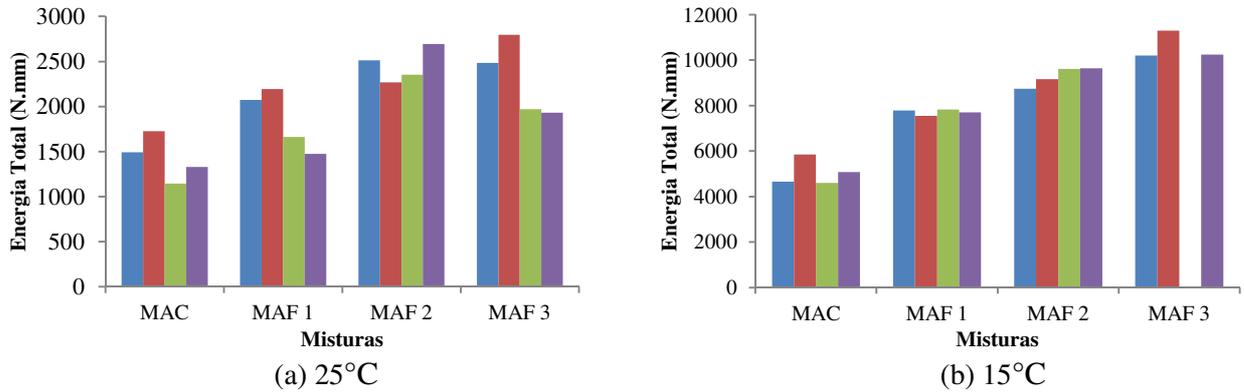
(g) 12,5mm a 25°C



(h) 12,5mm a 15°C

A Figura 20 mostra os valores de energia consumida durante o processo de fratura em todas as amostras, nas temperaturas em questão. A amostra 7 da MAF 3 foi descartada, devido a um erro experimental

Figura 20 - Energia total de cada mistura avaliada nas temperaturas de (a) 25°C e (b) 15°C.

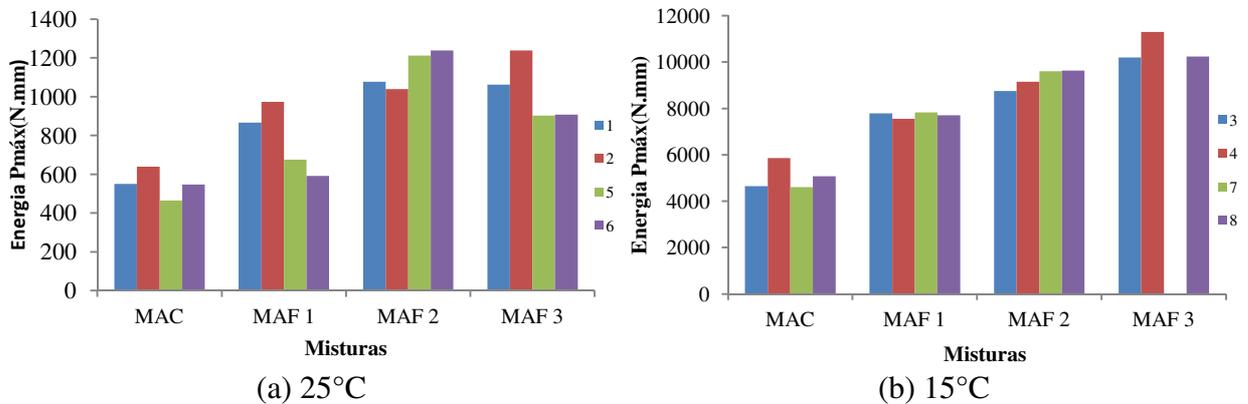


As amostras provenientes do mesmo CP (1 e 2; 5 e 6 na Figura 20(a)), resultaram em valores de energia total menos dispersos entre si à 25°C. Porém, nessa temperatura, os resultados foram variados, quando comparados amostras de uma mesma mistura, proveniente de CPs diferentes. Essa variação não ocorreu para amostras ensaiadas na temperatura de 15°C (Figura 20(b)). As maiores variações encontradas nos resultados do primeiro ensaio (25°C) pode ser explicada, devido à variação de V_v entre as amostras ensaiadas, caracterizando-se assim, como outra variável. Na MAF 1 temos a amostra 1 com V_v de 4,3% apresentando uma energia de fratura superior a amostra 6, que tem V_v de 3,5%. A maior discrepância ocorreu na MAF 3, que se obteve valores distintos de energia de fratura, porém foi onde se encontrou maior diferença entre V_v (4% para a amostra 2 e 2,5% para a amostra 5).

Pela variação de resultados de energia de fratura à temperatura de 25°C, para uma mesma mistura, pode-se observar que a variação do TMN dos agregados é apenas uma variável na resistência ao trincamento das misturas. Outros mecanismos de dano ocorrem, ao mesmo tempo, dificultando a análise da influência da variação do TMN das misturas. Nas amostras ensaiadas a temperatura de 15°C, pode-se observar menor variação entre amostras da mesma mistura. Assim, reduzimos as variáveis na análise, e percebemos a influência da variação do TMN na resistência ao trincamento.

Para cada amostra, também foi obtido os valores de energia até a carga máxima ($P_{máx}$). A Figura 21 mostra esses valores para os ensaios conduzidos nas duas temperaturas em questão. O comportamento dos resultados seguiu a tendência dos resultados encontrados para energia total.

Figura 21 - Energia até a carga máxima ($P_{m\acute{a}x}$) de cada mistura avaliada nas temperaturas de (a) 25°C e (b) 15°C.



A Figura 22 apresenta as médias dos resultados das amostras ensaiadas, com barras de erro mostrando o desvio padrão para estes resultados. Na Tabela 8, são apresentados os parâmetros estatísticos utilizados na análise dos resultados à 25°C, e na Tabela 9, os parâmetros para os resultados à 15°C.

Figura 22 - Médias das energias totais para cada mistura nas temperaturas de (a) 25°C e (b) 15°C

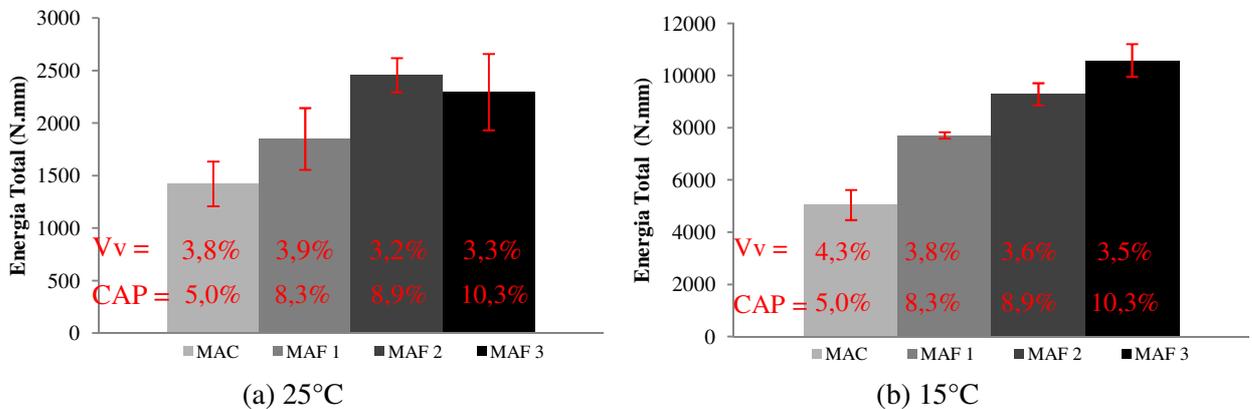


Tabela 8 - Parâmetros estatísticos para resultados à 25°C

Mistura	TMN (mm)	E. Média (N·m)	Desvio Padrão	CV (%)
MAF 3	1,18	2296,17	362,15	15,77
MAF 2	2,00	2456,57	162,83	6,63
MAF 1	4,00	1850,27	294,12	15,90
MAC	12,50	1422,16	212,89	14,97

Tabela 9 - Parâmetros estatísticos para resultados à 15°C

Mistura	TMN (mm)	E. Média (N·m)	Desvio Padrão	CV (%)
MAF 3	1,18	10581,66	624,97	5,91
MAF 2	2,00	9288,35	422,03	4,54
MAF 1	4,00	7715,60	122,00	1,58
MAC	12,50	5048,41	578,74	11,46

Na Figura 22, pode-se observar a tendência de que a medida que o TMN do agregado é diminuído, a energia necessária para o processo de fratura na amostra aumenta. Isso ocorre, devido, também, ao aumento do teor de ligante asfáltico, para a mistura de menor TMN, como está descrito no item 4.1. Na temperatura de 25°C, a diferença entre os valores de energia de fratura para as amostras de MAF com relação a amostra de MAC é maior. A resistência ao trincamento da MAF 1 é 35% maior, quando comparada à MAC. A MAF 2 é 45% maior, e MAF 3 é 52% maior. Ao se comparar as MAFs entre si, podemos perceber que a partir da mistura de 2,00mm de TMN, a energia de fratura passa a ser praticamente a mesma entre as duas misturas. Considerando os valores de desvio padrão obtidos, a energia de fratura das MAFs 2 e 3, podem ser consideradas iguais. No ensaio à 15°C, foi encontrado um comportamento mais distinto para as misturas avaliadas. A redução da temperatura reduz um pouco a influência do ligante, visto que a rigidez do mesmo fica mais próxima da rigidez da matriz pétre.

Para os ensaios conduzidos na temperatura de 25°C outros mecanismos de dano interferem no resultado de energia de fratura. Essa energia obtida pelo ensaio, não pode ser somente atribuída à energia dissipada para a abertura das trincas. Esse problema acontece em menor grau nos resultados dos ensaios conduzidos à 15°C. Hirsch *et al.* (2010) desaconselha a análise de fratura na temperatura de 25°C, pois é necessário ressaltar a parcela elástica do comportamento das misturas asfálticas, o que apenas acontece em temperaturas menores ou iguais a 10°C.

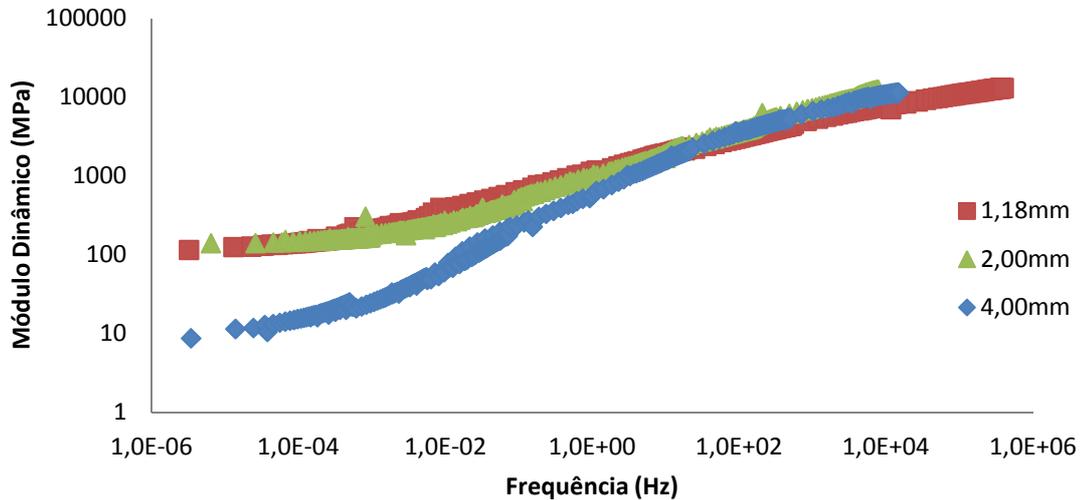
4.3 Ensaios no DSR

4.3.1 Ensaio de caracterização do comportamento viscoelástico linear das MAFs

O ensaio de caracterização linear das misturas avaliadas foram feitos em triplicatas para cada mistura. Aplicando o fator de deslocamento proposto por Arrhenius. Obteve-se a curva mestra para as três misturas avaliadas, a partir da média das três curvas obtidas para

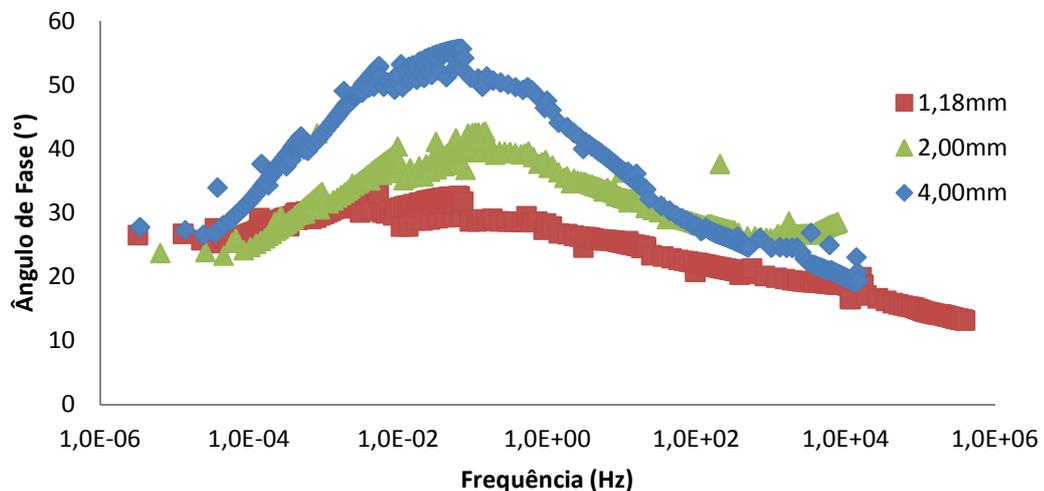
cada mistura. A Figura 23 apresenta as curvas mestras das três MAFs analisadas. O mesmo procedimento foi realizado, para a obtenção da curva mestra do ângulo de fase, Figura 24. A temperatura de referência adotada foi a de 20°C.

Figura 23 - Curvas mestras do módulo dinâmico para a temperatura de referência de 20°C



Pode-se perceber uma tendência entre as curvas para as variadas frequências. Quando analisadas a frequências abaixo do 10Hz, a curva da MAF 1 apresenta menores rigidezes, quando comparada com as outras curvas. A MAF 3 (1,18mm) apresenta maiores rigidezes para as frequências menores que 10Hz. Pode-se notar que essa hierarquização se inverte para frequências maiores que 10Hz. Alguns dados foram das misturas na temperatura de -10°C foram descartados, devido a uma dispersão nos valores encontrados, gerados pela limitação do método/equipamento.

Figura 24 - Curvas mestras do ângulo de fase para a temperatura de referência de 20°C



A Figura 24 mostra que os resultados de ângulo de fase apresentam altas dispersões, quando comparados aos de módulo dinâmico. Porém, os valores encontrados foram menos dispersos que os encontrados por Coutinho (2012), uma vez que o ensaio foi conduzido com um menor intervalo entre temperaturas. A MAF 3 apresentou ângulos de fases menores, comparada as outras misturas. Isso significa que esta mistura apresenta um comportamento mais elástico do que as outras misturas. Em frequências intermediárias, uma hierarquia é bem clara, a MAF 1 é a menos elástica, enquanto a MAF 3 é a mais elástica dentre todas.

4.3.2 Ensaio de varredura de deformação a 25°C

Antes do ensaio de varredura de tempo, é necessário definir a amplitude de deformação máxima, que o equipamento é capaz de aplicar em amostras de MAF. Essa deformação máxima é função da rigidez da amostra, uma vez que amostras mais rígidas precisarão de maiores tensões para alcançar a amplitude de deformação requerida. Para definir essa amplitude, foram realizados ensaios de varredura de deformação, com a metodologia que foi descrita no item 3.2.2.

Figura 25 - Resultados da varredura de deformação para a MAF 3, #16 (1,18mm)

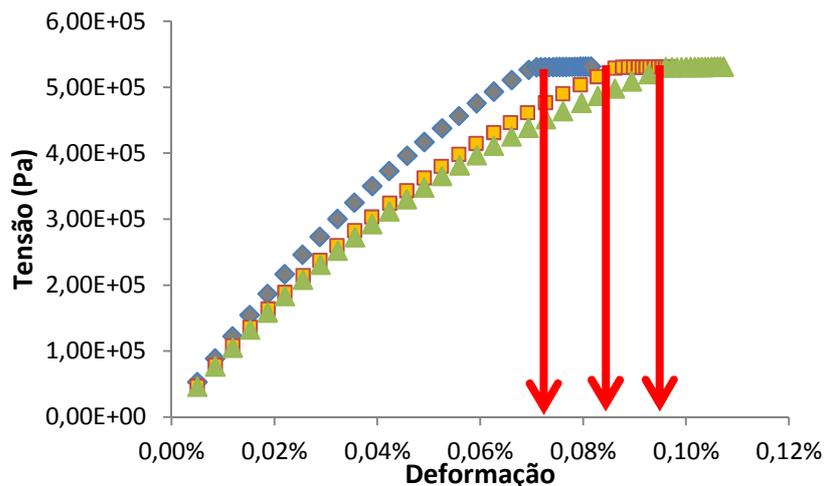


Figura 26 - Resultados da varredura de deformação para a MAF 2, #10 (2,00mm)

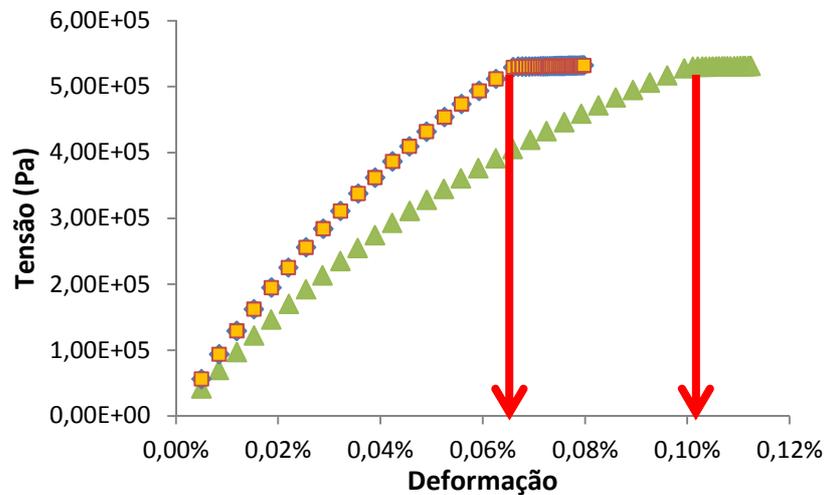
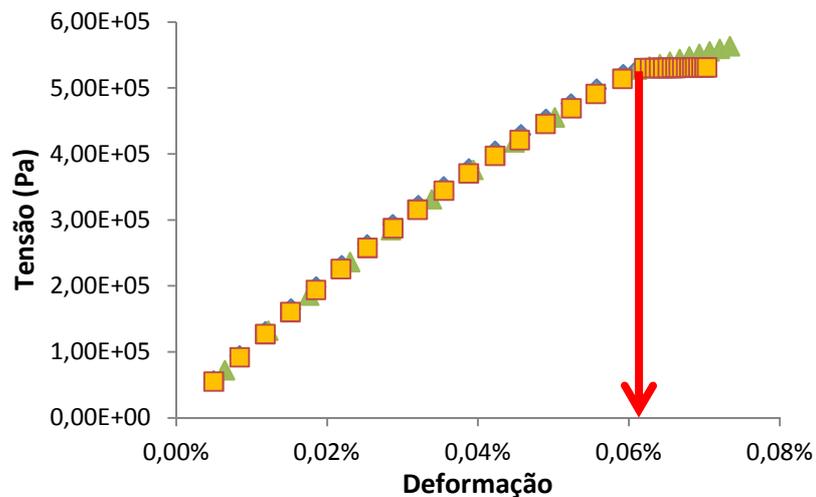


Figura 27 - Resultados da varredura de deformação para a MAF 1, #5 (4,00mm)



As Figuras 25, 26 e 27 mostram os valores obtidos pelo ensaio para as MAFs 3, 2 e 1, respectivamente. Através desse pré-teste, a amplitude de 0,06% de deformação, foi a maior amplitude em comum. Para o ensaio, a amplitude de 0,05% de deformação foi escolhida, para não correr o risco de chegar no limite do equipamento, para os ensaios de varredura de tempo, pois esta amplitude está abaixo do limite do equipamento, considerando a rigidez das amostras que serão submetidas à varredura de tempo.

4.3.3 Ensaio de varredura de tempo a 25°C

Os ensaios de varredura de tempo foram conduzidos à deformação controlada, de amplitude 0,05%, seguindo a metodologia de Castelo Branco (2008) e Coutinho (2012). O critério de ruptura foi o mesmo utilizado por Zollinger (2005): perda de 50% da rigidez inicial. Seguindo Coutinho (2012), o tempo máximo estipulado para o teste foi de 24h de duração. Para obtenção da rigidez inicial da amostra, antes do ensaio de varredura de tempo, é realizada uma varredura de frequência com deformação controlada de $6,5 \times 10^{-5} \mu\epsilon$, a temperatura de 25°C. A Tabela 10 apresenta o resultado do ensaio de três amostras da MAF 1 e três amostras da MAF 2, enquanto a Tabela 11 apresenta o resultado do ensaio de cinco amostras da MAF 3.

Tabela 10 - Resultado do ensaio de varredura de tempo, MAF 1 e 2

Amostras	MAF 1 - #5 (4,00mm)			MAF 2 - #10 (2,00mm)		
	1	2	3	1	2	3
G* Inicial (Pa)	1,02E+09	1,48E+09	1,64E+09	1,9E+09	1,54E+09	1,45E+09
G* Final (Pa)	5,16E+08	7,45E+08	8,30E+08	9,58E+08	7,80E+08	7,30E+08
Perda de Rigidez (%)	50	50	50	50	50	50
Vida de Fadiga (ciclos)	5052	495	1626	161	1055	2130
Vv (%)	3,7	3,9	3,6	3,2	3,6	3,6

Tabela 11 - Resultado do ensaio de varredura de tempo, MAF 3

Amostras	MAF 3 - #16 (1,18mm)				
	1	2	3	4	5
G* Inicial (Pa)	1,2E+09	1,15E+09	1,2E+09	1,2E+09	1,21E+09
G* Final (Pa)	6,84E+08	6,07E+08	6,66E+08	6,64E+08	6,78E+08
Perda de Rigidez (%)	43	47	45	45	44
Vida de Fadiga (ciclos)	-	-	-	-	-
Vv (%)	3,4	3,4	3,2	2,5	2,6

Nos ensaios da MAF 3, o equipamento DSR apresentou um problema desconhecido, impedindo a finalização do ensaio. O mais próximo do critério que foi obtido para estas amostras, foi de perda de 47% da rigidez inicial, alcançada pela amostra 2. Com relação as amostras das MAFs 1 e 2, valores dispersos (entre 495 e 5052 ciclos para a MAF 1, e entre

161 e 2130, para a MAF 2) foram encontrados, como mostra a Tabela 10. De acordo com Coutinho (2012), estes ensaios são de boa repetibilidade, uma vez que este autor encontrou um coeficiente de variação de 12%, para o pior caso encontrado. Além disso, os valores estão muito abaixo dos encontrados na literatura. Coutinho (2012) encontrou valores acima de 200000 ciclos. O que indica que o equipamento está descalibrado, e os valores encontrados não retrataram a realidade.

Figura 28 - Varredura de tempo para as amostras de 1,18mm de TMN

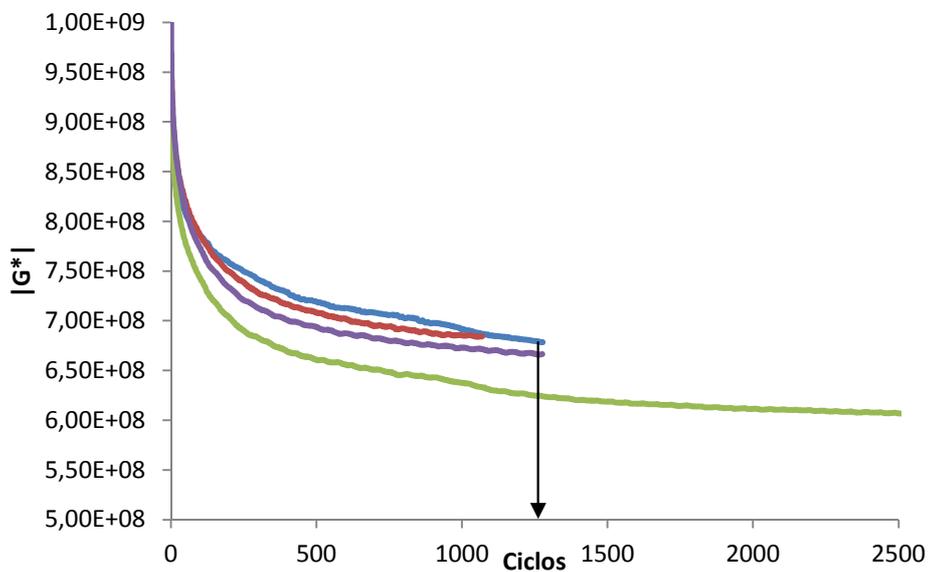


Figura 29 - Varredura de tempo para as amostras de 2,00mm de TMN

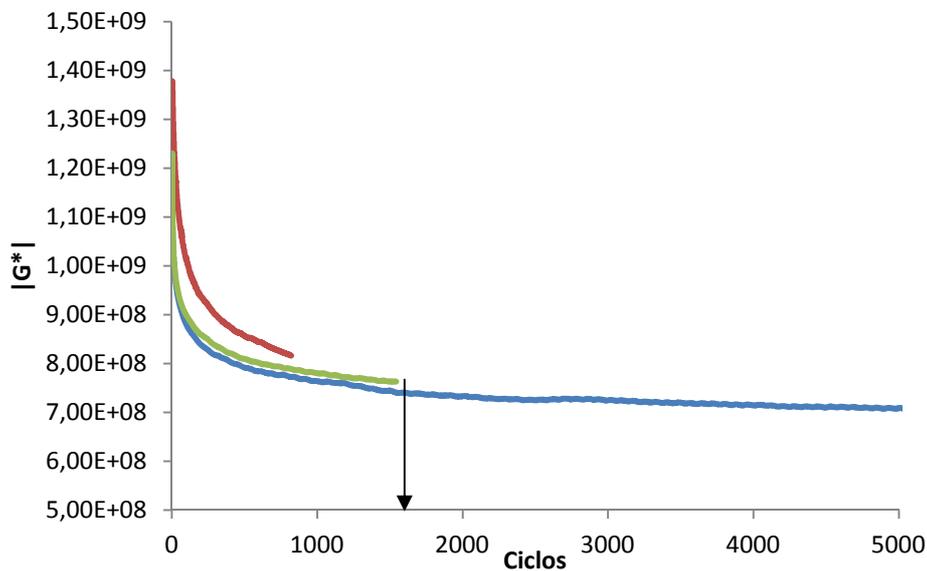
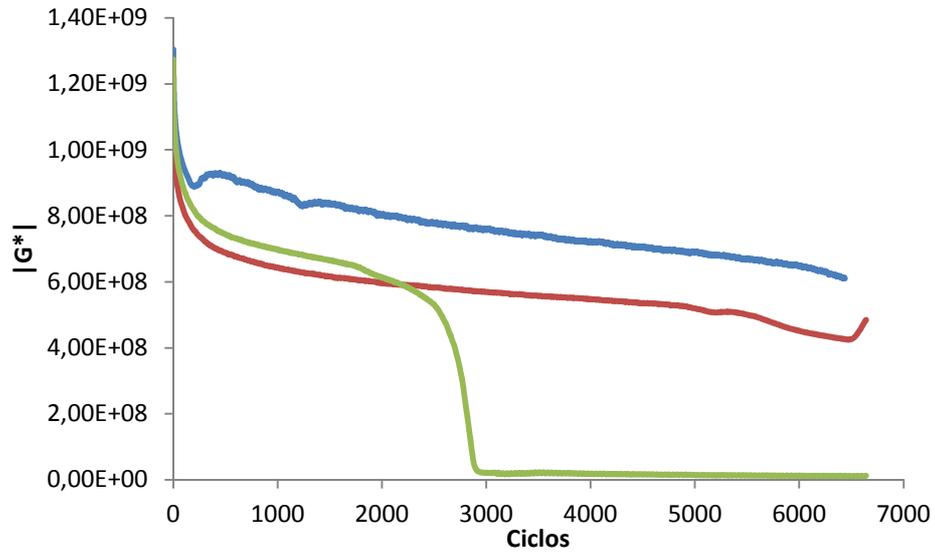


Figura 30 - Varredura de tempo para as amostras de 4,00mm de TMN



Pelas Figuras 27, 28 e 29, podemos perceber o momento em que o equipamento para a obtenção de dados. Percebemos que as curvas não tem a forma de “s”, como é normal em uma curva de fadiga.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 Conclusões

O presente trabalho discutiu o efeito do TMN do agregado na mistura asfáltica, a fim de entender o papel do agregado graúdo no dano por fadiga. Uma análise baseada na microtrincamento e uma análise baseada na mecânica da fratura foram usadas para tentar entender o comportamento do agregado graúdo, no potencial de trincamento de misturas asfálticas.

Os teores de ligante asfáltico obtidos para as MAFs com diferentes TMNs. A partir da comparação, pode-se concluir que a área de superfície específica aumenta o teor de ligante. MAFs com menores TMNs de agregados apresentarão teores de ligante asfáltico superiores, quando comparados às MAFs com maiores TMN, e conseqüentemente menores superfícies específicas. O método de dosagem proposto por Coutinho *et al.* (2011) foi satisfatório para a dosagem de MAFs com diferentes TMN. Porém, esta metodologia só é aplicável para MAFs com TMNs de no mínimo 1,18mm (peneira #16), uma vez que peneiras com malhas menores inviabilizam o fracionamento de misturas soltas.

Com relação à análise da resistência ao macrotrincamento usando conceitos de mecânica da fratura, não foi possível concluir sobre a influência do TMN na resistência ao trincamento, uma vez que o teor de ligante asfáltico se caracterizou com outra variável. Além disso, na temperatura avaliada, outros mecanismos de dano ocorrem durante o processo de fratura, dificultando a análise de uma variável no processo. Quando comparado o efeito da temperatura na variação do TMN, temos que a análise da fratura a 25°C não pode ser feita, pela quantidade de formas de dano que ocorrem na mistura, o que não ocorre a 15°C, pois a rigidez do ligante asfáltico nessa temperatura é mais próxima à rigidez da matriz pétre.

Com relação às análises do DSR, é possível concluir que as rigidezes a 25°C são bastante parecidas, pois a varredura de deformação resultou em valores bem próximos de amplitude de deformação. Foi possível, também, perceber uma mudança no comportamento das misturas com diferentes TMN, com relação as suas rigidezes. Em altas e baixas frequências de carregamento, existe uma hierarquização das rigidezes, influenciadas pela variação do TMN. Porém, para frequências intermediárias, as rigidezes são muito próximas. Quanto à vida de fadiga, não foi possível fazer a análise, por problemas técnicos no equipamento. Com relação à elasticidade das amostras, podemos concluir que as misturas com maiores TMNs são mais elásticas do que as misturas com menores TMNs.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

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

- Testar a viabilidade da dosagem de MAF para misturas com TMNs menores que 1,18mm;
- Verificar a influência da angularidade dos agregados no dano por fadiga;
- Realizar ensaios de fratura para amostras com mesmo teor de ligante asfáltico;
- Realizar ensaios de varredura de tempo, para a caracterização de fadiga nas mesmas temperaturas dos ensaios de fratura;
- Analisar as imagens no ensaio com o semicírculo;
- Realizar os ensaios de fadiga no reômetro;
- Avaliar as misturas com agregados com mesma origem mineralogia;
- Verificar a possível relação entre os comportamentos MAF × MAC.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALENCAR, A.E.V.A. (2009) Avaliação do Uso de Polímero EVA, Resíduo da Indústria de Calçados (EVAR) e Aditivos no Desempenho Reológico de Ligante Asfáltico de Petróleo. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, CE.
- ARAGÃO, F.T.S.; LEE, J., KIM, Y. R.; KARKI, P. (2010) Material - Specific Effects of Hydrated Lime on the Properties and Performance Behavior of Asphalt Mixtures and Asphaltic Pavement, *Journal of Construction and Building Materials*, Volume 24.
- ARAGÃO, F.T.S. (2011) Computational Microstructure Modeling of Asphalt Mixtures Subjected to Rate-Dependent Fracture. Tese de Doutorado, University of Nebraska – Lincoln. Lincoln, NE.
- ARAMBULA, E. (2007) Influence of Fundamental Material Properties and Air Voids Structure on Moisture Damage of Asphalt Mixes. Tese de Doutorado. Texas A&M University. College Station, TX.
- BENEVIDES, S.A.S. (2000) Análise Comparativa dos Métodos de Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos – Empírico do DNER e Resiliência da COPPE/UFRJ em Rodovias do Ceará, Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- BERNUCCI, L. L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. (2007) Pavimentação Asfáltica – Formação Básica para Engenheiros. Rio de Janeiro, RJ.
- BESSA, I.S. (2012) Avaliação do Processamento Digital de Imagens como Ferramenta para Caracterização de Agregados e Misturas. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, CE.
- BRAHAM, A.F.; BUTTLAR, W.G.; MARASTEANU, M. (2007) Effect of Binder Type, Aggregate, and Mixture Composition on Fracture Energy of Hot-Mix Asphalt in Cold Climates. Transportation Research Board, Washington, DC.

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: Journal of the Transportation Research Board*, 2057, 28-36.

CASTELO BRANCO, V.T.F. (2008) An Unified Method for the Analysis of Nonlinear Viscoelasticity and Fatigue Cracking of Asphalt Mixes Using the Dynamic Mechanical Analyzer. Tese de Doutorado, Texas A&M University. College Station, TX.

CHONG, K.P.; KURUPPU, M.D. (1988) New Specimens for Mixed Mode Fracture Investigations of Geomaterials, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 30, No. 5, 701-712.

COUTINHO, R.P.; PAMPLONA, T.F.; CASTELO BRANCO, V.T.F.; SOARES, J.B.; MATEOS, A. (2010) Multiscale Approach for Characterization of Asphaltic Materials Designed in Brazil and Spain. 11th International Conference on Asphalt Pavements – ISAP, Japão.

COUTINHO, R.P.; BABADOPULOS, L.F.A.L.; CASTELO BRANCO, V.T.F.; SOARES, J.B. (2011) Proposição de um Novo Método de Dosagem para Representação da Parte Fina de Misturas Asfálticas. XVI CILA, Rio de Janeiro, RJ.

COUTINHO, R.P. (2012) Utilização da Parte Fina de Misturas Asfálticas para Avaliação do Dano por Fadiga. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, CE.

DAI, Q.; YOU, Z (2007) Prediction of Creep Stiffness of Asphalt Mixture and Micromechanics Finite-Element and Discrete Models. *Journal of Engineering Mechanics*, American Society of Civil Engineers, Volume 133, Number 2, pp. 163–173.

EPPS, J.; MONISMITH, C. L.; SEEDS, S.B.; ALAVI, S.H.; ASHMORE, S.C.; LEAHY, R.; MITCHELL, T.M. (1998). “Performance of HMA test sections at WesTrack.” *J. Assoc. Asphalt Paving Technol.*, 67, 738–782.

HIRSCH, F. (2009) Avaliação das Propriedades de Fratura de Misturas Asfálticas Através de Ensaios de Tração em Disco Circular com Fenda. Dissertação de Mestrado. COOPE/UFRJ.

HIRSCH, F.; MOTTA, L.M.; ODA, S. (2010) Ensaio de Torção em Disco Circular com Fenda para Análise de Fratura em Misturas Asfálticas. In: XXIV Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, Salvador, BA.

HUANG, Y.H. (2004) Pavement Analysis and Design, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 2 ed.

JOHNSON, C.M. (2010) Estimating Asphalt Binder Fatigue Resistance Using an Accelerated Test Method. Tese de Doutorado, University of Wisconsin. Madison, WI.

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.I. (2003) Effect of Mineral Fílers on Fatigue Resistance and Fundamental Material Characteristics: Mechanistic Evaluation. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1832, 1-8.

KIM, Y.R.; SEO, Y.; KING, M.; MOMEN, M. (2004) Dynamic Modulus of Asphalt Concrete in Indirect Tension Mode Transportation Research Board, Washington, DC.

LIM, I.L.; JOHNSTON, I.W.; CHOI, S.K. (1993) Stress Intensity factors for Semi-Circular Specimens Under Three-Point Bending. Engineering Fracture Mechanics, Vol.44, No.3.

MARASTEANU, M.; DAI, S.; LABUZ, J.F.; LI, X. (2002) Determining the Low-Temperature Fracture Toughness of Asphalt Mixtures. Transportation Research Board, Washington, DC.

MARASTEANU, M.; ZOFKA, A.; TUROS, M.; LI, X.; VELASQUEZ, R.; LI, X.; BUTTLAR, W.; PAULINO, G.; BRAHAM, A.; DAVE, E.; OJO, J.; BAHIA, H.; WILLIAMS, C.; BAUSANO, J.; GALLISTEL, A. e MCGRAW J. (2007) Investigation of Low Temperature Cracking in Asphalt Pavements. National Pooled Fund Study 776. Final Report. Minnesota Department of Transportation. Research Services Section.

MASAD, E.; LITTLE, D.; TASHMAN, L.; SAADEH, S.; AL-ROUSAN, T.; SUKHWANI, R. (2003) Evaluation of Aggregate Characteristics Affecting HMA Concrete Performance. Report ICAR 203 - 1. The International Center for Aggregate Research. Arlington, Virginia.

MASAD, E.; AL-ROUSAN, T.; BUTTON, J.; LITTLE, D.; TUTUMLUER, E. (2005) Test Methods for Characterizing Aggregate Shape, Texture, and Angularity. Report NCHRP – 555, National Cooperative Highway Research Program. National Research Council, Washington, DC.

MASAD, E.; CASTELO BRANCO, V.T.F.; LITTLE, D.N.; LYTTON, R. (2007) A Unified Method for the Analysis of Controlled-Strain and Controlled-Stress Fatigue Testing. International Journal of Pavement Engineering, vol. 9, 233-246.

MEDINA, J. (1997) Mecânica dos Pavimentos, 1ª edição, COPPE/UFRJ.

MONISMITH C.L. (1958) Flexibility Characteristics of Asphaltic Paving Mixtures, Proceedings Association of Asphalt Paving Technologists, v. 27.

MONISMITH, C. L. (1970) Influence of shape, size, and surface texture on the stiffness and fatigue response of asphalt mixtures. Technical Report 109, Transportation Research Record, National Research Council.

MONISMITH, C.L. (1991) Summary Report on Permanent Deformation in Asphalt Concrete, SHRP-A/lr-91-104, National Research Council, Washington, D.C.

MONTESTRUQUE, G.; VASCONCELOS, K. L.; BERNUCCI, L.B. (2010) Ensaio de Flexão em Amostra Semi-circular com Fenda e Análise de Imagens para Caracterização da Resistência à Fratura de Misturas tipo AAUQ. In: XXIV Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, Salvador, BA.

MOTTA, L.M.G. (1991) Método de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis, Critério de Confiabilidade e Ensaio de Carga Repetida, Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

NEJAD, F.M.; AFLAKI, E.; MOHAMMADI, M.A. (2010) Fatigue behavior of SMA and HMA mixtures. *Construction and Building Materials*.

PARIS, P.C.; ERDOGAN, F. (1963) A Critical Analysis of Crack Propagation Laws, *Transactions of the ASME, Journal of Basic Engineering, Series D*, 85, No. 3.

RICE, J.R. (1968) A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentration by Notches and Cracks. *Journal of Applied Mechanics*, Vol.35, pp. 379-386.

ROBERTS, F.L.; KANDHAL, P.S.; KENNEDY, T.W. (1996) *Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design and Construction*. National Center for Asphalt Technology, 2ª Edição, Lanham, MD.

RODRIGUES, R. M. (1991) Estudo do trincamento de pavimentos. Tese de Doutorado em Engenharia Civil. COOPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.

SHAMES, I.H. (1997) *Elastic and Inelastic Stress Analysis*, Taylor and Francis, revised printing, Washington DC, Estados Unidos.

SILVA, P. (1995) Contribuição para o Aperfeiçoamento do Emprego do Programa FEPAVE2 em Estudos e Projetos de Pavimentos Flexíveis, Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

SOUSA, J.B.; PAIS, J.C.; PRATES, M.; BARROS, R.; LANGLOIS, P.; LECLERC, A.M. (1998) Effect of Aggregate Gradation on Fatigue Life of Asphalt Concrete Mixes. *Transportation Research Board*, Washington, DC.

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.

SOUZA, L.T. (2009) Investigation of Aggregate Angularity Effects on Asphalt Concrete Mixture Performance Using Experimental and Virtual Asphalt Samples. Dissertação de Mestrado, UNL, Lincoln, NE.

SOUZA, L.T.; KIM, Y.; 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, ASCE.

VASCONCELOS, K. L. (2004) Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas a Quente Dosadas pelas Metodologias Marshall e Superpave com Diferentes Granulometrias. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, CE

VASCONCELOS, K.L.; BHASIN, A.; LITTLE, D.N. (2009) 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.

VINSON, T.S.; JANOO, V.C; HAAS, R.C.G (1999) Summary Report Low Temperature and Thermal Fatigue Cracking. SHRP-A/90-001, National Research Council, Washington, D.C.

WAGONER, M.P.; BUTTLAR, W.G.; PAULINO, G.H. (2004) Development of a Single-Edge Notched Beam Test for Asphalt Concrete Mixtures, Submitted to ASTM Journal of Testing and Evaluation.

WAGONER, M. P. (2006) Fracture Testes for Bituminous-Aggregate Mixtures: Laboratory and Filed Investigations. Doctor of Philosophy, Urbana, Illinois, EUA.

TAYEBALLI, A.A.; DEACON J.A.; COPLANTZ, J.S.; MONISMITH C.L. (1993) Modeling Fatigue Response of Asphalt Aggregate Mixtures, Proceedings the Association of Asphalt Paving Technologists, v. 62, p. 285-421.

XU, S.; ZHAO, Y.; WU, Z. (2006) Study on the Average Fracture Energy for Crack Propagation in Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE.

ZOLLINGER, C. (2005) Application of Surface Energy Measurements to Evaluate Moisture Susceptibility of Asphalt and Aggregates. *Dissertação de Mestrado*, Texas A&M University. College Station, TX.