

ESTUDO DA FADIGA EM MISTURAS ASFÁLTICAS POR MEIO DO ENSAIO DE FADIGA À TRAÇÃO DIRETA UNIAXIAL CÍCLICO

Rita Flávia Régis Queiroz¹
Jeovanesa Régis Carvalho²
Érika Vitória de Negreiros Duarte³
John Kennedy Guedes Rodrigues⁴

RESUMO

No Brasil os defeitos mais recorrentes nas rodovias são trincamento por fadiga e deformação permanente. O surgimento de trincas no revestimento asfáltico são reflexo principalmente de repetidas deformações provocadas pelas solicitações do tráfego que reduzem consideravelmente a vida de serviço do pavimento. Tradicionalmente no Brasil a análise experimental da fadiga é realizada por meio do ensaio de compressão diametral, que reconhecidamente apresenta limitações no estado de tensões desenvolvido. Na Europa e América do Norte, métodos mais eficientes de previsão de fadiga já são uma realidade consolidada. Esse trabalho tem o objetivo de contribuir para a disseminação do novo de Fadiga à Tração Direta Uniaxial Cíclico e aproximar o estudo da fadiga dos conceitos da Teoria do Dano em Meio Contínuo Viscoelástico (S-VECD). Através da calibração do modelo S-VECD com o ensaio de Fadiga à Tração Direta Uniaxial Cíclico é possível prever o desempenho de misturas asfálticas independente da forma e amplitude do carregamento aplicado para induzir o dano. No programa experimental foi realizada a dosagem SUPERPAVE da mistura asfáltica, e a caracterização mecânica foi realizada através dos ensaios de tração indireta por compressão diametral, módulo de resiliência e módulo dinâmico. A avaliação da fadiga foi realizada através dos ensaios de compressão diametral, LAS (Linear Amplitude Sweep) e Fadiga à Tração Direta Uniaxial Cíclico, com objetivo de estudar esse fenômeno pela metodologia tradicional e nova. O novo ensaio foi realizado satisfatoriamente com ruptura bem definida e obtenção do número de ciclos que levou a mistura asfáltica à ruptura.

Palavras-chave: Misturas asfálticas, modelo S-VECD, Fadiga à Tração Direta Uniaxial Cíclico.

INTRODUÇÃO

O uso intenso do modal rodoviário associado ao elevado crescimento na frota de veículos e as cargas transportadas, compromete o desempenho dos pavimentos asfálticos, que apresentam deteriorações prematuras levando ao aumento no custo do transporte. O dano por fadiga é reconhecido como uma das principais formas de degradação dos pavimentos asfálticos,

¹ Mestranda do Curso de **Engenharia Civil e Ambiental** da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, flaviarq18@gmail.com;

² Doutoranda do Curso de **Engenharia Civil e Ambiental** da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, jeovanesaregis@gmail.com;

³ Mestre pelo Curso de **Engenharia Civil e Ambiental** da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, erika_vitoria@hotmail.com;

⁴ Doutor pelo Curso de **Engenharia de Transportes** da Universidade de São Paulo – USP, profkennedy@hotmail.com.

esse mecanismo se origina pelas cargas repetidas do tráfego gerando tensões de tração no revestimento asfáltico, e também devido às variações de temperatura que o pavimento é submetido ao longo da sua vida útil (KIM et al., 2002). As tensões de tração agindo de forma repetitiva fazem surgir microfissuras na parte inferior da camada de revestimento, essas trincas se propagam até atingir a superfície, levando à falha estrutural do pavimento asfáltico.

Prever a fadiga de forma precisa não é uma tarefa fácil, não apenas pela complexidade da fadiga em si, que depende das características estruturais e materiais do pavimento asfáltico, como também pela dificuldade operacional dos ensaios de fadiga. O desempenho à fadiga das misturas asfálticas estimado em laboratório requer uma série de ensaios com diversos fatores influenciando nos resultados, entre eles a preparação dos corpos de prova, sua geometria, o tipo de ensaios realizado, as propriedades das misturas asfálticas e as condições ambientais (TANGELLA et al., 1990). Soma-se a esses fatores os diferentes critérios de ruptura adotados em cada ensaio, formas de carregamento e as diferentes interpretações dos resultados.

O ensaio para análise de fadiga mais utilizado Brasil é o de tração sob compressão diametral, devido à simplicidade de execução. Contudo, esse ensaio apresenta uma série de restrições na forma de carregamento, e com o avanço da tecnologia e das técnicas de laboratório, além de necessidade de uma previsão precisa da fadiga, sua simplicidade não justifica o seu emprego (KIM et al., 2002).

Recentemente, o professor Y. Richard Kim, da North Caroline State University nos Estados Unidos desenvolveu um novo ensaio para análise de fadiga. Segundo Martins (2014) no ensaio cíclico de Fadiga por Tração-Compressão Uniaxial é aplicado ao corpo de prova uma deformação na forma de tensão cíclica senoidal, de amplitude constante até ocorrer a ruptura do corpo de prova caracterizada pela defasagem do ângulo de fase. Esse ensaio, além de prever de forma mais verossímil o comportamento da mistura asfáltica frente à fadiga, necessita de bem menos corpos de prova do que o tradicional (por compressão diametral) e menor tempo para a realização.

Nessa nova metodologia de ensaio utiliza-se o modelo Simplified-Viscoelastic Continuum Damage (S-VECD), os resultados são analisados com base nas propriedades fundamentais dos materiais gerando modelos de evolução do dano e integridade do material, dessa forma os resultados independem da forma de carregamento, frequência e temperatura do ensaio. Esse método se mostrou eficaz para avaliar a fadiga em misturas asfálticas verificado em diversas pesquisas (KIM et al., 2002; UNDERWOOD et al., 2012; NASCIMENTO, 2015; XIE & SHEN, 2015). Diante do exposto, a presente pesquisa tem como objetivo contribuir para

a implementação do novo ensaio de cíclico de Fadiga à Tração-Compressão Uniaxial ainda pouco incipiente no Brasil, assim como estudar a sua comparação com os métodos tradicionalmente utilizados para prever a vida de fadiga dos pavimentos asfálticos.

METODOLOGIA

Materiais

- **Ligante Asfáltico**

O ligante asfáltico utilizado nesta pesquisa foi o CAP 50/70 fornecido pela empresa Rocha Cavalcante. O material foi caracterizado conforme a norma DNIT 095/2006, os resultados são apresentados na Tabela 1. Além dos ensaios convencionais, foi realizado o Grau de desempenho (PG) conforme a norma ASTM D 6373-16, esse teste é utilizado na classificação dos ligantes asfálticos, substituindo as classificações por meio da penetração. Assim, por meio do PG é determinada a máxima temperatura para a qual o ligante mantém sua resistência à deformação permanente.

Tabela 1: Caracterização do CAP

Características	CAP Puro	Limites
Penetração (0,1mm)	71,6	50-70
Ponto de Amolecimento (°C)	48,0	46 (mín)
Viscosidade Rotacional 135°C (cp)	375,0	274 (mín)
Viscosidade Rotacional 150°C (cp)	187,5	112 (mín)
Viscosidade Rotacional 177°C (cp)	69,25	57 - 285
Grau de desempenho - PG (°C)	64	--

- **Agregados**

Os agregados graúdos foram a brita 19,1mm e a brita 12,5mm. Os agregados miúdos foram a areia e o pó de pedra. O fíler foi a cal hidratada da marca Megaó obtida no comércio de Campina Grande-PB. Os agregados foram fornecidos pela Pedreira Rocha Cavalcante. Os materiais foram dosados através do método SUPERPAVE, e as amostras foram selecionadas por quarteamento através da norma DNER-PRO 199/96.

Métodos

Caracterização dos agregados

- **Distribuição granulométrica**

A distribuição granulométrica dos agregados graúdos e miúdos é apresentada na Tabela 2, a análise granulométrica foi realizada conforme a norma DNIT - ME 083/98.

Tabela 2: Distribuição granulométrica dos agregados

Quantidade passante acumulada (%)					
Peneira	Peneira	Areia	Pó de pedra	Brita 12,7	Brita 19,1
1 1/2"	38,1	100,00	100,00	100,00	100,00
1"	25,4	100,00	100,00	100,00	100,00
3/4"	19,1	100,00	100,00	100,00	98,02
1/2"	12,7	100,00	100,00	100,00	28,98
3/8"	9,5	100,00	100,00	87,34	3,59
Nº 4	4,8	99,36	99,98	16,98	0,08
Nº 10	2	97,58	80,28	0,46	0,06
Nº 40	0,42	72,38	40,37	0,34	0,05
Nº 80	0,18	5,61	23,33	0,16	0,04
Nº 200	0,074	0,46	10,16	0,10	0,02

- **Massa específica e absorção**

Para os agregados graúdos, os ensaios de massa específica e absorção foram realizados de acordo com a especificação do DNIT - ME 081/98. Para os agregados miúdos, a massa específica foi regida pela norma NBR NM 52/2009 e a absorção pela NBR NM 30/01. Na Tabela 3 são apresentados os resultados, assim como os limites especificados.

Tabela 3: Resultados de Massa Específica e Absorção

Agregado	Massa específica real	Massa específica aparente	Absorção obtida (%)	Absorção máxima (%)
Brita 19,1mm	2,75	2,74	0,39	2,00
Brita 12,5 mm	2,75	2,73	0,60	2,00
Areia	2,50	2,42	0,26	--
Pó de pedra	2,70	2,58	0,36	--

- **Equivalente areia**

O ensaio foi realizado conforme as especificações da norma DNIT ME 054/97. Os resultados são apresentados na Tabela 4, e de acordo com a norma DNIT 031/2006 o valor mínimo do equivalente areia é de 55% para a pavimentação. A areia atendeu perfeitamente a especificação, contudo o pó de pedra apresentou resultado abaixo do mínimo, é importante salientar que a presença de fino influenciou diretamente o resultado, visto que o pó de pedra não apresenta material argiloso em sua constituição.

Tabela 4: Resultados Equivalente Areia

Ensaio	Areia	Pó de pedra	Requisito mínimo
Equivalente areia(%)	86,39%	47,20%	55%

- **Angularidade**

O ensaio foi realizado de acordo com a norma ASTM C 1252/17. Na Tabela 5 são apresentados os resultados, e para as especificações SUPERPAVE o valor mínimo de angularidade deve ser de 45%, portanto a areia e o pó de pedra atenderam aos requisitos.

Tabela 5: Resultados da Angularidade

Material	Densidade aparente	Vazios não compactados	Critério	Requisito mínimo
Areia	2,50 g/cm ³	45,76%	Método B	45%
Pó de pedra	2,70g/cm ³	46,58%		

- **Partículas alongadas e achatadas**

O ensaio foi realizado conforme a norma ASTM D 4791/10, obtendo a porcentagem de partículas alongadas e achatadas contidas no agregado graúdo. A especificação SUPERPAVE estabelece que para asfalto misturado a quente essa porcentagem deve ser no mínimo 90%, os resultados são apresentados na Tabela 6, e estão dentro do limite estabelecido.

Tabela 6: Resultados Partículas Alongadas e Achatadas

Agregado	Partículas fraturadas	Critério	Requisito mínimo
Brita 19,1mm	99,88%	Duas ou mais faces fraturadas	90%
Brita 12,5mm	99,89%		90%

- **Partículas fraturadas**

O ensaio foi realizado de acordo com as especificações da norma ASTM D 5821/13. Os resultados para a brita 12,5mm e 19,1mm são apresentados na Tabela 7, de acordo com as especificações SUPERPAVE o valor mínimo de partículas fraturadas deve ser 90%, portanto os agregados atendem satisfatoriamente o requisito mínimo.

Tabela 7: Resultados de Partículas Fraturadas

Agregado	Partículas fraturadas	Critério	Requisito mínimo
Brita 19,1mm	99,88%	Duas ou mais faces fraturadas	90%
Brita 12,5mm	99,89%		

- **Índice de forma**

O ensaio foi realizado de acordo com as recomendações da norma DNIT ME 086/94. A Tabela 8 apresenta os resultados, e de acordo com Bernucci et al. (2010) para atender aos requisitos mínimos o menor valor de f deve ser 0,5, percebe-se, portanto, que as britas 12,5mm e 19,1mm atenderam perfeitamente a recomendação.

Tabela 8: Resultados Índice de Forma

Agregado	Índice de forma	Critério	Requisito mínimo
Brita 12,5mm	0,74	$0 < f < 1$	
Brita 19,1mm	0,88	F=1 cúbico F=0 lamelar	0,5

- **Abrasão Los Angeles**

O ensaio foi realizado de acordo com as especificações da norma DNIT ME 035/98. Foi realizado apenas para a brita 19,1mm, uma vez que a 12,5mm é da mesma pedreira. Os resultados são apresentados na Tabela 9, e atenderam a especificação.

Tabela 9: Resultados de Abrasão Los Angeles

Ensaio	Critério (%)		Agregado graúdo
	Mínimo	Máximo	Brita 19,1mm
Abrasão Los Angeles	-	50%	21,01%

- **Dosagem SUPERPAVE**

A dosagem SUPERPAVE foi realizada com o ligante puro, visando obter o teor ótimo de ligante asfáltico e dos agregados de projeto. Por meio da granulometria dos materiais, e utilizando uma planilha Excel, foram construídas as três composições que foram testadas (uma superior, uma intermediária e uma inferior).

À partir do cálculo dos parâmetros volumétricos, definiu-se a curva de projeto como sendo a inferior, uma vez que os valores obtidos foram os que estavam mais próximos da dosagem SUPERPAVE. Em seguida, os corpos de prova foram compactados para as proporções da curva inferior, foram realizados com mais três teores : $\pm 0,5\%$ e $+1\%$, ou seja, 4,0%; 4,5%; 5,0% e 5,5%. Os parâmetros volumétricos (obtidos por meio do Rice test ASTM D2041) são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10: Parâmetros volumétricos obtidos no Rice Test

Ligante %	% gmm $n_{projeto}$	Vam (%)	Vv (%)	Rbv (%)	Massa específica(g/cm ³)
4,0	92,25	17,14	7,75	75,60	2,560
4,5	93,81	16,23	6,19	74,67	2,545
5,0	95,66	15,32	4,34	73,77	2,523
5,5	97,54	14,54	2,46	73,07	2,497
Critérios da dosagem	96	13 mín	4,00	65 a 75	-

Através dos dados da Tabela 10, verifica-se que nenhum dos teores testados atenderam a especificação de 4% de volume de vazios. Portanto, Por meio da curva do teor de ligante em função do volume de vazios, estimou-se o teor de ligante para o qual se tem 4,0% de vazios, o qual foi de 5,1%, e foram então moldados novamente os corpos de prova para obter os parâmetros volumétricos e confirmar o teor de vazios.

Caracterização mecânica e avaliação da fadiga

Para caracterização mecânica foram realizados os ensaios de resistência à tração indireta, módulo de resiliência e módulo dinâmico. A análise de fadiga foi realizada por meio dos ensaios de fadiga por compressão diametral, LAS (Linear Amplitude Sweep) e o ensaio cíclico de fadiga à tração-compressão uniaxial. As normas que regem os ensaios são apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11: Ensaios de caracterização mecânica e avaliação da fadiga

Ensaio	Norma
Resistência à tração indireta	DNIT ME 136/10
Módulo de resiliência	NBR 16018/2011
Módulo dinâmico	AASHTO TP-62/2009
Fadiga por compressão diametral	DNIT 183/2018
LAS	ASHTO TP 101:2014
Fadiga à tração-compressão uniaxial	AASHTO TP-107:2014

- **Ensaio cíclico de fadiga à tração-compressão uniaxial**

O ensaio de fadiga por tração direta foi realizado de acordo com a norma AASHTO TP-107:2014. Foram utilizados corpos de prova cilíndricos moldados no compactador giratório SUPERPAVE com diâmetro de 100 mm e altura de 145 mm. Os corpos de prova foram postos nos pratos de fixação inferior e superior do equipamento com 24 horas de com uma resina epóxi de alta resistência, certificando o alinhamento dos mesmos para que não existam tensões que não sejam de tração. De acordo com Mocelin (2018) são apresentadas tensões de tração e compressão durante os carregamentos cíclicos, contudo as deformações ocorrem exclusivamente devido à tração.

Segundo Schuster (2018) o ensaio consiste em aplicar no corpo de prova uma deformação senoidal, de amplitude constante, até que ocorre a ruptura caracterizada pela defasagem do ângulo de fase. Durante o ensaio são coletados e monitorados a deformação, a carga, a temperatura, o módulo dinâmico, o ângulo de fase e o deslocamento do atuador. E sse

ensaio é bastante preciso, o controle das deformações no corpo de prova foi realizado por meio dos LVDTs que são bastante sensíveis, e devem ser ajustados detalhadamente antes da realização do ensaio. Os corpos de prova foram mantidos na temperatura de 20°C, confinados na câmara do equipamento AMPT (Asphalt Mixture Performance Test), conforme ilustra a Figura 1, foram ensaiados dois corpos de prova.

O procedimento de realização do ensaio, conforme o modelo de Mocelin (2018) foi: manter as amostras na temperatura de 20°C em seguida aplicar a carga de assentamento no corpo de prova de aproximadamente 0,09 KN, em seguida a carga é aliviada permitindo livre expansão e contração do equipamento, os extensômetros foram dispostos ao redor do corpo de prova em distâncias iguais, foram utilizados três extensômetros distanciados de 120° em relação ao outro. Inicialmente foi realizado o ensaio cíclico denominado fingerprint com frequência de 10Hz, no ensaio deve manter a deformação no intervalo de 50 a 75 $\mu\epsilon$, fazendo com que o material trabalhe no regime elástico linear, não havendo o acúmulo de dano, onde é feita a medição do módulo dinâmico ($|E * |_{fingerprint}$). Em seguida, é realizado o ensaio de fadiga por tração direta, com deformação controlada de 300 $\mu\epsilon$ na frequência de 10 Hz, o critério de parada do ensaio é quando a propagação de trincas origina uma macrotrinca visível. Para o outro corpo de prova o nível de deformação adotado foi em função do número de ciclos que levaram à ruptura da 1ª amostra, conforme a Tabela 16.

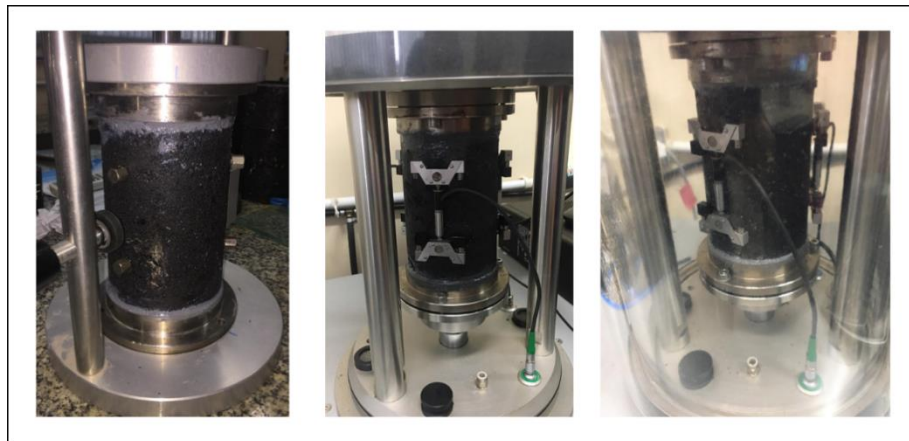


Figura 1: Ensaio de fadiga à tração-compressão uniaxial na AMPT

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Caracterização mecânica

- **Ensaio de resistência à tração indireta por compressão diametral e módulo de resiliência.**

A Tabela 12 apresenta o resultado de resistência à tração (RT), a média de três corpos de prova do ligante asfáltico 50/70. Verifica-se que o resultado atendeu ao mínimo especificado em norma de 0,65 MPa a 25°C de acordo com a DNIT ES031/2006. Esse ensaio é utilizado na caracterização de misturas asfálticas e fornece uma boa aproximação em relação aos resultados dos ensaios de fadiga (Brito et al., 2008; Rossato, 2015).

Tabela 12: Resultado do ensaio de resistência à tração

Ensaio	Unidade	Dnit es031/2006	Resultado
Resistência à tração	MPa	0,65	1,16

O módulo de resiliência para os corpos de prova é apresentado na Tabela 13, e de acordo com Bernucci et al. (2008) os valores de MR no Brasil para 25°C estão entre 2000 e 8000 MPa, portanto a mistura apresentou-se dentro dos limites.

Tabela 13: Resultado do ensaio de módulo de resiliência

Ensaio	Unidade	Parâmetro	Resultado
MR	MPa	2000-8000	5271

- **Módulo dinâmico ($|E^*|$)**

A curva mestra para a mistura asfáltica foi obtida para as três temperaturas e nove frequências, fazendo uma superposição entre tempo e temperatura na temperatura de referência de 21°C. A curva mestra da mistura com CAP 50/70 é apresentada na Figura 2.

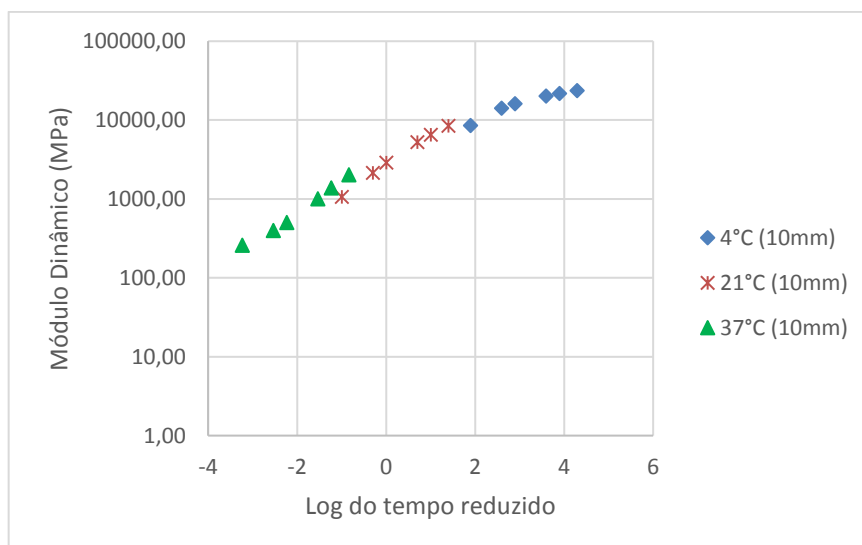


Figura 2: Curva mestra da mistura com CAP 50/70

De forma análoga ao MR, por ser uma medida de rigidez, o módulo dinâmico é influenciado pela temperatura, e ocorre uma redução na rigidez com o aumento da temperatura. É possível observar também que a rigidez da mistura diminuiu à medida que a frequência de aplicação de carga foi reduzida. O resultado de módulo dinâmico para a mistura nas três temperaturas de ensaio é apresentado no gráfico da Figura 3.

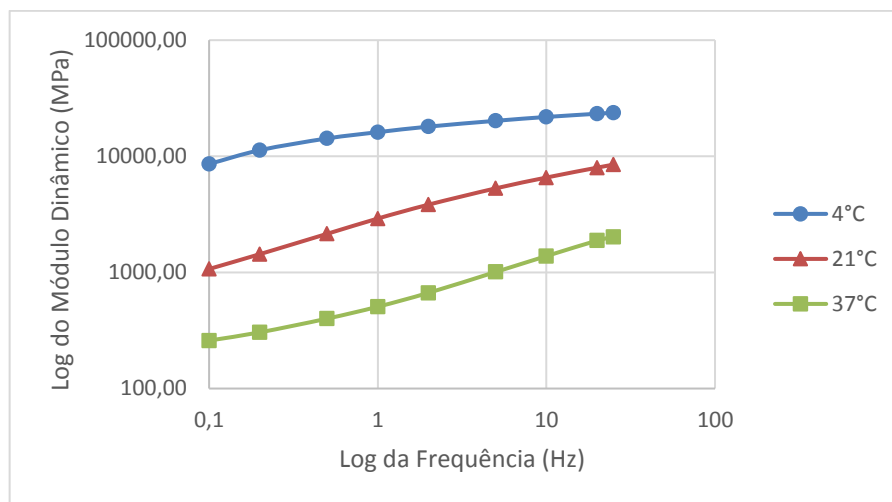


Figura 3: Módulo dinâmico da mistura nas temperaturas de 4,21 e 37°C

As propriedades viscoelásticas lineares fundamentais dos materiais são o módulo dinâmico e o ângulo de fase. No gráfico da Figura 4 é possível observar que o ângulo de fase aumenta com o incremento das temperaturas e diminui com o aumento da frequência. Entretanto, na temperatura de 37°C o comportamento foi diferente, pois o ângulo de fase foi reduzido nas frequências mais baixas e nas frequências maiores. Segundo Ali et al.(2016) que o comportamento do ângulo de fase para baixas temperaturas e altas frequências é atribuído ao ligante, e segue o desempenho dele. Nas temperaturas elevadas e baixas frequências o agregado interfere na tendência do ângulo de fase, assim grande parte da energia se deve à interação entre ligante e agregado levando à redução do ângulo de fase.

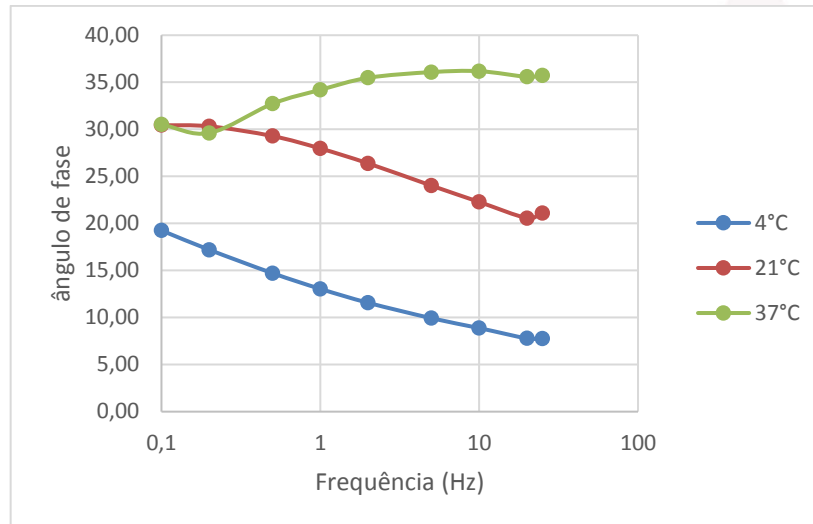


Figura 4: Ângulo de fase em função da frequência de carregamento para as temperaturas de 7, 21 e 37°C

Análise da Fadiga

- Fadiga por compressão diametral a tensão controlada**

O ensaio de fadiga foi realizado para cinco níveis de tensão controlada: 40; 37,5; 35; 32,5 e 30% do RT. Os diferentes níveis de tensão referem-se à tração gerada no centro do corpo de prova durante a realização do ensaio. As curvas de fadiga foram apresentadas em função da diferença de tensões (Figura 5) e em função da deformação específica (Figura 6).

Para a curva foi gerada a equação mais apropriada para sua linha de tendência, assim foi determinado o parâmetro R^2 referente a qualidade do ajuste do modelo para os pontos. Na Tabela 14 são apresentados os parâmetros das equações de vida de vida de fadiga em relação à diferença de tensões e à deformação específica .

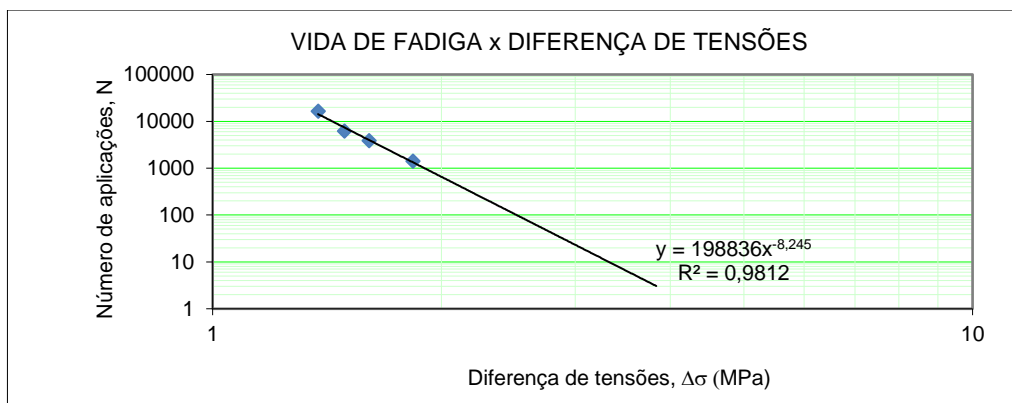


Figura 5: Vida de fadiga x Diferença de tensões

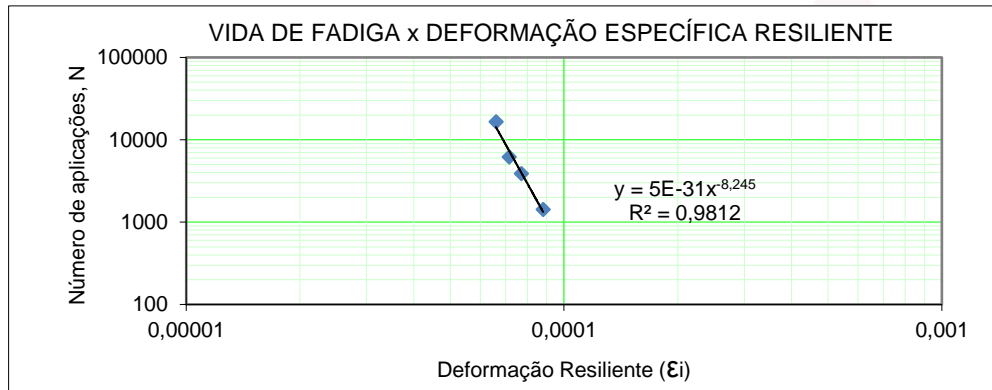


Figura 6: Vida de Fadiga x Deformação específica resiliente

Tabela 14: Parâmetros das equações de vida de fadiga

Mistura	Curva	$N = k_1 \left(\frac{1}{\Delta\sigma}\right)^{n_1}$ ou $N = k_2 \left(\frac{1}{\epsilon_i}\right)^{n_2}$	R^2	Parâmetros	
CAP 50/70	$N \times \Delta\sigma$	$198836 \left(\frac{1}{\Delta\sigma}\right)^{-8,245}$	0,9812	$K_1 = 198836$	$n_1 = 8,245$
	$N \times \epsilon_i$	$5 \times 10^{-31} \left(\frac{1}{\epsilon_i}\right)^{-8,245}$	0,9812	$K_2 = 5 \times 10^{-31}$	$n_2 = 8,245$

Analisando os resultados da Tabela 14, o fator R^2 próximo de 1 indica que o modelo apresentou uma menor dispersão dos dados para ambas as curvas de fadiga. A vida de fadiga é o número de ciclos (N) que a mistura resiste, sendo apresentada nas curvas de Wöhler em função da diferença de tensões e deformação específica. Se uma mistura resiste a maiores valores de N apresenta um melhor desempenho frente à fadiga, de acordo com Merighi (2015) o volume de vazios e a matriz de agregados são parâmetros que interferem na vida de fadiga.

Morilha Junior (2004) faz uma classificação do desempenho à fadiga de misturas asfálticas, assim utiliza-se três níveis de diferença de tensão: nível baixo para 0,5 MPa; nível médio para 1 MPa e nível alto para 2,0 MPa, essa classificação também foi utilizada nessa pesquisa. Assim a mistura com CAP 50/70 ensaiada apresenta maior resistência a altas tensões, resultado esperado devido ao valor elevado de MR.

De acordo com Tadeu Junior (2008) n_1 , a inclinação da reta na curva da vida de fadiga em função da diferença de tensões, indica o quanto a mistura asfáltica é susceptível a mudanças no estado de tensões. O valor do parâmetro n_1 para o CAP 50/70 foi de 8,245, ou seja, apesar de apresentar resistência elevada em altas tensões, o mesmo é susceptível ao estado de tensões, resultados próximos foram encontrados por Carvalho (2018) e Porto (2018) para o CAP 50/70.

Nas curvas de vida de fadiga em função da deformação específica, a deformação resiliente define a interferência do módulo de resiliência inicial apresentado pela mistura. Assim o coeficiente n_2 define a inclinação da curva, e de forma semelhante ao que foi feito na análise de fadiga em função da diferença de tensões, foram empregados três níveis de deformação de resiliência conforme De Cezaro Junior (2008): $3 \cdot 10^{-5}$ cm/cm para nível baixo; $6 \cdot 10^{-5}$ cm/cm para nível médio e $1 \cdot 10^{-4}$ cm/cm para nível alto. Assim a mistura com CAP 50/70 apresentou melhor desempenho para um nível médio de deformação.

- **Varredura linear de amplitude de deformação (LAS)**

O resultado do ensaio foi analisado para dano contínuo em meio viscoelástico (VECD) por meio dos parâmetros do experimento “A” e “B” e a fadiga através do número de ciclos que levou à ruptura em função da amplitude de deformação. Os valores dos parâmetros “A” e “B” são apresentados na Tabela 15.

Tabela 15: Parâmetros “A” e “B” para vida de fadiga

Análise VECD (parâmetros)	
A	B
100900,00	2,33

De acordo com Pamplona (2013) o parâmetro “A” é dependente da integridade do ligante em função do dano (por exemplo $|G^*| \cdot \sin \delta$ versus o dano acumulado) e do módulo complexo inicial (antes do dano). Assim maiores valores de “A” indicam uma maior resistência ao dano e parâmetros de integridade superiores. . Para a amostra ensaiada o valor de “A” obtido foi de 100900 e se mostrou próximo ao encontrado por Duarte (2018) e Marinho Filho (2017) que também realizaram o ensaio com o CAP 50/70.

O parâmetro “B” depende apenas α que é o ângulo de inclinação da curva do módulo de armazenamento (G') em função da frequência, obtido por meio da varredura de frequência. Menores valores do parâmetro B são desejáveis pois indicam um ligante menos susceptível às deformações sob mudanças térmicas. O valor do parâmetro “B” foi de 2,33 e novamente se mostrou próximo ao encontrado por Duarte (2018) e Marinho Filho (2017) que trabalharam com o mesmo tipo de ligante. O gráfico da Figura 7 apresenta a vida de fadiga (número de ciclos N_f) em função da amplitude de deformação pra o ensaio realizado na temperatura de 25°C.

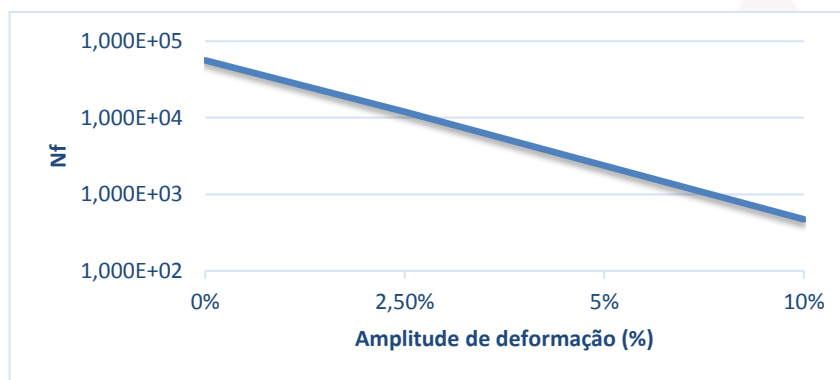


Figura 7: Variação dos ciclos de ruptura em função da amplitude de deformação para o CAP 50/70

No ensaio de LAS para análise do comportamento à fadiga, apesar de ser realizado conforme a metodologia VECD, Rodrigues (2018) ressalta que o desempenho à fadiga do ligante não necessariamente é o mesmo para as misturas asfálticas. Mello (2008) estudou a evolução do dano nas misturas asfálticas, de acordo com o autor comportamento mecânico das misturas não depende apenas da rigidez (parâmetro analisado no LAS), mas de outros fatores como granulometria, volume de vazios, temperatura e nível de deformação.

- **Ensaio cíclico de Fadiga à Tração Direta Uniaxial Cíclico**

A análise da fadiga por tração-compressão uniaxial foi realizada na temperatura de 20°C, com amplitude de deformação constante e frequência de 10 Hz. O ensaio foi realizado para duas amostras, na primeira foi mantida a deformação constante de 300 $\mu\epsilon$ e de acordo com o número de ciclos que levou à ruptura (N_f) o segundo foi ensaiado para a deformação constante de 350 $\mu\epsilon$.

Antes do ensaio de fadiga propriamente dito, foi realizado o ensaio denominado fingerprint, para determinar o módulo dinâmico e a variação de rigidez das amostras. É importante destacar que o fingerprint é obtido na tração-compressão da mesma forma que o ensaio de fadiga. Durante a realização do ensaio foram coletados dados de carga, deformação, módulo dinâmico e ângulo de fase. Com esses dados foram geradas as curvas de Módulo Dinâmico ($|E^*|$) e do Ângulo de Fase (δ) em função do número de ciclos de tração-compressão para cada amostra. Esses parâmetros são indicadores importantes das propriedades elásticas e viscoelásticas do material, tornando possível verificar o ciclo de ruptura das amostras. As curvas são apresentadas nas Figura 8 e 9, para as deformações constantes de 300 e 350 $\mu\epsilon$.

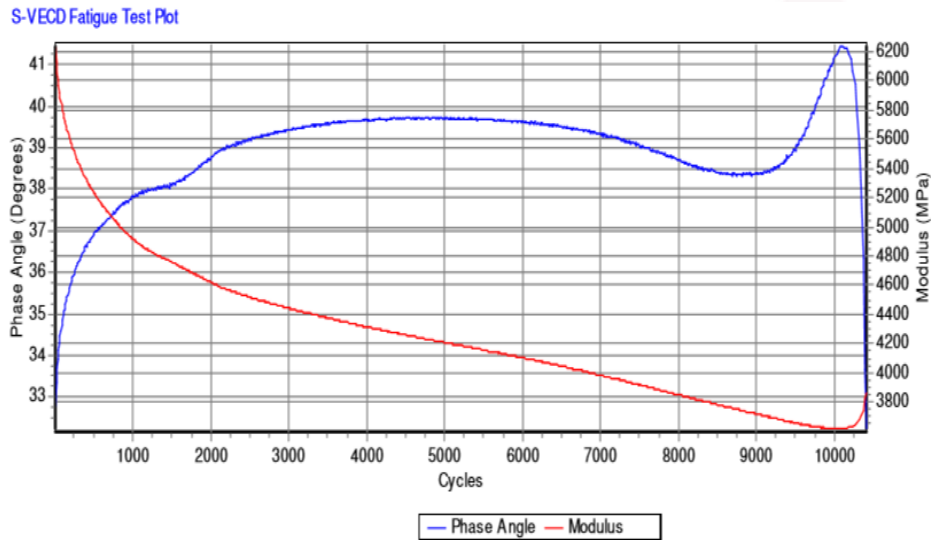


Figura 8: Módulo dinâmico e ângulo de fase em função do número de ciclos do ensaio de fadiga para deformação constante de 300 $\mu\epsilon$

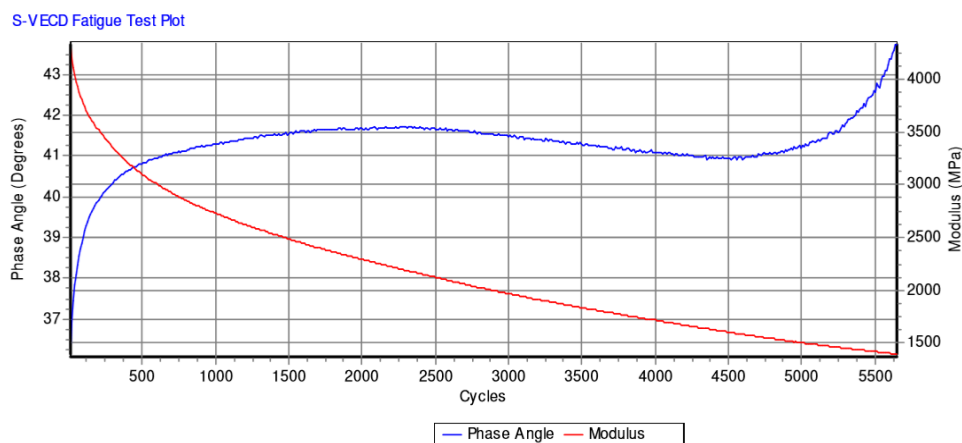


Figura 9: Módulo dinâmico e ângulo de fase em função do número de ciclos do ensaio de fadiga para deformação constante de 350 $\mu\epsilon$

Com base nos gráficos das Figuras 10 e 11, é possível observar que o módulo dinâmico diminui continuamente enquanto o ângulo de fase cresce até um pico, resultado encontrado por outros autores que realizaram o mesmo ensaio (Rodrigues, 2018; Schuster, 2018; Mocelin, 2018; Boeira, 2018). Conforme observou Rodrigues (2018) o rompimento do corpo de prova é caracterizado pelo pico do ângulo de fase seguido da sua queda brusca, e o módulo complexo decai quase verticalmente. O software utilizado no equipamento AMPT interrompe o ensaio imediatamente com queda do ângulo de fase (ruptura da amostra) e informa no relatório o número de ciclos que levou à ruptura N_f , portanto não foi possível observar o módulo dinâmico decaindo verticalmente.

Os parâmetros obtidos no ensaio para as duas amostras são apresentados na Tabela 12.

Os resultados foram obtidos para diferentes amplitudes de deformação, e observa-se que o

número de ciclos variou bastante, para a amostra com deformação constante de $300 \mu\epsilon$ o valor de N_f foi 10410 e para $350 \mu\epsilon$ foi de 5650. De acordo com Schuster (2018) a evolução da integridade do material em relação ao crescimento do número de ciclos é muito diferente para cada nível de deformação.

Tabela 12: Parâmetros do ensaio cíclico de fadiga à tração-compressão uniaxial

Deformação constante de $300 \mu\epsilon$		Deformação constante de $350 \mu\epsilon$	
Número de ciclos		Número de ciclos	
inicial	final	inicial	final
10	10410	10	5650
Módulo dinâmico		Módulo dinâmico	
inicial	final	inicial	final
6235	3864	4333	1392
Ângulo de fase ($^\circ$)		Ângulo de fase ($^\circ$)	
inicial	final	inicial	final
32,75	41,6	36,14	43,73
Tensão pico a pico (KPa)		Tensão pico a pico (KPa)	
inicial	final	inicial	final
1370,6	1057,0	1294,2	488,0

Segundo Magiaficio (2014) no decorrer do ensaio, as amostras sofrem danos progressivos, que em conjunto com a falha prematura é um efeito dos ciclos de cargas repetidas. Os danos progressivos é o que leva o módulo dinâmico, ou seja, a rigidez decair progressivamente com o aumento do número de ciclos e o ângulo de fase aumentar.

Para a utilização do modelo S-VECD, dois parâmetros principais devem ser obtidos: a pseudo-rigidez (C) também denominada integridade do material, e o dano acumulado (S). A relação entre esses parâmetros é uma propriedade fundamental. Segundo Boeira (2018) para ensaios executados em determinadas condições (temperatura, deformação, tensão) são obtidos parâmetros que se estendem a condições diferentes, diminuindo consideravelmente o tempo para realização dos ensaios em laboratório. Por meio desse modelo podem ser feitas diversas análises, contudo duas devem ser destacadas: a curva de fadiga para condições diferentes da ensaiada e o estudo do comportamento mecânico do pavimento por meio da teoria do dano em meio contínuo viscoelástico.

A curva C em função de S é denominada curva característica do material. Os valores são obtidos por meio de rotina computacional no MATLAB à partir dos parâmetros de módulo

complexo e fadiga na tração-compressão. As curvas de cada mistura geralmente são obtidas por meio do *fitting* (Schuster, 2018; Boeira, 2018). Nessa pesquisa não foi obtida a curva característica do material, pois o trabalho se deteve a implementar o ensaio de cíclico de fadiga à tração-compressão uniaxial no Laboratório de Engenharia dos Pavimentos e Geotécnica (LEP) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

Segundo Kim (2009) o modelo S-VECD foi desenvolvido para estudos em laboratório com o objetivo de caracterizar o dano em um menor intervalo de tempo. O ensaio uniaxial de fadiga à tração-compressão é utilizado para calibrar o modelo, por ser cíclico torna possível a obtenção de parâmetros de critérios de fadiga. A principal diferença entre a determinação da vida de fadiga por meio do S-VECD e o ensaio tradicional (compressão diametral) é a base teórica mais consistente do primeiro, segundo a mecânica do dano em meio contínuo viscoelástico.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Na análise de fadiga através do ensaio de fadiga por compressão diametral, à partir da análise das curvas Wöhler foi possível concluir que o fator R^2 próximo de 1 indicou que o modelo apresentou uma menor dispersão dos dados. Contudo, é importante destacar que a análise de fadiga em misturas asfálticas apenas por meio das curvas de Wöhler é muito limitada, e pode levar a conclusões equivocadas. Essas curvas são definidas para uma faixa restrita de variáveis, enquanto que em campo se tem uma grande variabilidade de condicionantes.

Na análise de fadiga por meio do LAS, para a mistura ensaiada foi possível observar que para o nível de 2,5% de deformação o valor de N_f é bem mais elevado, o aumento do nível de deformação faz com que os ciclos até a ruptura reduzam expressivamente. Contudo, deve-se salientar que a análise de fadiga por meio do LAS é para o ligante asfáltico, e pode não apresentar correspondência com o comportamento das misturas asfálticas. Além disso, a análise é feita por meio da rigidez, e a fadiga depende de vários outros fatores.

O ensaio cíclico de fadiga à tração-compressão uniaxial foi realizado com sucesso, permitindo satisfatoriamente a identificação da ruptura e a obtenção do número de ciclos. Nessa pesquisa não foram obtidas as curvas características do dano, contudo por meio do ensaio, por ser cíclico, ao aplicar a metodologia S-VECD é possível obter parâmetros de fadiga. Por meio dos estudos realizados pode-se concluir que a grande vantagem do modelo S-VECD é não depender de variáveis que interferem na vida de fadiga, e assim apresenta grande potencial simulando condições reais.

REFERÊNCIAS

Ali, Y. Irfran, M.; Ahmed, S.; Khanzada, S.; Mahmood, T. (2016) Investigation of factors affecting dynamic modulus and phase angle of various asphalt concrete mixtures. *Materials and Structures*, v. 49, p. 857–868.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 4791**: Standard Test Method for Flat Particles, Elongated Particles, or Flat and Elongated Particles in Coarse Aggregate. Estados Unidos, 2010.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 5821**: Standard Test Method for Determining the Percentage of Fractured Particles in Coarse Aggregate. Estados Unidos, 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 1252**: Standard Test Methods for Uncompacted Void Content of Fine Aggregate (as Influenced by Particle Shape, Surface Texture, and Grading) (Withdrawn 2015). Estados Unidos, 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 2041**: Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures. Estados Unidos, 2011.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO TP 62**: Determining modulus of hot mix asphalt (HMA). Estados Unidos, 2009.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO TP 101**: Standard method of test for estimating fatigue resistance of asphalt binders using the linear amplitude sweep. Test Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing. Washington, DC, 2012.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO TP 107**: Standard Method of Test for Determining the Damage Characteristic Curve of Asphalt Mixtures from Direct Tension Cyclic Fatigue Tests. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16018**: Misturas asfálticas – Determinação da rigidez por compressão diametral sob carga repetida. Rio de Janeiro, 2011.

ASOCIACIÓN MERCOSUR NORMALIZACIÓN. **NM 30**: Agregado miúdo - Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro. 2001.

ASOCIACIÓN MERCOSUR NORMALIZACIÓN. **NM 52**: Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro. 2009.

ASTM D6373-16 Standard Specification for Performance Graded Asphalt Binder, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.

BERNUCCI, L.L.B.; MOTTA, L.M.G.; CERATTI, J.A.P.; SOARES, J. B. Pavimentação asfáltica - Formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: PETROBRAS/ABEDA, 2010.

BOEIRA, F. D. (2018) **Estudo da rigidez, da deformação permanente e da fadiga de misturas asfálticas com ligantes convencionais e modificados**. Tese (doutorado) em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria- RS.

BRITO, L. A. T.; Ceratti, J. A. P.; VICTORINO, D. R. (2008) Indicadores do desempenho de misturas asfálticas através do ensaio de compressão diametral. *Revista Transportes*, v. XVI, n. 1, p 36-44.

CARVALHO, J.R. (2018). **Estudo do comportamento do asfalto modificado com óleo de girassol visando à obtenção de misturas mornas**. Dissertação (mestrado) em

Engenharia Civil e Ambiental. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande – PB.

DANIEL, J. S.; KIM, Y. R. Development of a Simplified Fatigue Test and Analysis Procedure Using a Viscoelastic Continuum Damage Model. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, v. 71, p. 619–650, 2002.

DE CEZARO JUNIOR, T. Estudo das Propriedades Mecânicas de Misturas Asfálticas Convencionais e Modificadas. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre. 2008.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT - ME 086**: Agregado – Determinação do índice de forma. Norma rodoviária. Rio de Janeiro – RJ, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT - ME 054**: Equivalente de areia. Norma rodoviária. Rio de Janeiro, 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT - ME 035**: Agregados – Determinação da Abrasão Los Angeles. Norma rodoviária. Rio de Janeiro – RJ, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT - ME 083**: Agregados – Análise granulométrica – Método de ensaio. Norma rodoviária. Rio de Janeiro, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 136 ME** Pavimentação Asfáltica - Misturas Asfálticas – Determinação da resistência à tração por Compressão Diametral. Rio de Janeiro, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT- PRO 199**: Redução de amostra de campo de agregados para ensaio de laboratório. Norma rodoviária. Rio de Janeiro, 1996.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 095**: Cimentos asfálticos de petróleo - Especificação de material. Rio de Janeiro, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT - ME 031**: Pavimentos Flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de Serviço. Norma rodoviária. Rio de Janeiro, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES. **DNIT ES 031**: Pavimentos Flexíveis – Concreto asfáltico. Norma rodoviária. Rio de Janeiro-RJ, 2006b.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES. **DNIT ME 183**: Pavimentação asfáltica - Ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 081** Agregados - Determinação da Absorção e da Densidade de Agregado graúdo. Rio de Janeiro, 1998.

DUARTE, E. V. DE N. (2018) **Avaliação reológica de ligante asfáltico 50/70 modificado com polímero reativo e nãoreativo associado ao ácido polifosfórico**. Dissertação (mestrado) em Engenharia Civil e Ambiental. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande – PB.

JUNOR TADEU, C. (2008). **Estudo das Propriedades Mecânicas de Misturas Asfálticas Convencionais e Modificadas**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul Escola de Engenharia/UFRGS.

KIM, Y.R. **Modeling of Asphalt Concrete**. North Carolina: McGraw-Hill Professional, 2009. 460p

MANGIAFICO, S. (2014) **Linear viscoelastic properties and fatigue of bituminous mixtures produced with Reclaimed Asphalt Pavement and corresponding binder blends.** Tese de Doutorado. l'École Nationale des Travaux Publics de l'État.

MELLO, L. G. R. A. (2008) **Teoria do Dano em Meio Contínuo no Estudo da Fadiga em Misturas Asfálticas.** Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, Brasília-DF.

MERIGHI, C. F. (2015) **Estudo do comportamento de misturas asfálticas mornas em revestimentos de pavimento com adição de borracha moída de pneu.** Dissertação de Mestrado – Universidade de São Paulo. São Paulo-SP.

MOCELIN, D. M. (2018) **Avaliação do comportamento à fadiga de misturas asfálticas quentes e mornas através do modelo de dano contínuo viscoelástico.** Dissertação (mestrado) em Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS.

MORILHA JUNIOR, A. **Estudo sobre a ação de modificadores no envelhecimento dos ligantes asfálticos e nas propriedades mecânicas e de fadiga das misturas asfálticas.** Dissertação de mestrado, Programa de Engenharia Civil, UFSC, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil, 165f, 2004.

NASCIMENTO, L. A. H. do. **Implementation and Validation of the Viscoelastic Continuum Damage Theory for Asphalt Mixture and Pavement Analysis in Brazil.** Dissertação (Doutorado em filosofia) - Faculty of North Carolina State University. Transportation Materials. Raleigh, North Carolina – USA, 2015.

MORAES, T. M. R. de (2018). **Utilização da cera de carnaúba como aditivo redutor de temperaturas de usinagem e compactação de misturas asfálticas.** Dissertação (mestrado) em Engenharia Civil e Ambiental. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande– PB.

RODRIGUES, I. A. (2018) **Análise do dano em mistura de agregados finos (MAF).** Dissertação (mestrado). Universidade de Brasília, Brasília-DF.

ROSSATO, F. P. (2015) **Avaliação do fenômeno de fadiga e das propriedades elásticas de misturas asfálticas com diferentes ligantes em variadas temperaturas.** Dissertação (mestrado) de Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria-RS.

SCHUSTER, S. L. (2018) **Estudo do comportamento à fadiga de misturas asfálticas aplicadas em campo por meio da teoria viscoelástica de dano contínuo.** Dissertação (mestrado) em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria-RS.

TANGELLA, S. C. S. R.; CRAUS, J.; DEACON, J. A.; MONISMITH, C. L. Summary Report on Fatigue Response of Asphalt Mixtures. Prepared for Strategic Highway Research Program, Project A-003-A. Institute of Transportation Studies, University of California, Berkeley, 1990.

UNDERWOOD, B. S.; BAEK, C.; KIM, Y. R. Simplified Viscoelastic Continuum Damage Model as Platform for Asphalt Concrete Fatigue Analysis. Transportation Research Record N° 2296 – *Journal of the Transportation Research Board*, Washington, DC. p. 35-45, 2012.

XIE, Z.; SHEN, J. Fatigue Performance of Rubberized Stone Matrix Asphalt by a Simplified Viscoelastic Continuum Damage Model. *Journal of Materials in Civil Engineering*. out. 2015.