

IAG456-01-2013
DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À FADIGA DE MISTURAS
ASFÁLTICAS COM DIFERENTES TIPOS DE LIGANTES
ASFÁLTICOS E AGREGADOS
DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA DE MEZCLAS
ASFÁLTICAS CON DIFERENTES TIPOS DE LIGANTES ASFÁLTICOS
Y AGREGADOS.

Leonardo Santana Cavalcanti
Asfálticos Consultoria Ltda.
Santa Isabel, Brasil
leoengrj@yahoo.com.br

Luis Miguel Gutiérrez Klinsky
CCR NovaDutra
Santa Isabel, Brasil
luis.gutierrez@grupoccr.com.br

Valéria Cristina de Faria
CCR NovaDutra
Santa Isabel, Brasil
valeria.faria@grupoccr.com.br

Sandra Oda
Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)
Rio de Janeiro, Brasil
sandraoda@poli.ufrj.br

Rodrigo Maluf Barella
Asfálticos Consultoria Ltda.
Santa Isabel, Brasil
asfalticos@asfalticos.com.br

Resumen

Los parámetros usualmente resultantes de los métodos convencionales de dosificación de mezclas asfálticas no siempre posibilitan la selección de la mezcla óptima o más adecuada para determinado proyecto, debido a la falta de correspondencia directa entre los parámetros utilizados en la dosificación y los defectos que el revestimiento asfáltico presentará en pista, particularmente, con relación a la fatiga. El objetivo de este trabajo es obtener parámetros que permitan prever la vida de fatiga de revestimientos asfálticos utilizando el método de ensayo de fatiga con ruptura a velocidad controlada y el método de ensayo de fatiga por flexión de viga apoyada en cuatro puntos. Este estudio evaluó cuatro tipos de asfaltos: un asfalto convencional con penetración 30-45dmm; un asfalto modificado con residuo de llantas; un asfalto modificado con polímero y un asfalto modificado con 7,5% de polímero SBS. Los agregados pétreos utilizados fueron provenientes de dos fuentes comúnmente usadas en la Carretera Presidente Dutra BR-116. También fueron empleadas tres granulometrías densas para componer el concreto asfáltico: SUPERPAVE (CA 9,5mm e 12,5mm) y una denominada

DERSA-Faixa III. Los resultados del ensayo de fatiga con velocidad controlada mostraron que las mezclas asfálticas con el asfalto modificado con 7,5% de polímero SBS fueron las que presentaron vida de fatiga más elevada, en comparación con las mezclas con otros asfaltos. Fue evidente que el tipo de asfalto utilizado en la mezcla influencia directamente en la vida de fatiga. Sin embargo, no hubo una buena correlación con los resultados obtenidos en el ensayo de fatiga de viga a flexión; en ese ensayo se comprobó la influencia del tipo de asfalto utilizado y que el porcentaje de asfalto también influye en los resultados de vida de fatiga.

Resumo

Os parâmetros usualmente obtidos nos métodos convencionais de dosagem das misturas asfálticas nem sempre possibilitam que seja feita uma escolha otimizada com relação ao tipo de mistura mais adequado a um determinado projeto, em vista da falta de uma correspondência direta entre esses parâmetros e os defeitos que a camada de revestimento apresentará no campo, particularmente, a resistência à fadiga. O objetivo desse trabalho é obter os parâmetros que permitam a previsão da vida de fadiga de revestimentos asfálticos utilizando o método de ensaio de fadiga de ruptura com velocidade controlada e fadiga de viga de quatro pontos. Nesse trabalho foram avaliados quatro tipos de ligantes asfálticos (CAP 30/45, CAP modificado com borracha, CAP modificado com polímero 60/85 e CAP HiMA (*Highly Modified Asphalt*, com 7,5% de SBS)) e agregados de duas pedreiras utilizados em obras de pavimentação da Rodovia Presidente Dutra BR-116. Além disso, serão avaliados três tipos de misturas densas com faixas granulométricas: duas faixas de concreto asfáltico SUPERPAVE (CA 9,5 mm e 12,5 mm) e uma faixa DERSA - Faixa III. Os resultados obtidos no ensaio de fadiga de ruptura com velocidade controlada mostram que as misturas com o CAP HiMA (*Highly Modified Asphalt*) apresentaram maior vida de fadiga quando comparadas com os outros ligantes asfálticos e ficou evidente a influência do tipo de ligante asfáltico na resistência à fadiga. No entanto, não houve uma relação com os resultados de fadiga de 4 pontos, cujos resultados mostraram que além do tipo ligante asfáltico, o teor também influencia na vida de fadiga.

INTRODUÇÃO

A Concessionária que administra a Rodovia Presidente Dutra BR-116 tem adotado várias tecnologias em suas obras de reconstrução e manutenção. O uso de técnicas aplicadas na Europa e Estados Unidos tem sido um *benchmarking* para experiências no Brasil visando maior desempenho, conforto e segurança; aliado ao menor custo de manutenção das rodovias. Entretanto, devido às particularidades de clima e materiais encontrados no Brasil, algumas tecnologias podem apresentar resultados aquém do esperado. Sabe-se também que as condições climáticas, controle de qualidade de execução e o comportamento dos diferentes materiais podem interferir no tempo de vida útil de uma via e que, portanto, o desempenho de determinado material não é uma constante. Diante do exposto e com intuito de se executar serviços de melhor qualidade, a Concessionária que administra a Rodovia Presidente Dutra vem obtendo parâmetros através de pesquisas com instituições renomadas como a Universidade Federal do Rio de Janeiro e Universidade de São Paulo, além de ensaios realizados no seu próprio Centro de Pesquisas Rodoviárias. Estes dados permitem a previsão de desempenho de revestimentos asfálticos, para selecionar materiais do ponto de vista técnico-econômico.

O presente artigo é parte de um estudo do comportamento à fadiga de misturas asfálticas mais frequentemente aplicadas pela concessionária, assim como algumas que foram aplicadas em

trechos experimentais e que ainda estão sendo monitorados. A pesquisa está sendo realizada no Centro de Pesquisas Rodoviárias da Concessionária que administra a Rodovia Presidente Dutra BR-116, por meio de dois métodos de previsão de fadiga: Fadiga de ruptura com velocidade controlada e o consagrado ensaio de fadiga de 4 pontos, muito utilizado na área de engenharia de materiais.

ENSAIOS DE FADIGA DE MISTURAS ASFÁLTICAS

Fadiga de Velocidade Controlada

A prensa de compressão diametral é o equipamento utilizado para realização do ensaio de fadiga de velocidade controlada com algumas adaptações para permitir a leitura da deformação e controle de velocidade de aplicação da força, os quais são parâmetros utilizados no cálculo da estimativa de tempo de vida útil relacionado à fadiga.

A ruptura de um sólido se dá pela exaustão da energia de ligação interna do material, decorrente do trabalho efetuado pelas cargas externas. No caso das misturas asfálticas, esta energia de ligação está associada diretamente à coesão que o ligante asfáltico adiciona à matriz de agregados (Rodrigues, 2000). Uma expressão geral da velocidade de perda de energia de ligação W_R do material é dada pela chamada equação cinética abaixo e todo o seu desenvolvimento está detalhado em Rodrigues (2000):

$$\frac{dW_R}{dt} = \frac{-1}{\eta} \frac{\sigma^n}{W_{R0}^{n-2}} \quad (1)$$

Onde:

W_{R0} = energia de ligação inicial, do material sem fadiga; t = tempo; σ = tensão aplicada; n = expoente da lei de fadiga (função da temperatura) e η = viscosidade dissipativa da mistura (função da temperatura e do tempo de aplicação de carga).

Fadiga de Viga de Quatro Pontos

O ensaio de flexão de viga apoiada em quatro pontos tem sido muito utilizado na engenharia de materiais para se estimar a vida de fadiga. A área naval, aeroespacial, ortopedia e estruturas em geral têm lançado mão deste mecanismo de avaliação por se garantir que no terço central seja desenvolvida flexão pura, isto é, momento constante e esforço cortante nulo, (ver Figura 1). Este estado de carregamento é de interesse já que a resistência à fadiga da mistura asfáltica é essencialmente sua capacidade de resistir à flexão sem fratura. Portanto, este ensaio é eficiente para caracterizar as propriedades de fadiga de misturas asfálticas (Wu et al, 2009).

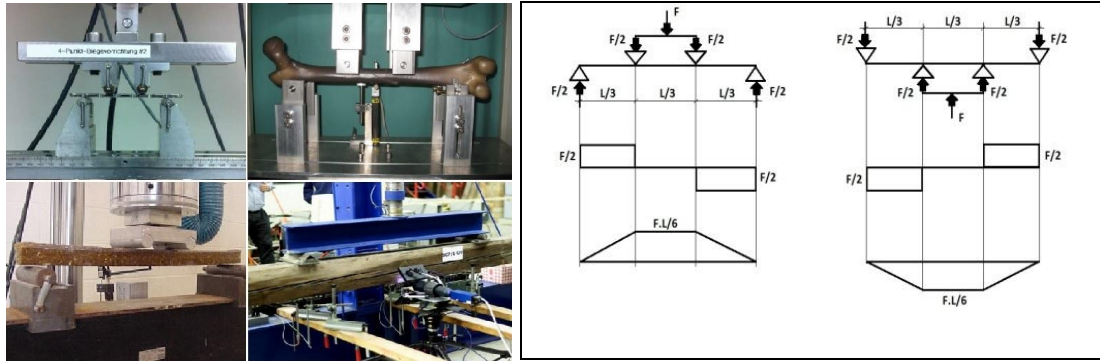


Figura 1: Aplicação do ensaio de fadiga de 4 pontos em diversas áreas da engenharia (LIN *et al.*, 2013; KAISER *et al.*, 2011; BURGUEÑO *et al.*, 2003; FRANKE *et al.*, 2003) e diagramas de esforços da viga

A norma da *American Association of State Highways and Transportation Officials* (AASHTO T321-07) e a norma da *American Society for Testing and Materials* (ASTM D 7460-08) descrevem o ensaio de flexão de viga apoiada em 4 pontos para avaliar a fadiga de misturas asfálticas. Essas normas definem o parâmetro de rigidez à flexão da viga como sendo a relação entre a tensão máxima de tração e a deformação máxima da viga, conforme equação a seguir.

$$S = \frac{\sigma_t}{\varepsilon_t} \quad (2)$$

Onde: S = Rigidez à flexão da viga; σ_t = Tensão aplicada e ε_t = Deformação.

A rigidez é o parâmetro utilizado para se definir a condição de fadiga da viga. A norma da AASHTO define o fim do ensaio quando a rigidez da viga se reduz a 50% da rigidez inicial, enquanto que a ASTM recomenda o valor de 40%. Esta redução de rigidez é atribuída às microfissuras que evoluem durante o processo de aplicação de ciclos de cargas (Adhikari e You, 2010).

A frequência de aplicações de cargas estabelecida nessas normas para o ensaio é de 5Hz a 10Hz e a temperatura recomendada é de 20°C, entretanto os equipamentos permitem a variação destes parâmetros, facilitando uma análise mais aprofundada dos materiais e permitindo a avaliação em situações bem diferentes de clima e tráfego.

Há vários modelos para se estimar a vida de fadiga de uma amostra de mistura asfáltica. O mais simples é baseado apenas na deformação ou na tensão, conforme equações 3 e 4, respectivamente:

$$N_f = K_1 \cdot \frac{1}{\varepsilon_t^{K_2}} \quad (3)$$

$$N_f = K_1 \cdot \frac{1}{\sigma_t^{K_2}} \quad (4)$$

Onde: N_f = Vida de fadiga – Números de ciclos até 50% ou 40% da rigidez inicial; ε_t = Deformação; σ_t = Tensão aplicada e K_1 e K_2 = Coeficientes.

Os corpos de prova (CPs) utilizados neste ensaio são vigas com 380 ± 6 mm de comprimento,

63 ± 6mm de largura e 50 ± 6mm de altura. Os CPs foram condicionados por pelo menos 2 horas para evitar a influência da variação da temperatura no resultado do ensaio.

MATERIAIS E MÉTODOS

Os agregados utilizados foram coletados de duas fontes, uma no Estado de São Paulo (SP) e a outra no Estado do Rio de Janeiro (RJ). Em todas as misturas foi utilizado 1,5% de Cal Hidratada tipo 1 como fíler e melhorador de adesividade. Os ligantes asfálticos ou cimento asfáltico de petróleo (CAP) utilizados foram: a) CAP 30/45; b) CAP modificado modificado com borracha; c) CAP 60/85 modificado com polímero; d) CAP HiMA com 7,5% de SBS (*Styrene Butadiene Styrene*). O método de dosagem empregado foi o Marshall com a seleção de três faixas granulométricas: duas do Superpave (CA 9,5 mm e 12,5 mm) e uma correspondente a Faixa III da Companhia de Desenvolvimento Rodoviário S.A. (DERSA) do Governo do Estado de São Paulo. Os projetos de misturas contemplaram todas as combinações possíveis de agregados, ligantes asfálticos e faixas granulométricas.

Caracterização dos Ligantes

A caracterização dos ligantes foi realizada por meio dos ensaios convencionais conforme Resoluções 019/2005, 031/2007 e 039/2008 da Agência Nacional de Petróleo (ANP), as quais especificam as características dos ligantes asfálticos convencionais, modificados com polímero e modificados com borracha, respectivamente. Na Tabela 1 constam os resultados dos ensaios realizados nos ligantes asfálticos utilizados neste estudo.

Tabela 1: Caracterização de ligantes

Características	Unidades	Resultados			
		30/45	Borracha	60/85	HiMA
Densidade	g/dm ³	1,013	1,031	1,006	1,011
Visc. Brookfield -135°C, 20 rpm	cP	505	-	1998	1685
Viscosidade Brookfield a 150°C	cP	244	-	859	690
Viscosidade Brookfield a 177°C *Ensaio realizado a 175°C.	cP	85	1845*	268	229
Penetração (100g, 5s, 25°C)	0,1mm	33	41	51	40
Ponto de Amolecimento (<i>Pa</i>)	°C	54	62	62	72
Recuperação Elástica por torção	%	-	68	60	63,5

Caracterização dos Agregados

Os agregados foram caracterizados segundo a sua granulometria, densidade real, densidade aparente e abrasão Los Angeles (Brita 1 e pedrisco). Na Tabela 2 são mostrados os resultados dos ensaios de agregados do Rio de Janeiro e de São Paulo.

Tabela 2: Caracterização dos Agregados

Parâmetros		Rio de Janeiro			São Paulo		
		Brita 1	Pedrisco	Pó de Pedra	Brita 1	Pedrisco	Pó de pedra
Densidades	Real	2,805	2,822	2,853	2,661	2,662	2,662
	Aparente	2,764	2,756	2,837	2,635	2,623	2,629
Abrasão Los Angeles		46,5	46,4	-	34,3	34,3	-

Características das Misturas Asfálticas

Para a dosagem das misturas asfálticas foi utilizada o método Marshall com energia de compactação de 75 golpes, para volume de vazios de 4%. A Figura 2 mostra as curvas granulométricas das misturas.

A combinação das duas fontes de agregados, os quatro tipos de ligantes asfálticos e as três faixas granulométricas originou 24 misturas asfálticas, na Tabela 3 é apresentada a identificação utilizada para cada mistura asfáltica. Nas Tabelas 4 e 5 é apresentado um resumo com os parâmetros volumétricos e a resistência à tração obtidos na dosagem de cada mistura asfáltica.

Figura 2: Curvas granulométricas das faixas utilizadas

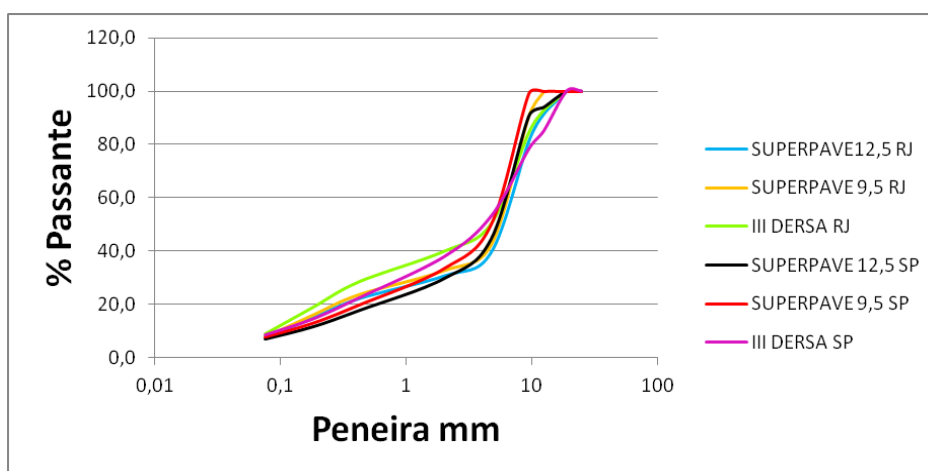


Tabela 3: Identificação das misturas conforme os materiais constituintes

Mistura	CAP	Faixa Granulométrica	Pedreira de origem	Mistura	CAP	Faixa Granulométrica	Pedreira de origem
P1	30/45	SUPERPAVE 12,5mm	RJ	P13	30/45	SUPERPAVE 12,5mm	SP
P2	Borracha	SUPERPAVE 12,5mm	RJ	P14	Borracha	SUPERPAVE 12,5mm	SP
P3	60/85	SUPERPAVE 12,5mm	RJ	P15	60/85	SUPERPAVE 12,5mm	SP
P4	HiMA	SUPERPAVE 12,5mm	RJ	P16	HiMA	SUPERPAVE 12,5mm	SP
P5	30/45	SUPERPAVE 9,5mm	RJ	P17	30/45	SUPERPAVE 9,5mm	SP
P6	Borracha	SUPERPAVE 9,5mm	RJ	P18	Borracha	SUPERPAVE 9,5mm	SP
P7	60/85	SUPERPAVE 9,5mm	RJ	P19	60/85	SUPERPAVE 9,5mm	SP
P8	HiMA	SUPERPAVE 9,5mm	RJ	P20	HiMA	SUPERPAVE 9,5mm	SP
P9	30/45	III DERSA	RJ	P21	30/45	III DERSA	SP
P10	Borracha	III DERSA	RJ	P22	Borracha	III DERSA	SP
P11	60/85	III DERSA	RJ	P23	60/85	III DERSA	SP
P12	HiMA	III DERSA	RJ	P24	HiMA	III DERSA	SP

Tabela 4: Parâmetros de dosagem das misturas com agregados oriundos da pedreira Pombal

Parâmetros	Misturas											
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12

Teor ótimo em peso de asfalto adicionado (AASHTO R-35)	4,9%	5,4%	4,7%	4,6%	4,8%	5,6%	4,7%	4,8%	5,0%	5,7%	4,9%	5,0%
Absorção de asfalto pelo agregado (AASHTO R-35)	4,6%	5,1%	4,4%	4,3%	4,5%	5,3%	4,4%	4,5%	4,8%	5,4%	4,7%	4,7%
Densidade máxima da mistura (sem vazios)	2,587	2,564	2,584	2,590	2,583	2,555	2,586	2,583	2,577	2,555	2,579	2,580
Teor de vazios de ar (Va %) (AASHTO R-35)	4,0	4,1	3,9	4,0	3,9	4	4,1	3,9	4,2	4,1	4,1	4,1
Vazios do agregado mineral (VAM %) (AASHTO M-323)	14,8	16,2	14,6	14,5	14,9	16,7	14,9	14,9	15,8	17,1	15,6	15,6
Vazios cheios de asfalto (VCA %) (AASHTO M-323)	73,0	74,7	73,4	72,8	73,9	75,7	72,6	73,6	73,7	75,9	73,6	73,7
Resistência a tração por compressão diametral (mPa) DNIT ME138 - ASTM C 496	2,4	1,6	1,7	2,1	2,4	1,7	1,9	2,3	2,0	1,6	2,0	2,3
Relação filler / ligante (AASHTO M-323)	1,5	1,3	1,6	1,6	1,7	1,5	1,8	1,7	1,8	1,6	1,9	1,9

Tabela 5: Parâmetros de dosagem das misturas com agregados oriundos da pedreira Jambeiro

Parâmetros	Misturas											
	P13	P14	P15	P16	P17	P18	P19	P20	P21	P22	P23	P24
Teor ótimo em peso de asfalto adicionado (AASHTO R-35)	4,6%	5,6%	4,6%	4,7%	4,8%	5,6%	5,1%	5,0%	4,5%	5,3%	4,6%	4,6%
Absorção de asfalto pelo agregado (AASHTO R-35)	4,3%	5,3%	4,3%	4,4%	4,5%	5,3%	4,8%	4,7%	4,3%	5,0%	4,3%	4,3%
Densidade máxima da mistura (sem vazios - Rice)	2,461	2,429	2,460	2,455	2,453	2,431	2,442	2,445	2,474	2,450	2,469	2,470
Teor de vazios de ar (Va %) (AASHTO R-35)	4,3	4,3	4,5	4,6	4,0	4,0	4,4	4,4	3,9	4,1	4,2	4,0
Vazios do agregado mineral (VAM %) (AASHTO M-323)	14,3	16,4	14,6	14,9	14,6	16,1	15,6	15,3	13,9	15,6	14,4	14,2
Vazios cheios de asfalto (VCA %) (AASHTO M-323)	70,2	73,6	69,0	69,1	72,5	75,0	71,6	71,5	72,1	73,8	70,9	71,8
Resistência a tração por compressão diametral DNIT ME138 - ASTM C 496	2,0	1,5	1,6	2,0	2,2	1,7	1,7	2,0	2,5	1,7	1,9	2,4
Relação filler / ligante (AASHTO M-323)	1,7	1,3	1,7	1,6	1,7	1,5	1,6	1,6	2,0	1,7	2,0	2,0

Moldagem dos Corpos de Prova e Execução dos Ensaios de Fadiga

Fadiga de Velocidade Controlada

Este ensaio possui a grande vantagem de permitir a obtenção de corpos de prova de forma simples e rápida, pois são utilizadas as dimensões dos corpos de prova Marshall, os quais podem ser obtidos por meio de todos os compactadores disponíveis e também extraídos do campo. Para este trabalho, os corpos de prova foram moldados com o uso do compactador Marshall. Além da facilidade da moldagem, o ensaio de fadiga de velocidade controlada também é executado de maneira bem mais rápida do que o ensaio de fadiga de quatro pontos.

Foram moldados 3 corpos de prova de cada mistura, os quais foram submetidos à aplicação de cargas com três velocidades diferentes. O ensaio é realizado a 25°C na prensa de compressão diametral, onde são lidas as cargas de ruptura e deslocamento. Estes dados alimentam o *software* chamado Fadiga 2.0 que gera vários dados tais como o K_1 e K_2 utilizados no modelo de fadiga e que permitem o traçado das curvas de fadiga. Cabe destacar que a evolução do ensaio de fadiga de velocidade controlada é realizado da mesma forma que o ensaio de resistência à tração, com diferentes velocidades de aplicação de carga, e não como os ensaios de fadiga de vigas apoiadas em quatro pontos e o ensaio de fadiga por compressão diametral cíclica, cujos corpos de prova são submetidos a pulsos de cargas. O *software* Fadiga 2.0 também fornece o parâmetro N_f , o qual varia de acordo com a deflexão esperada do

pavimento e que é considerado no programa como um dos dados de entrada.

Fadiga de quatro pontos

A moldagem das vigotas utilizadas para o ensaio de fadiga de quatro pontos requer mais tempo e mais cuidado do que a de fadiga de velocidade controlada, além da necessidade do uso de mais equipamentos. O compactador utilizado para a moldagem das vigas utiliza o princípio do amassamento e gera prismas de 45cm de comprimento, 15cm de largura e altura entre 14,5cm e 18,5cm. Estes prismas permitem a extração de 4 vigotas que são obtidas por serragem de alta precisão.

Foram ensaiadas nove vigotas de cada mistura utilizando o princípio da deformação controlada, cujos valores adotados foram: 300 $\mu\epsilon$, 450 $\mu\epsilon$ e 600 $\mu\epsilon$. Embora estas deformações sejam bem maiores do que as usualmente desenvolvidas em campo, as normas sugerem valores entre 200 $\mu\epsilon$ e 800 $\mu\epsilon$. Um dos motivos pode ser o grande tempo de execução do ensaio quando utilizadas deformações muito pequenas, já que, dependendo da temperatura e frequência adotadas, o ensaio de uma única vigota pode durar meses.

A temperatura e frequência adotadas para o ensaio também foram as estabelecidas pelas normas: 20°C \pm -0,5 e frequência de 10Hz, embora se saiba que para as condições brasileiras tais valores deveriam ser revistos. As normas permitem a variação da frequência entre 5Hz e 10Hz. O equipamento permite essa variação de frequência, assim como dispõe de uma câmara ambiental que permite a variação da temperatura entre -14°C e 60°C.

O *software* utilizado para aquisição de dados foi o UTS015 que fornece diversos dados, dentre eles a rigidez à flexão da viga, que é o parâmetro utilizado para determinação de fadiga da viga. A cada segundo também são obtidos: deflexão da viga, deformação, energia dissipada, carga aplicada e módulo de elasticidade.

RESULTADOS

A Figura 3 mostra as curvas de fadiga obtidas com os resultados do ensaio de compressão diametral estático com velocidade controlada. Os dados obtidos no *software* Fadiga 2.0 foram utilizados para traçar essas curvas o que permitiu realizar comparações com os resultados do ensaio de fadiga de viga apoiada em 4 pontos. Nessas curvas foram utilizadas as mesmas deformações, ou seja 300 $\mu\epsilon$, 450 $\mu\epsilon$ e 600 $\mu\epsilon$.

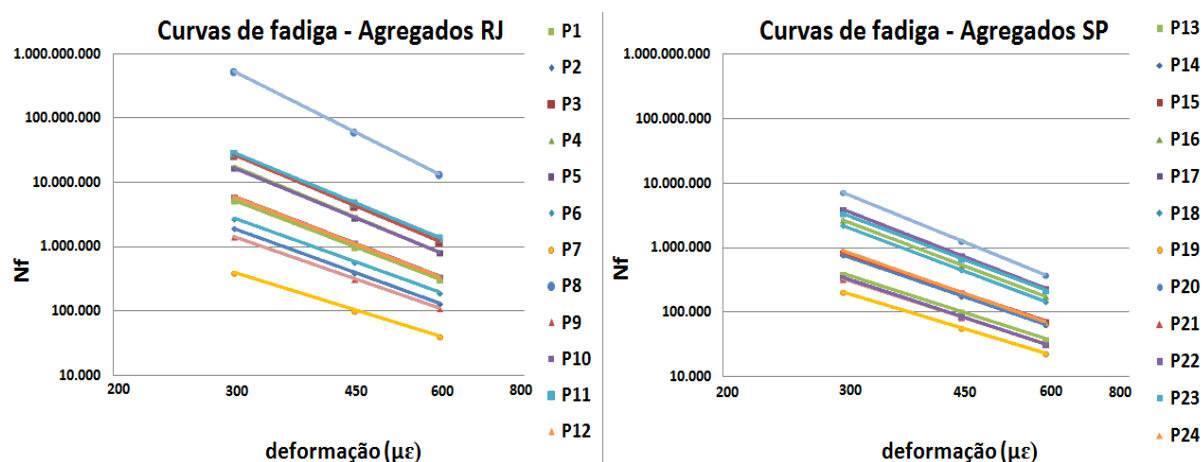


Figura 3: Curvas de fadiga obtidas por meio do ensaio de velocidade controlada.

As curvas de fadiga das misturas asfálticas produzidas tanto com os agregados de São Paulo quanto com os agregados do Rio de Janeiro mostram que aquelas com CAP HiMA (P8 e P20) foram as que apresentaram melhor desempenho. Já a misturas asfáltica P7 e P19 foram as que apresentaram menor vida de fadiga. De modo geral, nota-se na Figura 3 que as misturas asfálticas que utilizaram agregados do Rio de Janeiro obtiveram desempenho superior, quando comparadas com as misturas asfálticas com agregados de São Paulo. Esse comportamento demonstra que os agregados também influem na vida de fadiga.

As curvas de vida de fadiga obtidas pelo ensaio de flexão de viga apoiada em quatro pontos foram traçadas para apenas oito misturas asfálticas: P9, P10, P11, P12, P21, P22, P23 e P24 e são apresentadas na Figura 4 com seus respectivos modelos de fadiga.

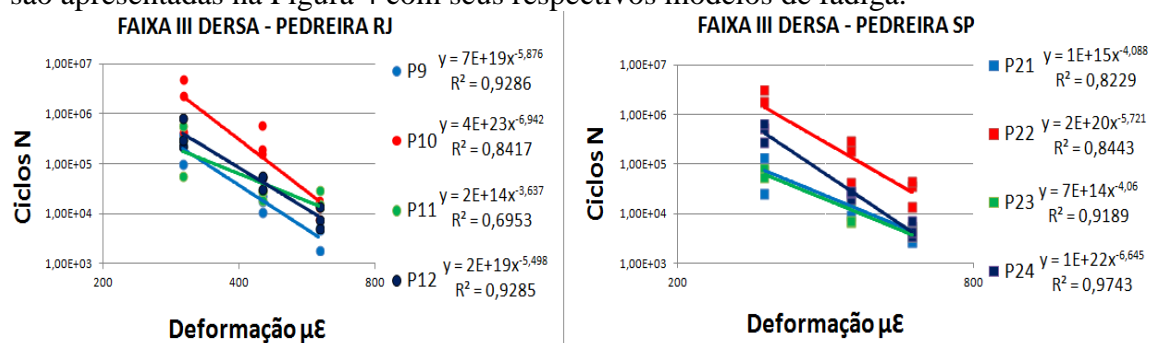


Figura 4: Curvas de fadiga e respectivos modelos gerados após ensaios de fadiga de quatro pontos das misturas P9, P10, P11, P12, P21, P22, P23 e P24

As curvas de fadiga obtidas por meio do ensaio de flexão de viga apoiada em quatro pontos mostraram que as misturas com o asfalto borracha (P10 e P22) apresentaram comportamentos superiores às outras. Já as misturas asfálticas P9 e P23, foram as que apresentaram menor vida de fadiga. Quanto às misturas produzidas com o CAP HiMA notou-se um comportamento incomum, já que para menores deformações as misturas apresentaram um comportamento similar ao obtido nas misturas com asfalto borracha, entretanto, para deformações maiores seu comportamento aproximou-se àquele observado nas misturas asfálticas com os outros ligantes asfálticos. Vale notar que, as misturas asfálticas com asfalto borracha são as de maior teor de ligante e, conseqüentemente, as de menor relação fíler/asfalto, o que contribuiu para um comportamento superior, como foi igualmente constatado por Bardini (2013). Ressalta-se também que nas misturas asfálticas P21, P23 e P24 notou-se certa segregação durante a moldagem das vigotas, fato não percebido na mistura P22 e nas que foram utilizados os agregados da pedra do Estado do RJ.

Na figura 5 são mostrados os gráficos com a média dos valores de rigidez à flexão das misturas asfálticas P09, P10, P11, P12, P21, P22, P23 e P24. O que permite visualizar que as misturas asfálticas com CAP30/45 são as mais rígidas e que as misturas asfálticas com asfalto borracha são as mais flexíveis, o que ajuda a explicar seus comportamentos à fadiga.

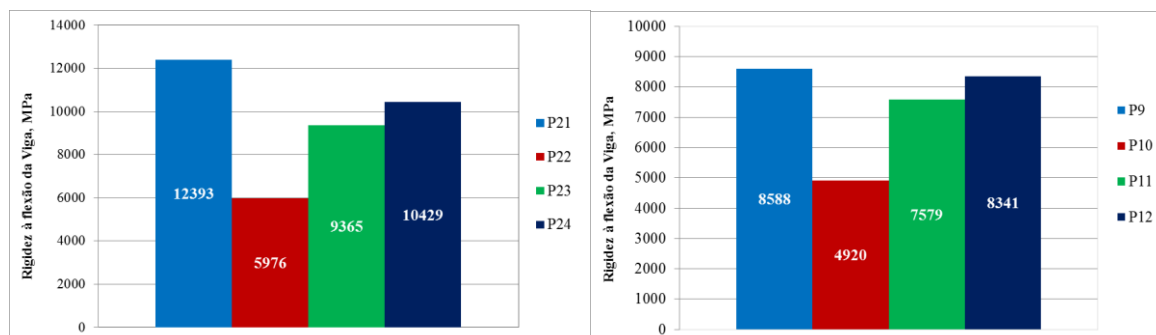


Figura 5: Média da rigidez à flexão sob 20°C e 10Hz

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Não se identificou uma relação direta entre os resultados obtidos no ensaio de fadiga de velocidade controlada com os resultados obtidos no ensaio de fadiga de quatro pontos. Os diferentes modos de compactação, temperatura, modo de aplicação da carga e a garantia de flexão pura no ensaio de fadiga de quatro pontos podem ser fatores que influenciaram na divergência dos resultados.

Os resultados de fadiga obtidos no ensaio de flexão de vigas apoiadas em quatro pontos mostraram que o tipo e o teor de ligante asfáltico influenciaram diretamente na vida de fadiga. Observou-se que as misturas asfálticas com maior rigidez, preparada com CAP 30/45, apresentaram baixas vidas de fadiga. Já as misturas preparadas com asfalto borracha apresentaram menor rigidez à flexão e maior vida de fadiga.

As misturas asfálticas com agregados do Rio de Janeiro tiveram maior resistência à fadiga do que as misturas asfálticas com agregados de São Paulo, tanto nos resultados do ensaio de velocidade controlada quanto nos resultados do ensaio de flexão de viga apoiada em quatro pontos. Assim, verifica-se que a origem dos agregados é também influente na resistência à fadiga das misturas asfálticas.

É importante ressaltar que, para selecionar a mistura asfáltica ideal para determinada condição, estes resultados devem ser complementados com ensaios de fadiga realizados em diferentes frequências e temperaturas e também com ensaios de deformação permanente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adhikari, S.; You, Z. *Fatigue Evaluation of Asphalt Pavement using Beam Fatigue Apparatus*, The Technology Interface Journal, Volume 10, Nº3, ISSN # 1523-9926, Spring 2010.
- Bardini, V. S. S. *Influência do Fíler Mineral em Propriedades de Misturas Asfálticas Densas*. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-graduação de Engenharia de Transportes – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2013.
- Burgueño, R.; Mohanty, A.; Misra, M.; Quagliata, M. J. and Mehta G. (2003) *Development and Characterization of Biocomposite Beams and Panels for Load-Bearing Components*. Civil and Environmental Engineering. Michigan State University.
- Franke, B.; Hujer, S.; Rautenstrauch, K. (2003) *Strain Analysis of solid wood and*

glued laminated timber constructions by close range photogrammetry. International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering 2003 – NDT-CE 2003.

- Kaiser, M.M.; Zachert, G.; Wendlandt, R.; Rapp, M.; Eggert, R.; Stratmann, C.; Wessel, L.M.; Schulz, A. P. and Kienast, B.J. (2011) *Biomechanical analysis of a synthetic femoral spiral fracture model: Do end caps improve retrograde flexible intramedullary nail fixation.* Journal of Orthopaedic Surgery and Research.
- Lin, A.; Fechter, C.; Magill, M.; Wipf, F.; Moore, T.; Guldberg, R. (2013) *The Effect of Contouring on Fatigue Resistance of Reconstruction Plates.*
- Rodrigues, R. M. (2000) *A Model for Fatigue Cracking Prediction of Asphalt Pavements based on Mixture Bonding Energy.* The International Journal of Pavement Engineering, Nottingham - UK, v.1, n.2, p.133-149.
- Wu, R.; Tsai, B. W.; Harve, J.; Ullidtz, P.; Basheer, I.; Holland, J. *Using Four-Point Bending Tests in Calibration of the California Mechanistic-Empirical Pavements Design System.* 2^o Workshop on Four Bending Point, University of Minho, ISBN 978-972-8692-42-1, 2009