

Avaliação comparativa de propriedades mecânicas de misturas asfálticas simples e compostas

Comparative evaluation of the mechanical properties of simple and composite asphalt mixtures

DOI:10.34117/bjdv7n8-579

Recebimento dos originais: 07/07/2021

Aceitação para publicação: 25/08/2021

Cássio Alberto Teoro do Carmo

Doutor em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Viçosa - UFV (2019)

Coordenador Técnico-Comercial na Huesker Ltda

Endereço: Av. Miguel Damha, 1400 – São Carlos, São Paulo – CEP: 13.565-251

E-mail: cassiocarmo@gmail.com

Geraldo Luciano de Oliveira Marques

Doutor em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio de Janeiro / COPPE (2004)

Docente da Universidade Federal de Juiz de Fora – UFJF

Endereço: UFJF, Fac. de Eng., Dep. de Transportes e Geotecnia, 4ª Plataforma, Juiz de Fora, Minas Gerais - CEP: 36.036-900

E-mail: geraldo.marques@ufjf.edu.br

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi investigar o efeito das propriedades mecânicas das misturas asfálticas compostas e correspondentes respostas estruturais no desempenho de um pavimento flexível. Para tanto, foram realizadas simulações com os softwares de análise de sistemas elásticos de múltiplas camadas, ELSYM5, *me*-PADS (v1.1) e o AEMC/MeDiNa 2018, visando à obtenção das respostas estruturais referentes às deformações na superfície do pavimento flexível e as tensões nas fibras inferiores das camadas asfálticas em cada um dos programas. Um programa experimental foi desenvolvido combinando um ligante asfáltico (CAP 50/70), uma composição de agregados minerais de origem gnáissica e dois métodos de dosagem (Marshall e Superpave) e os ensaios de módulo de resiliência, resistência à tração por compressão diametral e fadiga por compressão diametral à tensão controlada. Dos resultados obtidos, concluiu-se que as misturas asfálticas compostas apresentaram valores de módulo de resiliência e resistência à tração menores do que os das misturas asfálticas simples da faixa granulométrica C e maiores do que o da faixa granulométrica B, para ambos os métodos de dosagem. Das análises computacionais realizadas, conclui-se que as misturas asfálticas Marshall não apresentaram variações significativas quanto aos níveis de tensões horizontais e deslocamentos verticais dentro de um mesmo programa computacional. Por outro lado, as tensões horizontais determinadas com os programas computacionais analisados, para as misturas asfálticas Superpave apresentaram variações em sua magnitude, o que não ocorreu com os deslocamentos verticais que apresentaram uma similaridade em cada programa utilizado.

Palavras-chave: Misturas asfálticas, Respostas estruturais, Análise de sensibilidade, Marshall, Superpave, Elysym5, *me*-PADS, AEMC/MeDiNa.

ABSTRACT

The objective of this work was to investigate the effect of the mechanical properties of the asphalt mixtures and corresponding structural responses on the performance of a flexible pavement. For this purpose, simulations were carried out with the analysis software of multi-layer elastic systems, ELSYM5, me-PADS (v1.1) and AEMC / MeDiNa 2018, aiming at obtaining the structural responses regarding the deformations on the flexible pavement surface and the stresses in the lower fibers of the asphalt layers in each of the programs. An experimental program was developed combining an asphalt binder (CAP 50/70), a composition of mineral aggregates of gneissic origin and two dosing methods (Marshall and Superpave) and the tests of resilience module, tensile strength by diametrical compression and fatigue by diametrical compression at controlled tension. From the results obtained, it was concluded that the composite asphalt mixtures presented values of modulus of resilience and tensile strength lower than those of simple asphalt mixtures of the granulometric range C and greater than that of the granulometric range B, for both dosage methods. From the computational analyzes carried out, it was concluded that Marshall asphalt mixtures did not show significant variations in terms of horizontal stress levels and vertical displacements within the same computer program. On the other hand, the horizontal stresses determined with the analyzed computer programs, for the Superpave asphalt mixtures presented variations in their magnitude, which did not occur with the vertical displacements that presented a similarity in each program used.

Keywords: Asphalt mixes, Structural responses, Sensitivity analysis, Marshall, Superpave, Elsym5, me-PADS, AEMC/MeDiNa.

1 INTRODUÇÃO

A qualidade dos pavimentos asfálticos é bastante influenciada pelo tipo de revestimento utilizado. No Brasil, seja para situações de tráfego leve, seja para rodovias de tráfego pesado, são utilizados predominantemente os pavimentos com revestimentos asfálticos. Diferentes misturas asfálticas podem ser empregadas, sendo geralmente variada a granulometria e o tipo de ligante asfáltico utilizado.

Outros fatores que também influenciam o desempenho dos pavimentos asfálticos são: (i) o método de projeto da mistura asfáltica; (ii) o método de dimensionamento; (iii) amplitudes de solicitações de tráfego; (iv) influências climáticas (temperatura e umidade); (v) condições de drenagem das estradas; (vi) técnicas construtivas e (vii) qualidade dos materiais empregados na estrutura da via. Com relação aos métodos de projeto de misturas asfálticas, existem vários, como, por exemplo, os métodos Marshall e Superpave. Segundo Al-Humeidawi (2016), o método Marshall, até o momento, é o mais utilizado em vários países. Esse método é baseado puramente em experiências empíricas e tem várias limitações na verificação do efeito quanto ao tráfego e suas propriedades mecânicas no desempenho do pavimento. O método Marshall é o mais utilizado nos países de clima tropical para o projeto de misturas asfálticas (ASI, 2007; Ahmad et al.,

2012). O método Superpave foi desenvolvido no ano de 1993 pelo *Strategic Highway Research Program* (SHRP) com o objetivo de desenvolver melhoramentos quanto aos métodos de ensaios e especificações para ligantes e misturas asfálticas sob uma abordagem de desempenho que considerasse a influência de fatores ligados ao carregamento, ao clima e à forma de compactação em campo (NCHRP, 2011; ASI, 2007).

Em um dimensionamento adequado, espera-se que a estrutura do pavimento seja projetada de modo a evitar que os valores admissíveis de qualquer um dos índices, que estimem o dano acumulado ou suas condições de serventia, sejam atingidos prematuramente (FRANCO; MOTTA, 2009). Os métodos mecânicos de projeto de pavimentos fazem uso da teoria das camadas elásticas para simular os carregamentos a que estes pavimentos estarão submetidos e estimar as tensões e deformações atuantes sobre a estrutura do pavimento à qual tais carregamentos serão aplicados (LOULIZI; AL-QADI; ELSEIFI, 2006, SPECHT et al., 2017). Assim, conhecer as relações tensão-deformação dos materiais constituintes do pavimento é de fundamental importância para o seu dimensionamento (GIGANTE; FURLAN; FABBRI, 2006).

Diante da relevância dos aspectos previamente mencionados, é importante destacar que há uma carência na literatura técnico-científica quanto à avaliação do eventual efeito da utilização de corpos de prova compostos das misturas asfálticas à quente das faixas granulométricas C e B, da especificação de serviço ES 031 (DNIT, 2006b), no mesmo corpo de prova, visto que esta pode promover alterações nas propriedades mecânicas de engenharia da camada de revestimento asfáltico resultante e, conseqüentemente, em seu desempenho estrutural comparativamente às propriedades das misturas asfálticas separadas inicialmente previsto. Neste contexto o objetivo principal desta pesquisa foi realizar uma análise de sensibilidade para investigar o efeito das propriedades mecânicas (módulo de resiliência, resistência à tração por compressão diametral e fadiga por compressão diametral a tensão controlada) das misturas asfálticas compostas e correspondentes respostas estruturais do pavimento flexível adotado, sob condições específicas de carregamento. Adicionalmente, mas em caráter secundário, objetivou-se fazer uma avaliação estrutural do pavimento flexível adotado calcada nos conceitos da Mecânica dos Pavimentos, através de três programas computacionais, *Elsym5 (Elastic Layered Symmetrical)*, *me-PADS (Mechanistic Empirical Pavement Analysis and Design Software)* e *AEMC/MeDiNa (Análise Elástica de Múltiplas Camadas)*.

O programa Elsym5 foi desenvolvido na Universidade da Califórnia em Berkeley em 1985 (KOPPERMAN; TILLER; TSENG, 1986). Este programa possibilita que o carregamento do sistema elástico seja constituído por até dez cargas iguais, situadas em pontos quaisquer da superfície do pavimento. O programa Elsym5 aplica as hipóteses básicas relativas à elasticidade linear de meios estratificados, com a solução das equações de Burmister ampliada para cinco camadas e utiliza o método de diferenças finitas (MEDINA; MOTTA, 2015). O me-PADS é um programa Sul Africano desenvolvido em 2001, que também está baseado na teoria elástica linear de múltiplas camadas. O carregamento é constituído por até dez cargas, situadas em pontos quaisquer da superfície do pavimento e é utilizado para cinco camadas do pavimento (MAINA; OZAWA, MATSUI, 2012).

O AEMC/MeDiNa-2018 é um programa de análise de camadas elásticas que calcula as tensões e deformações em estruturas de pavimento com até oito camadas sob carregamento de rodas para diversos eixos rodoviários, desenvolvido originalmente para o SisPav por Filipe Augusto Cinque de Proença Franco. A estrutura geral de cálculo utiliza a integração de Gauss-Laguerre nos cálculos das equações integrais (DNIT, 2018).

Sendo assim, o objetivo geral deste trabalho foi investigar o efeito das propriedades mecânicas das misturas asfálticas compostas em relação as misturas simples e correspondentes respostas estruturais no desempenho de um pavimento flexível adotado, comparando os três softwares de análise de sistemas elásticos de múltiplas camadas, ELSYM5, *me-PADS* (v1.1) e o AEMC/MeDiNa 2018.

2 MATERIAIS E METODOS

O programa experimental deste estudo foi conduzido de forma a permitir uma análise da sensibilidade estrutural de um determinado pavimento asfáltico (estrutura do pavimento de referência), com o auxílio dos softwares Elsym5 (*Elastic Layered Symmetrical*), *me-PADS* (*Mechanistic Empirical Pavement Analysis and Design Software*) e AEMC/MeDiNa (Análise Elástica de Múltiplas Camadas).

2.1 MATERIAIS

Nesta pesquisa utilizaram-se os agregados minerais (brita 1, brita 0 e pó de pedra), de formação gnáissica de jazida localizada na Microrregião de Viçosa, Estado de Minas Gerais, Brasil.

O cimento asfáltico de petróleo convencional (CAP 50/70) foi fornecido por uma empresa privada e oriundo da Refinaria Gabriel Passos (REGAP), localizada no Município de Betim, Estado de Minas Gerais, Brasil.

2.2 MÉTODOS

2.2.1 Análise granulométrica dos agregados minerais

As análises granulométricas dos agregados minerais graúdos e miúdos foram determinadas conforme o método de ensaio ME-083 (DNER, 1998), e se enquadraram na especificação de serviço ES-031 (DNIT, 2006) para as misturas asfálticas dosadas pelo método Marshall, enquanto que para as misturas asfálticas dosadas pelo método Superpave foram adotadas as seguintes normas técnicas: AS-95-003 (FHWA, 1994), A-407 (SHRP, 1994) e R 35 (AASHTO, 2014).

Na Figura 1, têm-se as curvas granulométricas da faixa de serviço C, para as misturas asfálticas 1 e 3, e na Figura 2 são apresentadas as curvas granulométricas da faixa de serviço B, para as misturas asfálticas 2 e 4.

Figura 1: Curvas granulométricas estudadas para a faixa granulométrica C para as misturas asfálticas 1 e 3.

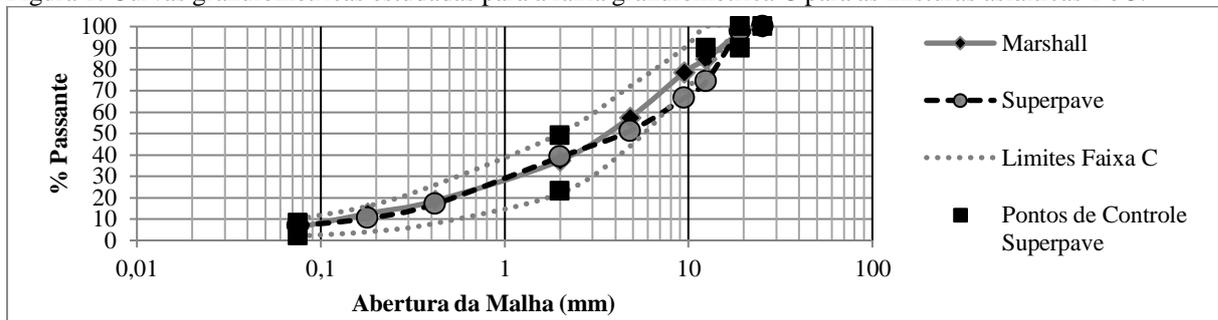
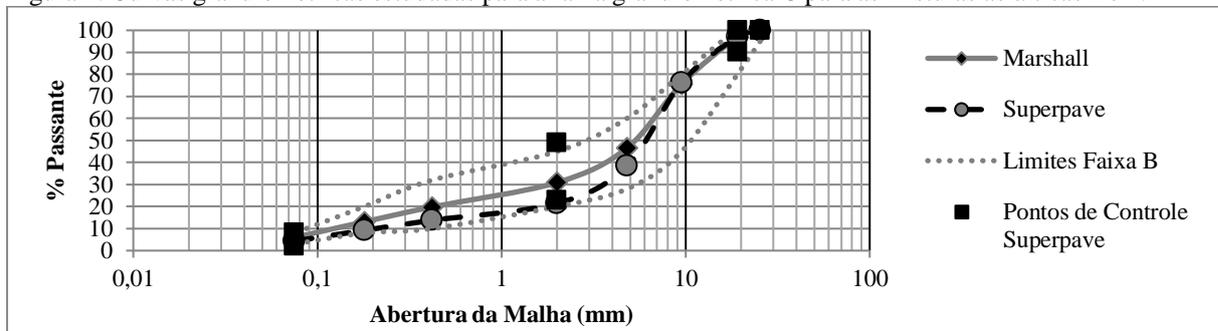


Figura 2: Curvas granulométricas estudadas para a faixa granulométrica C para as misturas asfálticas 2 e 4.



2.2.2 Dosagem de misturas asfálticas

Nesta pesquisa utilizaram-se quatro composições granulométricas contínuas para as misturas asfálticas densas de projeto, sendo duas enquadradas na faixa granulométrica C e duas na faixa granulométrica B, da especificação de serviço ES-031 (DNIT, 2006). As misturas asfálticas das composições granulométricas 1 e 2 foram dosadas pelo método Marshall, conforme o método de ensaio D6926 (ASTM, 2016), utilizando-se 75 golpes por face e inserem-se nas faixas granulométricas C e B, respectivamente. As composições granulométricas das misturas asfálticas 3 e 4 foram dosadas pelo método Superpave (Nível 1), conforme as recomendações AS-95-003 (FHWA, 1994), A-407 (SHRP, 1994) e R 35 (AASHTO, 2014), aplicando-se 100 giros no compactador giratório Superpave e, também, estão inseridas nas faixas granulométricas C e B, respectivamente, de modo que as composições granulométricas atendem ao critério estabelecido nas normas técnicas supracitadas quanto ao tamanho nominal máximo (TNM) de 19,0mm.

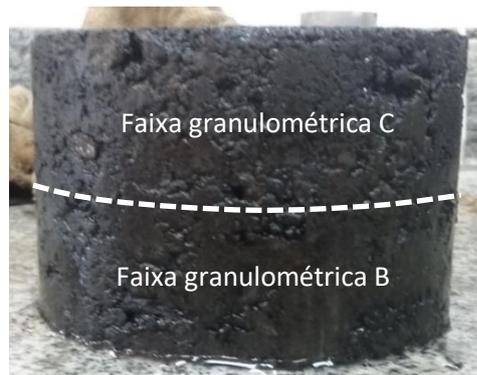
2.3 MOLDAGEM DO CORPOS DE PROVA

Após a determinação dos teores de ligante de projeto das respectivas misturas asfálticas segundo as especificações de cada um dos métodos de dosagem utilizados, foram produzidos corpos de prova com seis configurações. As misturas asfálticas das composições granulométricas 1, 2 e CM (Composta Marshall) moldadas segundo as especificações do método Marshall, inserem-se nas faixas granulométricas C, B e composta (metade do corpo de prova na faixa granulométrica C e a outra metade na faixa granulométrica B), respectivamente. As misturas asfálticas 3, 4 e CS (Composta Superpave) produzidas conforme a especificação do método Superpave (Nível 1), também são inseridas nas faixas granulométricas C, B e composta (metade do corpo de prova na faixa granulométrica C e a outra metade na faixa granulométrica B).

Figura 1 – Corpos de prova moldados no compactador Marshall: (a) corpo de prova moldado na faixa granulométrica C e (b) corpo de prova composto moldado nas faixas granulométricas C e B.



(a)



(b)

2.4 ANÁLISE ESTRUTURAL DO PAVIMENTO FLEXÍVEL ADOTADO

A análise estrutural do pavimento flexível adotado nesta pesquisa foi realizada para uma estrutura pré-dimensionada empiricamente. Para tanto, foram consideradas as combinações das faixas granulométricas de projeto C (capa asfáltica) e B (binder) da especificação de serviço ES 031 (DNIT, 2006b) e os diferentes métodos de dosagens utilizados, Marshall e Superpave.

Com o auxílio do software Elsym5, *me*-PADS e AEMC/MeDiNa-2018, foram realizadas análises de sensibilidade da variação do módulo de resiliência das misturas asfálticas estudadas para três níveis de carregamento, a saber, 80 kN, 98kN e 118kN, adotando-se um pavimento construído de capa asfáltica, binder, base e reforço do subleito, assentado sobre o subleito. Os dados de entrada utilizados nesse software foram: propriedades das camadas estruturais (espessura, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson), localização e magnitude das cargas e coordenadas dos pontos para a determinação das respostas estruturais esperadas do pavimento flexível adotado.

Para os dados de entrada referentes às camadas do pavimento flexível adotado, considerou-se o módulo de resiliência (MR) igual ao módulo de elasticidade (E), ou seja, foi realizada uma análise elástica linear. Segundo Ponte et al. (2014), quando não há possibilidade de se determinar o coeficiente de Poisson, recomenda-se a utilização de $\nu=0,30$, o qual foi mantido constante para as camadas asfálticas (capa asfáltica e binder) e granular (base) em todas as análises realizadas.

A escolha dos níveis de carregamento teve por base as seguintes considerações:

- Q1 igual a 80 kN (8,2 tf): carga correspondente ao eixo padrão de 18.000 lb, considerada baixa;

- Q2 igual a 98 kN (10,0 tf): carga máxima permitida pela legislação brasileira para eixo simples de rodas duplas;

- Q3 igual a 118 kN (12,0 tf): carga com 20% acima da máxima permitida, sendo 10% o limite de tolerância legal. Adotou-se a carga de 20% acima da permitida para mostrar os danos nas estradas pavimentadas quando há excesso de carga por eixos de veículos comerciais.

Da mesma forma, foram utilizados três níveis correspondentes de pressão de enchimento de pneus, quais sejam:

- P1 igual a 563 kPa (80 psi): pressão-padrão utilizada na pista experimental da AASHTO de 1958 a 1961 e normalizada para a determinação da deflexão, conforme o método de ensaio ME 024 (DNER, 1994), que tem sido adotada em diversos métodos de dimensionamento de pavimentos flexíveis;

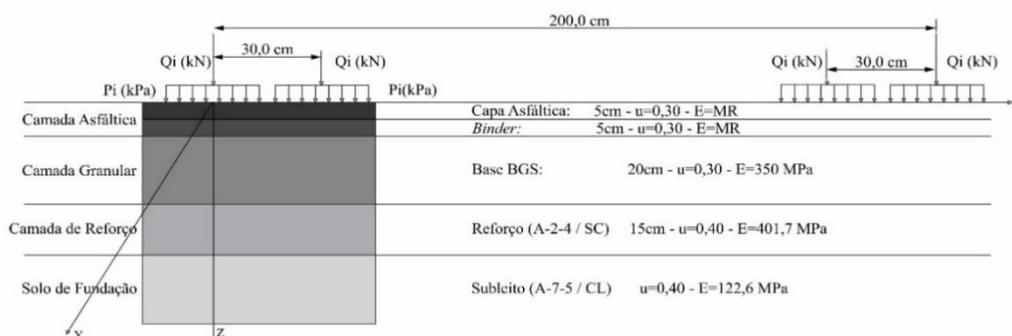
- P2 igual a 633 kPa (90 psi): pressão considerada média;

- P3 igual a 703 kPa (100 psi): pressão considerada alta.

A Figura 2 ilustra o pavimento flexível adotado para a análise das tensões e deformações em alguns pontos de sua camada e o carregamento em eixo simples com duas rodas aplicado na sua superfície.

As características dos materiais utilizados nas camadas do subleito, reforço do subleito e base foram extraídas do estudo de Carmo et al. (2019). Pode-se observar, na Figura 2, que a camada asfáltica é constituída pela capa asfáltica (faixa granulométrica C) e binder (faixa granulométrica B). No entanto, neste estudo, também foi analisada a estrutura do pavimento flexível formada pela combinação das propriedades mecânicas das duas faixas granulométricas C e B, denominada camada composta, como pode ser observado na Tabela 1 (CM = camada composta Marshall e CS = camada composta Superpave).

Figura 2 – Pavimento flexível adotado nas análises estruturais.



3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste item, são apresentados os parâmetros volumétricos das dosagens Marshall e Superpave, os resultados dos ensaios mecânicos realizados e da análise estrutural do pavimento flexível adotado, variando-se os valores do módulo de resiliência das camadas de capa asfáltica e binder, correspondentes a cada um dos cenários de variação do teor de ligante de projeto.

3.1 PROPRIEDADES DAS MISTURAS ASFÁLTICAS DAS DOSAGENS MARSHALL E SUPERPAVE

Na Tabela 1, são apresentados os parâmetros volumétricos das misturas asfálticas estudadas em seus respectivos teores de ligante asfáltico de projeto, além de dados mecânicos de Estabilidade e Fluência Marshall para esses teores.

Tabela 1 – Parâmetros volumétricos e mecânicos (Estabilidade e Fluência Marshall) dos corpos de prova moldados nos teores de ligante asfáltico de projeto.

	Composição Asfáltica					
	1	2	CM ⁽¹⁾	3	4	CS ⁽²⁾
Método de compactação	Marshall			Superpave		
Faixa granulométrica	C	B	C e B	C	B	C e B
Teor de projeto (%)	4,70	4,20	C = 4,70 B = 4,20	4,60	4,85	C = 4,60 B = 4,85
Vv (%)	4,19	4,49	4,65	4,28	4,75	3,97
RBV (%)	75,99	70,39	70,03	75,14	71,43	74,40
VAM (%)	15,23	14,71	15,53	15,55	16,48	15,52
Estabilidade (kgf)	524,45	535,34	559,12	867,68	854,93	1.039,32
Fluência (mm)	3,50	1,20	4,20	4,81	4,70	5,19
Capacidade de Suporte Marshall (kgf/mm)	149,84	446,12	133,12	180,39	181,90	200,25
Massa específica aparente (g/cm ³)	2,478	2,480	2,470	2,473	2,458	2,468
DMT (g/cm ³)	2,572	2,593	C = 2,580 B = 2,601	-	-	-
Gmm (g/cm ³)	-	-	-	2,588	2,569	C = 2,588 B = 2,569

⁽¹⁾CM = camada composta Marshall e ⁽²⁾CS = camada composta Superpave

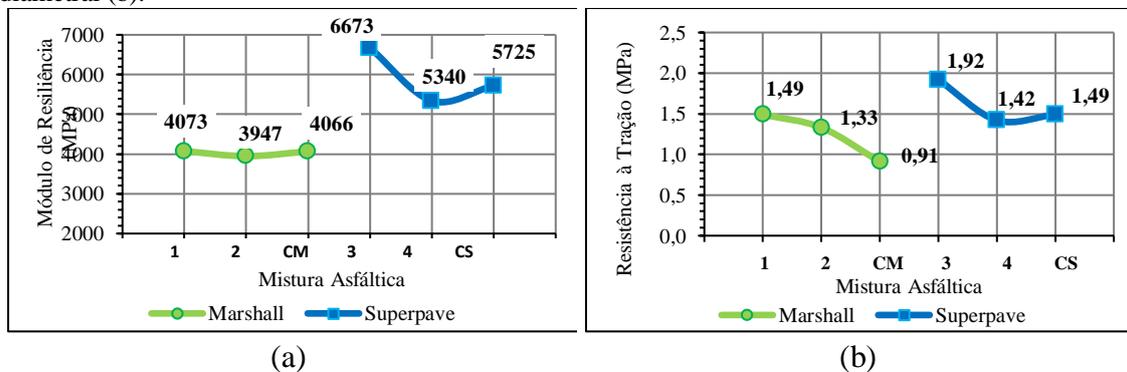
Observa-se, na Tabela 1, que o teor de ligante asfáltico da mistura asfáltica da faixa granulométrica C obtido pela dosagem Marshall é maior que o obtido pela dosagem

Superpave. Esta constatação também foi verificada por Karini; Golias; Schwartz (2012), Jitsangiam; Chindaprasirt; Nikraz (2013), Han; Wei; Zhang (2016). Já para as misturas asfálticas que se enquadraram na faixa granulométrica B, o teor de ligante asfáltico dosado pelo método Superpave foi maior do que o obtido pelo método Marshall (4,2% na dosagem Marshall e 4,85% na dosagem Superpave).

3.3.1 Ensaios de Módulo de Resiliência e de Resistência à Tração por Compressão Diametral

Na Figura 3(a), são apresentados os valores dos módulos de resiliência, e na Figura 3(b), os valores de resistência à tração por compressão diametral determinados para as misturas asfálticas ensaiadas. Observa-se que as misturas asfálticas dosadas pelo método Superpave apresentaram maiores valores de módulo de resiliência, evidenciando que, para as particularidades desta pesquisa, o produto final resultante da dosagem e compactação Superpave é mais rígido que o resultado do protocolo Marshall, independente do teor de ligante asfáltico.

Figura 3 – Valores médios de módulo de resiliência (a) e valores de resistência à tração por compressão diametral (b).



Na Tabela 2, são apresentados os valores médios dos módulos de resiliência (MR) e resistência à tração por compressão diametral (RT) determinados para as misturas asfálticas investigadas e as respectivas relações MR/RT. Verifica-se que os valores de módulo de resiliência obtidos para a mistura asfáltica da faixa granulométrica C dosada pelo método Superpave foi 64% maior do que o valor obtido para a mistura dosada pelo método Marshall; e para as misturas da faixa granulométrica B esta diferença foi de 35%, enquanto que para as misturas compostas dosadas pelo método Superpave foi 41% maior que o valor obtido para a mistura composta dosada pelo método Marshall, ou seja, os

valores resultantes para as misturas dosadas pelo método Superpave são em média 50% maiores do que os das misturas asfálticas Marshall.

Tabela 2 – Variação dos valores de módulo de resiliência e resistência à tração por compressão diametral e a relação (MR/RT) para as misturas asfálticas estudadas.

Mistura Asfáltica	Método de Compactação	Teor de Asfalto (%)	Módulo de Resiliência (MPa)	Resistência à Tração (MPa)	Relação MR / RT
1	Marshall	4,70	4073,00	1,49	2734
2		4,20	3947,00	1,33	2968
CM		4,70 e 4,20	4064,11	0,91	4468
3	Superpave	4,6	6672,89	1,92	3475
4		4,85	5340,22	1,42	3761
CS		4,60 e 4,85	5724,50	1,49	3842

Analisando-se separadamente as misturas asfálticas estudadas quanto ao processo de compactação e dosagem é possível verificar que: (i) para as misturas asfálticas dosadas pelo método Marshall verifica-se que o módulo de resiliência da mistura composta CM apresenta uma pequena variação (3%) com relação à mistura asfáltica 2 (faixa granulométrica B), já com relação à mistura asfáltica 1 (faixa granulométrica C) esta variação foi menor que 1% (Figura 3a); (ii) para as misturas asfálticas compactadas pelo compactador giratório Superpave verifica-se que a mistura asfáltica composta CS apresentou um valor de módulo de resiliência 14% menor que o da mistura asfáltica 3 (faixa granulométrica C), já com relação à mistura asfáltica 4 (faixa granulométrica B) o valor deste parâmetro foi 7% maior.

Também analisando as misturas asfálticas estudadas com relação à resistência à tração por compressão diametral (Figura 3b) é possível verificar que: (i) a resistência à tração da mistura asfáltica composta CM foi menor que o encontrado para as outras misturas asfálticas compactadas pelo método Marshall - a mistura composta foi 39% menor que a mistura asfáltica 1 (faixa granulométrica C) e 32% menor que a mistura asfáltica 2 (faixa granulométrica B); (ii) para as misturas asfálticas Superpave, o valor de resistência à tração da mistura composta CS foi 22% menor que a resistência à tração da mistura asfáltica 3 (faixa granulométrica C) e 5% maior que o valor da mistura asfáltica 4 (faixa granulométrica B).

Com relação aos valores de resistência à tração das misturas asfálticas estudadas, pode-se observar, na Tabela 2, que o valor de RT para a mistura da faixa granulométrica

C dosada pelo método Superpave é 29% maior do que o valor de RT da mistura dosada pelo método Marshall. Já para a faixa granulométrica B, o valor de RT para a mistura asfáltica dosada pelo método Superpave é 7% maior do que para o método Marshall. Para a mistura asfáltica composta os valores de RT para a dosagem Superpave foi 64% maior que o valor encontrado para a mistura asfáltica compactada pelo método Marshall.

Segundo Bock et al. (2009), com a relação MR/RT é possível realizar uma avaliação preliminar da vida de fadiga, analisando rigidez e resistência em conjunto das misturas asfálticas. Quanto menor o valor obtido para essa razão, melhor seria o comportamento da mistura. Leite et al. (2000) e Pinheiro, Soares e Leite (2003) sugerem que misturas asfálticas com relação MR/RT da ordem de 3000 apresentam um bom comportamento estrutural, em razão da flexibilidade aliada à resistência à tração e, portanto, maior vida de fadiga.

Nesta pesquisa, as relações MR/RT mais próximas da sugerida pelos autores acima citados foram obtidas para as misturas dosadas e compactadas pelo método Marshall, tanto para a granulometria da faixa C como para a da faixa B.

3.3.2 Ensaio de Fadiga por Compressão Diametral

Na Tabela 3, estão apresentadas as constantes “k1 e k2” das curvas de fadiga para o modelo mostrado na Equação 1 referentes às misturas asfálticas estudadas. A Equação 2 refere-se ao cálculo da diferença de tensões ($\Delta\sigma$).

$$VF = k_1 * \Delta\sigma^{k_2} \quad (1)$$

$$\Delta\sigma = \sigma_x - \sigma_z \quad (2)$$

Em que:

VF: vida de fadiga;

$\Delta\sigma$: diferença de tensões (MPa);

σ_x : σ_h : tensão horizontal;

σ_z : σ_v : tensão vertical;

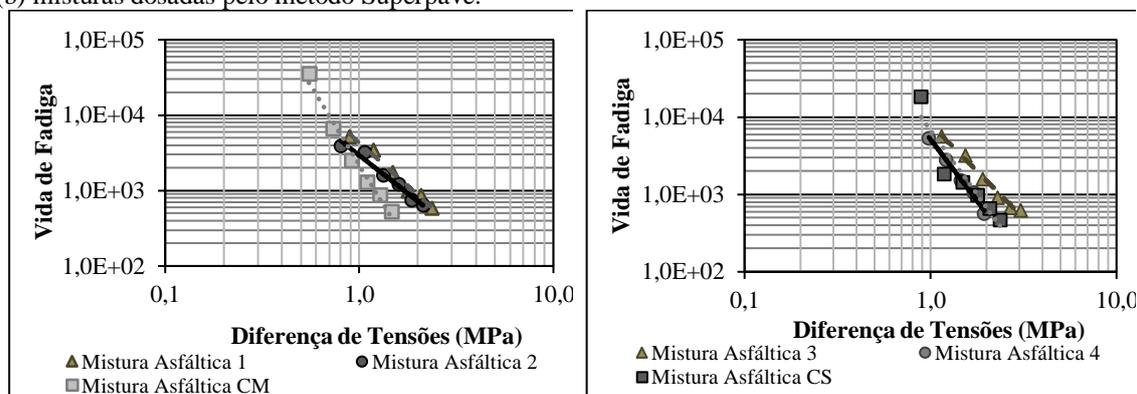
k_1 e k_2 : constantes determinadas nas curvas do ensaio.

Tabela 3 – Parâmetros das curvas de fadiga das misturas asfálticas estudadas.

Mistura Asfáltica	Faixa Granulométrica	Método de Dosagem	Teor de Asfalto (%)	Constantes		R ²
				k ₁	k ₂	
1	C	Marshall	4,70	4292,9	-2,289	0,984
2	B		4,20	2930,0	-2,017	0,969
CM	C e B		4,70 e 4,20	2171,5	-4,213	0,979
3	C	Superpave	4,60	8068,1	-2,422	0,980
4	B		4,85	5153,7	-3,168	0,992
CS	C e B		4,60 e 4,85	6803,4	-3,328	0,881

Na Figura 4(a), têm-se os resultados das curvas de fadiga, expressas em número de repetições de carga, para as misturas asfálticas dosadas pelos métodos Marshall. Analisando-se as misturas asfálticas compactadas pelo método Marshall verifica-se que para valores de diferença de tensões ($\Delta\sigma$) da ordem de 1 MPa a mistura asfáltica composta (CM) foi a que apresentou menor vida de fadiga (VF), isto é, mistura asfáltica 1, $VF=4,3 \times 10^3$, mistura asfáltica 2, $VF=2,9 \times 10^3$, mistura asfáltica CM, $VF=2,2 \times 10^3$. Da mesma forma, para valores mais altos de $\Delta\sigma$ (2 MPa), a mistura asfáltica composta (CM), $VF=1,2 \times 10^2$, foi a que apresentou menor vida de fadiga, mistura asfáltica 1, $VF=8,8 \times 10^2$, mistura asfáltica 2, $VF=7,2 \times 10^2$.

Figura 4 – Curvas de fadiga em função da diferença de tensões ($\Delta\sigma$), (a) misturas dosadas pelo Marshall e (b) misturas dosadas pelo método Superpave.



(a)

(b)

Já na Figura 4(b), têm-se os resultados das curvas de fadiga expressos em número de repetições de carga, para as misturas asfálticas dosadas pelos métodos Superpave. Para as misturas asfálticas dosadas pelo método Superpave, verifica-se que para valores de $\Delta\sigma$ da ordem de 1 MPa, a mistura asfáltica composta (CS), $VF=6,8 \times 10^3$, apresentou valores de vida de fadiga intermediários entre as misturas 3 e 4: a mistura asfáltica 3 apresentou o maior valor $VF=8,1 \times 10^3$ e a mistura asfáltica 4 o menor valor $VF=5,2 \times 10^3$. No entanto,

para valores mais altos de $\Delta\sigma$ (2 MPa), a mistura asfáltica composta (CS), $VF=6,8 \times 10^2$ apresentou o maior valor de Vida de Fadiga que as outras misturas asfáltica do método Superpave, mistura asfáltica 3 ($VF=1,5 \times 10^3$) e mistura asfáltica 4 ($VF=5,7 \times 10^2$).

Observa-se, na Figura 4, que para valores de diferença de tensões ($\Delta\sigma$) da ordem de 1 MPa as misturas asfálticas dosadas e compactadas pelo método Superpave apresentam maiores valores de vida de fadiga (VF), isto é, Mistura Asfáltica 3, $VF=8,1 \times 10^3$, Mistura Asfáltica 4, $VF=5,2 \times 10^3$, e Mistura Asfáltica CS, $VF=6,8 \times 10^3$. Enquanto as misturas asfálticas dosadas pelo método Marshall apresentam os menores valores: Mistura Asfáltica 1, $VF=4,3 \times 10^3$, Mistura Asfáltica 2, $VF=2,9 \times 10^3$, e Mistura Asfáltica CM, $VF=3 \times 10^3$. No entanto, para valores mais altos de $\Delta\sigma$ (2 MPa), as misturas asfálticas simples dosadas pelo método Superpave apresentam os valores intermediários de Vida de Fadiga: a Mistura asfáltica 4 apresenta o menor valor $VF=5,7 \times 10^2$ e a Mistura Asfáltica 3, o maior valor, $VF=1,5 \times 10^3$; enquanto as misturas dosadas pelo método Marshall apresentam valores intermediários: Mistura Asfáltica 1, $VF=8,8 \times 10^2$, e Mistura Asfáltica 2, $VF=7 \times 10^2$. Com relação as misturas asfálticas compostas, a Mistura Asfáltica CM, dosada pelo método Marshall apresentou o menor valor de vida de fadiga ($VF=1,2 \times 10^2$).

É interessante ressaltar que, apesar de as misturas asfálticas dosadas pelo método Marshall apresentarem valores de MR/RT mais próximos do sugerido por Pinheiro, Soares e Leite (2003), os valores de vida de fadiga obtidos nos ensaios de fadiga por compressão diametral dos corpos-de-prova destas misturas não se mostraram superiores aos obtidos para as misturas dosadas pelo método Superpave, cujos valores de MR/RT foram cerca de 20% maiores.

3.3.3 Análise Estrutural do Pavimento Flexível Adotado

Foram realizadas doze análises empírico-mecanísticas para o pavimento flexível adotado, divididas em quatro estruturas (duas utilizando as misturas asfálticas dosadas pelo método Marshall e outras duas utilizando as misturas asfálticas dosadas pelo método Superpave), empregando-se os resultados das propriedades mecânicas das misturas asfálticas previstas no programa experimental, considerando-se três níveis de carregamento e de pressão de enchimento.

As estruturas dos pavimentos são constituídas por camadas asfálticas da seguinte forma:

(i) Pavimento 1 - composto por duas camadas asfálticas: revestimento - mistura asfáltica 1 (faixa granulométrica C) e binder - mistura asfáltica 2 (faixa granulométrica B), ambas dosadas pelo método Marshall;

(ii) Pavimento 2 - composto por uma única camada asfáltica: revestimento + binder, mistura asfáltica composta dosada pelo método Marshall (CM);

(iii) Pavimento 3 - composto por duas camadas asfálticas: revestimento - mistura asfáltica 3 (faixa granulométrica C) e binder - mistura asfáltica 4 (faixa granulométrica B), ambas dosadas pelo método Superpave;

(iv) Pavimento 4 - composto por uma única camada asfáltica: revestimento + binder, mistura asfáltica composta dosada pelo método Superpave (CS);

As análises estruturais do pavimento flexível adotado foram realizadas com o auxílio de três softwares de análise elástica de múltiplas camadas, que são: (i) Elsym5; (ii) me-PADS; e (iii) AEMC/MeDiNa-2018.

3.3.3.1 Análise das tensões horizontais

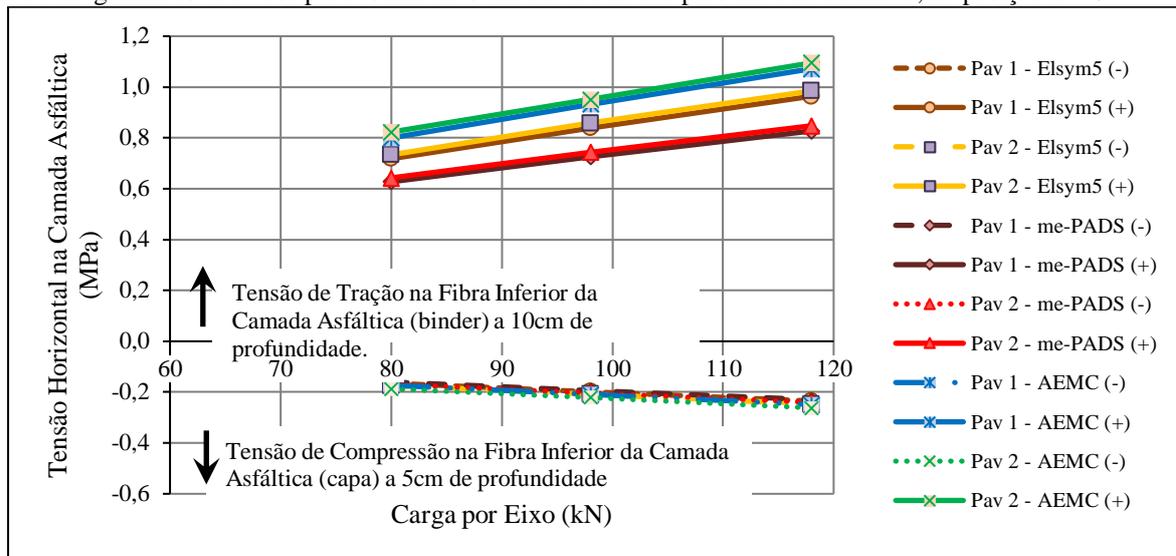
Na Figura 5, são apresentadas as maiores tensões horizontais (σ_h) nas fibras inferiores das camadas asfálticas em função da variação do carregamento e do software de análise para as misturas asfálticas dosadas pelo método Marshall.

Ao analisar as tensões horizontais (σ_h) que ocorrem na fibra inferior da capa asfáltica, obtidas pelos softwares utilizados, verificou-se que estas são de compressão (sinal negativo), indicando que a linha neutra situa-se próxima à interface das duas camadas (capa asfáltica – faixa granulométrica C – e binder – faixa granulométrica B).

Para as tensões horizontais que atuam na fibra inferior da camada de binder, verificou-se que estas são de tração (sinal positivo). Analisando-se estas tensões horizontais, percebe-se que não há uma variação significativa destes valores em função da estrutura do pavimento e também com relação ao software utilizado.

Observa-se na Figura 5 que em cada um dos dois pavimentos asfálticos analisados, as tensões horizontais (σ_h) em cada camada asfáltica variam com o software de análise utilizado. As tensões atuantes na camada asfáltica de rolamento, a 5cm de profundidade, (tensão de compressão) e na camada de binder, a 10cm de profundidade, (tensão de tração) não apresentaram variações significativas na sua magnitude independente do software utilizado.

Figura 5 – Tensões horizontais (σ_h) atuantes na fibra inferior das camadas asfálticas em função dos níveis de carregamentos adotados para as misturas asfálticas dosadas pelo método Marshall, na posição $x = 0$.

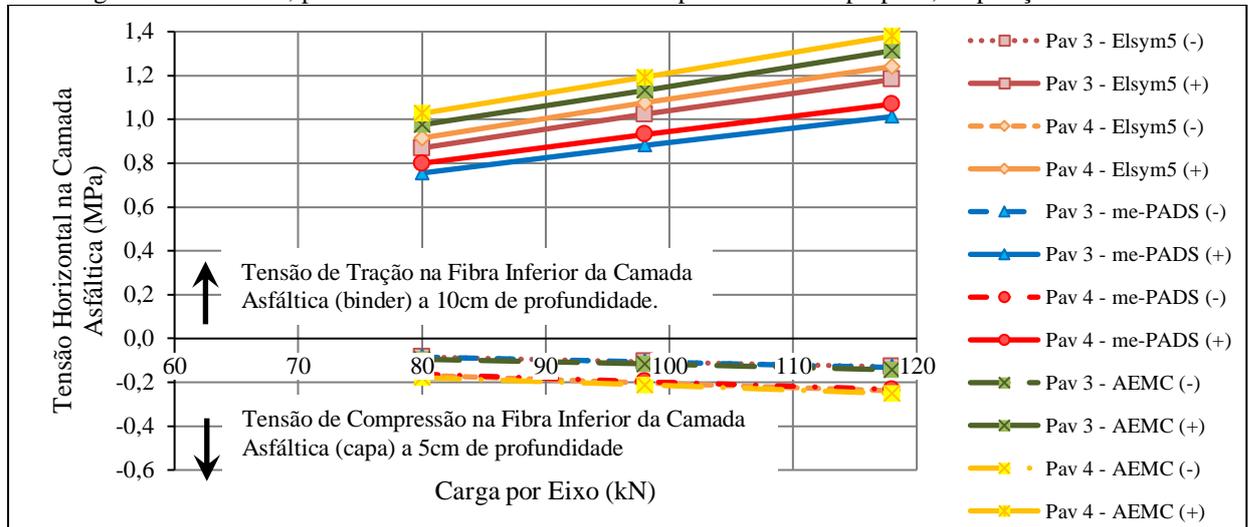


Analisando-se estatisticamente os resultados apresentados na Figura 5, com o auxílio do programa R (*R Development Core Team 2008*), verifica-se que, as tensões horizontais (σ_h) de compressão as retas de regressão não diferem estatisticamente ao nível de 5% de significância independente da configuração do pavimento adotado e do software utilizado para as análises empírico-mecanísticas. Verifica-se ainda, que para um mesmo software, as tensões horizontais (σ_h) de tração não diferem estatisticamente ao nível de 5% de significância nos softwares Elsym5 e me-PADS, ou seja, independente da configuração do pavimento adotado as tensões horizontais de tração não apresentam grandes variações. Este efeito não foi observado na análise com o software AEMC/MeDiNa 2018 para o carregamento de 80 kN, onde a variação foi de 28%, onde a estrutura do pavimento 1, formado com as duas camadas asfálticas separadas (capa asfáltica + binder), apresentou menor tensão horizontal que a estrutura do pavimento 2, formado por apenas uma camada asfáltica composta.

Analisando-se as tensões horizontais (σ_h) de tração que atuam na fibra inferior da camada de binder do pavimento asfáltico adotado, para as condições: misturas asfálticas Marshall, carregamento de 98 kN por eixo e pressão de enchimento dos pneus de 633 kPa, verifica-se que os resultados apresentados no software de análise me-PADS (0,744 MPa) são menores que os apresentados nos outros dois softwares, Elsym5 (0,858 MPa) e AEMC/MeDiNa 2018 (0,951 MPa), porem se analisarmos estatisticamente estas retas de regressão não diferem estatisticamente ao nível de 5% de significância.

A Figura 6, apresenta uma representação gráfica da variação das tensões horizontais (σ_h) atuantes na fibra inferior das camadas asfálticas do pavimento asfáltico adotado, dosadas pelo método Superpave, em função dos carregamentos adotados.

Figura 6 – Tensões horizontais (σ_h) atuantes na fibra inferior das camadas asfálticas em função dos níveis de carregamento adotados, para as misturas asfálticas dosadas pelo método Superpave, na posição $x = 0$.



Ao analisar as tensões horizontais (σ_h), na Figura 6, que ocorrem na fibra inferior da capa asfáltica, obtidas pelos softwares utilizados, verificou-se que estas são de compressão (sinal negativo), indicando que a linha neutra situa-se próxima à interface das duas camadas (capa asfáltica – faixa granulométrica C – e binder – faixa granulométrica B).

Para as tensões horizontais que atuam na fibra inferior da camada de binder, das misturas asfálticas dosadas pelo método Superpave, verificou-se que estas são de tração (sinal positivo). Analisando-as também com o auxílio do programa R (*R Development Core Team 2008*), verifica-se que, as retas de regressão das tensões horizontais não diferem estatisticamente ao nível de 5% de significância em função da estrutura do pavimento e também com relação ao software utilizado. Observa-se que em cada um dos dois pavimentos asfálticos analisados, as tensões horizontais (σ_h) em cada camada asfáltica variam com o software de análise utilizado. As tensões atuantes na camada asfáltica de rolamento, a 5cm de profundidade, (tensão de compressão) e na camada de binder, a 10cm de profundidade, (tensão de tração) não diferem estatisticamente ao nível de 5% de significância independente do software utilizado.

Esta constatação também foi observada para as misturas asfálticas dosadas pelo método Marshall, para o pavimento flexível analisado.

Verifica-se na Figura 6 que, as tensões horizontais (σ_h) de compressão apresentaram variações da ordem de 10%, quando comparados os resultados dos softwares utilizados nas análises empírico-mecanísticas (Elsym5, me-PADS, e AEMC/MeDiNa), para a mesma estrutura do pavimento flexível adotado (3 ou 4). Verifica-se ainda que para o pavimento 3 as menores tensões horizontais de compressão foram determinadas pelo software Elsym5 e as maiores para o AEMC/MeDiNa. Já para o pavimento 4, as menores tensões horizontais de compressão foram determinadas no software me-PADS e as maiores para o AEMC/MeDiNa.

Quando se analisam as estruturas dos pavimentos 3 e 4 em função dos softwares utilizados observa-se que as tensões horizontais de compressão do pavimento 4 (que empregou como módulo de resiliência o resultado obtido para a mistura asfáltica composta) são aproximadamente o dobro das tensões horizontais de compressão do pavimento 3, que utilizou os módulos de resiliência das camadas asfálticas das faixas granulométricas C e B, separadamente.

Analisando-se as tensões horizontais (σ_h) de tração (Figura 6) que atuam na fibra inferior da camada de binder do pavimento flexível adotado, verifica-se que houve uma variação nos níveis de tensões da ordem de 30% entre os resultados dos softwares empregados, para a mesma estrutura do pavimento flexível adotado (3 ou 4). Verifica-se ainda que para o pavimento 3 as menores tensões horizontais de tração foram determinadas pelo software me-PADS e as maiores para o AEMC/MeDiNa, este fato também foi observado para o pavimento 4, onde as menores tensões horizontais de tração foram determinadas no software me-PADS e as maiores para o AEMC/MeDiNa.

Quando se analisam as estruturas dos pavimentos 3 e 4 em função dos softwares utilizados observa-se que a variação das tensões horizontais de tração foi da ordem de 5%.

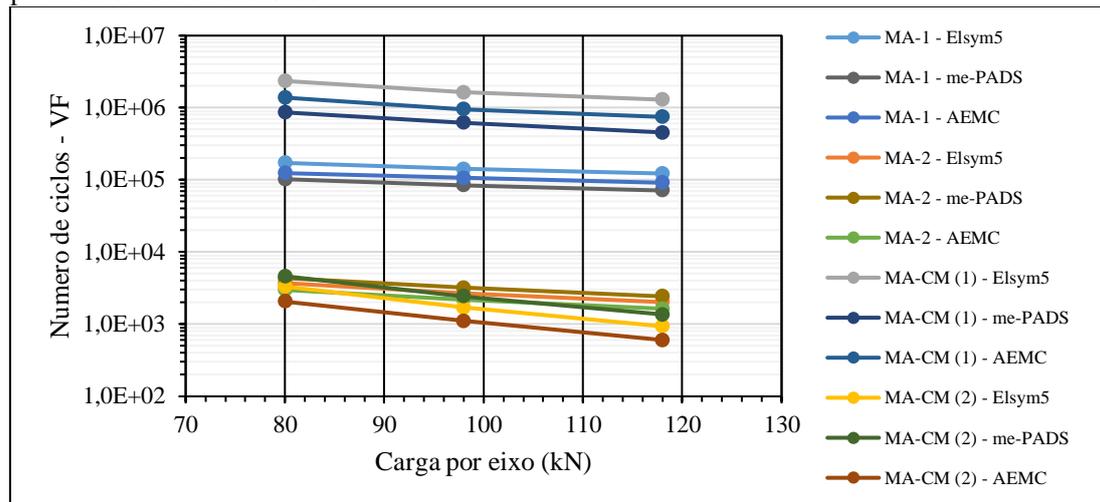
3.3.3.2 Vida de fadiga

Conhecidos os níveis de tensões atuantes no pavimento flexível analisado, através das análises estruturais realizadas com os três softwares utilizados, para cada nível de carregamento adotado, determinou-se a vida de fadiga das misturas asfálticas dosadas pelos métodos Marshall e Superpave, cujos valores estão apresentados nas Figuras 7 e 8, respectivamente.

A vida de fadiga (VF) das misturas asfálticas foram calculadas através da equação 1 e os valores dos parâmetros k da Tabela 3.

Na Figura 7, são apresentadas a vida de fadiga (número de ciclos) das misturas asfálticas dosadas pelo método Marshall em função das cargas por eixo adotadas, para as tensões de tração dos pavimentos flexíveis analisados.

Figura 7 – Valores de vida de fadiga (VF) das misturas asfálticas (MA) dosadas pelo método Marshall para o pavimento flexível analisado.

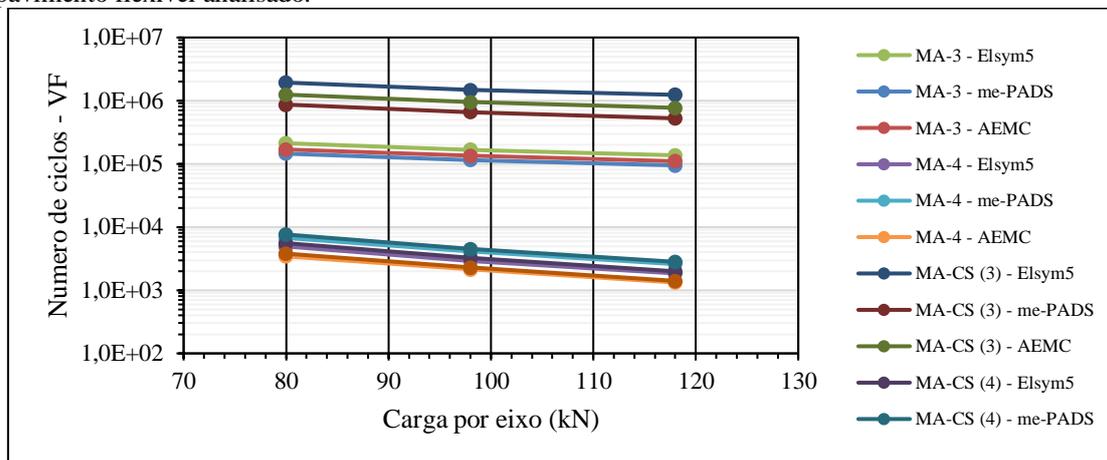


Analisando-se a Figura 7, evidencia-se que, para os níveis de carregamento adotados, os valores de vida de fadiga (FV), obtidos para o pavimento flexível analisado, considerando os parâmetros das misturas asfálticas 1 e CM (1) (faixa granulométrica C e corpo de prova composto a 5,0cm de profundidade, respectivamente), foram maiores do que quando analisado em função dos parâmetros das misturas asfálticas 2 e CM (2) (faixa granulométrica B e corpo de prova composto a 10,0cm de profundidade, respectivamente), isto porque estas misturas asfálticas estão próximas a linha neutra das camadas asfálticas que formam a estrutura do pavimento flexível analisado (Figura 2).

Observa-se ainda na Figura 7, que as misturas asfálticas 2 e CM (2) estão na zona de tração das camadas asfálticas. Para a carga por eixo de 80 kN, verifica-se que a vida de fadiga obtida quando o pavimento flexível foi analisado considerando os parâmetros da mistura asfáltica 2, foi maior para o software me-PADS, 3% em relação ao AEMC/MeDiNa e 17% em relação ao Elsym5. Analisando-se a mistura asfáltica CM (2), com a utilização do software me-PADS a vida de fadiga analisada foi 39% maior que a analisada com as tensões determinadas através do Elsym5 e 125% com relação ao AEMC/MeDiNa.

Na Figura 8, são apresentadas a vida de fadiga (número de ciclos) das misturas asfálticas dosadas pelo método Superpave em função das cargas por eixo adotadas, para o pavimento flexível analisado.

Figura 8 – Valores de vida de fadiga (VF) das misturas asfálticas dosadas pelo método Superpave para o pavimento flexível analisado.



Analisando-se a Figura 8, evidencia-se que, para os níveis de carregamento adotados, os valores de vida de fadiga (FV) obtidos para o pavimento flexível analisado, considerando os parâmetros das misturas asfálticas 3 e CS (3) (faixa granulométrica C e corpo de prova composto a 5,0cm de profundidade, respectivamente), foram maiores do que quando analisado em função dos parâmetros das misturas asfálticas 4 e CS (4) (faixa granulométrica B e corpo de prova composto a 10,0cm de profundidade, respectivamente), isto porque estas misturas asfálticas estão próximas a linha neutra das camadas asfálticas que formam a estrutura do pavimento flexível analisado (Figura 2).

Observa-se ainda na Figura 8 que as misturas asfálticas 4 e CS (4) estão na zona de tração das camadas asfálticas. Para a carga por eixo de 80 kN, verifica-se que a vida de fadiga obtida quando o pavimento flexível foi analisado considerando os parâmetros da mistura asfáltica 4 foi maior para o software me-PADS, 96% em relação ao AEMC/MeDiNa e 37% em relação ao Elsym5. Analisando-se a mistura asfáltica CS (4), com a utilização do software me-PADS a vida de fadiga analisada foi 37% maior que a analisada com as tensões determinadas através do Elsym5 e 122% com relação ao AEMC/MeDiNa. Verifica-se ainda, que, para as misturas asfálticas dosadas pelo método Superpave, as curvas de vida de fadiga dos pavimentos 3 e 4, independente dos carregamentos analisados, na região de tração das camadas asfálticas, apresentaram uma variação de 12%, dentro do mesmo software (Elsym5, me-PADS e AEMC/MeDiNa).

4 CONCLUSÕES

Dos resultados obtidos nesta pesquisa, conclui-se que para as misturas asfálticas dosadas pelo método Marshall o módulo de resiliência da mistura da faixa granulométrica C e faixa granulométrica B foi maior e menor, respectivamente, que o da mistura composta.

As análises computacionais indicaram que não houve variações significativas nas tensões horizontais calculadas para as estruturas asfálticas estudadas dentro de um mesmo programa. Este fato também foi observado com relação aos deslocamentos verticais, quando comparados os três programas utilizados, verificando-se que tanto para as tensões horizontais quanto para os deslocamentos verticais há uma variação significativa na sua magnitude, onde o programa AEMC/MeDiNa forneceu as maiores tensões e o programa me-PADS as menores tensões. Com relação os deslocamentos verticais, os maiores valores foram calculados com o programa Elsym5 e os menores com o programa me-PADS.

Para as misturas asfálticas dosadas pelo método Superpave, o módulo de resiliência da mistura da faixa granulométrica C e faixa granulométrica B foi maior e menor, respectivamente, que o da mistura composta.

As análises computacionais com as misturas Superpave indicaram que houve variações significativas nas tensões horizontais calculadas para as estruturas asfálticas estudadas dentro de um mesmo programa. Este fato não foi observado com relação aos deslocamentos verticais, uma vez que as misturas asfálticas analisadas apresentaram um comportamento similar para o mesmo programa. Quando comparados os três programas utilizados verifica-se que tanto para as tensões horizontais quanto para os deslocamentos verticais há uma variação significativa na sua magnitude, onde o programa AEMC/MeDiNa calculou as maiores tensões e o programa me-PADS as menores tensões. Com relação aos deslocamentos verticais os maiores valores foram calculados com o programa Elsym5 e os menores com o programa me-PADS.

REFERÊNCIAS

AHMAD,J.; RAHMAN, M.Y.A.; HAININ, M.R.; HOSSAIN, M. Comparative Evaluation of Hot-mix Asphalt Design Methods. *International Journal of Pavement Engineering*, v. 13, n. 2 p. 89-97. 2012. <https://doi.org/10.1080/10298436.2011.565765>
AL-HUMEIDAWI, B.H. Experimental characterization of rutting performance of HMA designed with aggregate gradations according to Superpave and Marshall methods. *World Journal of Engineering and Technology*, v. 4, p. 477-487, 2016. DOI: 10.4236 / wjet.2016.43048

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. DESIGNATION: R 35-14. Standard Practice for Superpave Volumetric Design for Hot Mix Asphalt (HMA). Washington, D.C., 2014.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D6927-15, Standard Test Method for Marshall Stability and Flow of Asphalt Mixtures, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015

ASI, I. Performance Evaluation of Superpave and Marshall Asphalt Mix Designs to Suite Jordan Climatic and Traffic Conditions. *Construction and Building Materials*, No. 21, p. 1732 – 1740. 2007. DOI: 10.1016 / j.conbuildmat.2006.05.036

BOCK, A. L.; HARTMANN, D.; BUDNY, J.; SPECHT, L. P.; CERATTI, J. A. P. Estudo laboratorial sobre os efeitos de diferentes formas de adição de cal a concreto asfáltico. *Teoria e Prática na Engenharia Civil*. n. 14, p. 56-69. 2009.

CARMO, C.A.T.; SILVA, T.O.; MARQUES, G.L.O.; PEREIRA, G.S.; PITANGA, H.N. Avaliação do comportamento mecânico de misturas asfálticas dosadas pelo método Marshall reforçadas com geogrelha. VIII Congresso Brasileiro de Geossintéticos, Geossintéticos 2019. Anais. São Carlos/SP. 2019.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. ME 024: Pavimento – determinação das deflexões pela viga Benkelman. Método de ensaio. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Rio de Janeiro, 1994, 6 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. ME 043: Misturas betuminosas a quente – ensaio Marshall. Método de ensaio. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Rio de Janeiro, 1995, 11 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. Manual de Pavimentação. Rio de Janeiro. 2006a. 274 p

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. ES 031: Pavimentos Flexíveis – Concreto Asfáltico. Especificação de Serviço. Rio de Janeiro. 2006b. 14 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. PRO 178: Pavimentação asfáltica – Preparação de corpos de prova para ensaios mecânicos usando o compactador giratório Superpave ou o Marshall. Procedimento de ensaio. Rio de Janeiro, 2018a. 19p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. Execução de estudos e pesquisa para elaboração de método mecanístico-empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos. Relatório Meta 4. Programas MeDiNa, AEMC e BackMeedina – Manual de utilização. Projeto DNIT TED nº 682/2014. Processo nº 50607.002043/2013-00. Relatório Parcial IV. 70 p. 2018b.

FRANCO, F. A. C. P.; MOTTA, L. M. G. Método automático de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos. In: XV Congresso Ibero-latino Americano do Asfalto, 2009, Lisboa, Portugal. XV CILA, 2009.

GIGANTE, A. C.; FURLAN, A. P. ; FABBRI, G. T. P. Avaliação da Susceptibilidade Térmica de Misturas Asfálticas Densas à Luz de seus Comportamentos Resilientes. In: XX Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, 2006, Brasília. Panorama Nacional da Pesquisa em Transportes, v. II. p. 1170-1181. 2006.

HAN, D.; WEI, L.; ZHANG, J. Experimental Study on Performance of Asphalt Mixture Designed by Different Method. *Procedia Engineering*. v. 137. p. 407-414. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.01.275>

JITSANGIAM, P.; CHINDAPRASIRT, P.; NIKRAZ, H. An evaluation of the suitability of SUPERPAVE and Marshall asphalt mix designs as they relate to Thailand's climatic conditions. *Construction and Building Materials*. v. 40, p. 961-970. 2013. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.11.011

KARIMI, S.S.; GOULIAS, D.; SCHWARTZ, C.W. Evaluation of Superpave HMA mixture properties at the plant versus behind the paver: Statistical comparison of QC and QA data. *Journal of Transportation Engineering, ASCE*, v. 138, n. 7, p. 924-932. July 2012.

KOPPERMAN, S.; TILLER, G.; TSENG, M. Elsym5 – Elastic Layered System: Interactive Microcomputer Version, User's Manual: IBM-PC and Compatible Version. Washington, D.C. Federal Highway Administration, Report n. FHWA-TS-87-206, Final Report. 1986.

LEITE, L.F.M.; MOTTA, L.M.G.; BERNUCCI, L.B.; SOARES, J.B. Mechanical behavior of asphalt rubber mixes prepared in laboratory. In: *Asphalt Rubber. The Pavement Material of the 21st Century. Proceedings*. Vilamoura, Portugal. Pp. 309-318. 2000.

LOULIZI, A.; AL-QADI, I.L. ELSEIFI, M. Difference between In Situ Flexible Pavement Measured and Calculated Stresses and Strains. *Journal of Transportation Engineering*. vol. 132, n. 7, p. 574-579. 2006.

MAINA, J.W.; OZAWA, Y; MATSUI, K. Linear elastic analysis of pavement structure under non-circular loading. *Road Materials and Pavement Design*. vol. 13, n. 3, p. 403-421. 2012.

MEDINA, J; MOTTA, L.M.G. *Mecânica do Pavimentos*. 3^a edição. Rio de Janeiro. 638 p. 2015.

NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM. NCHRP: A manual for design of hot mix asphalt with commentary. Washington, D.C.: 285 p. (NCHRP Report 673). 2011.

PINHEIRO, J.H.M., SOARES, J.B.; LEITE, L.F.M. Caracterização de misturas asfálticas com borracha produzidas pelo processo úmido e seco. Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, XVII ANPET. Anais. Vol 1. Rio de Janeiro. p 116-129. 2003.

PONTE, R.S.; CASTELO BRANCO, V.T.F.; HOLANDA, A.S.; SOARES, J.B. Avaliação de diferentes metodologias para obtenção do Módulo de Resiliência de misturas asfálticas. Revista Transportes, v. 22, n. 2, p. 85-94. 2014. <https://doi.org/10.14295/transportes.v22i2.792>

SPECHT, L.P.; AL BABADÓPULOS, L.F.; DI BENEDETTO, H. SAUZÉAT, C. SOARES, J.B. Application of the theory of viscoelasticity to evaluate the resilient modulus test in asphalt mixes. Construction and Building Materials. v. 149. p.648-658. 2017.