

CÁSSIO ALBERTO TEORO DO CARMO

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS
ASFÁLTICAS A QUENTE COM DIFERENTES FAIXAS
GRANULOMÉTRICAS E MÉTODOS DE COMPACTAÇÃO COM
E SEM GEOGRELHAS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

Orientador: Taciano Oliveira da Silva

Coorientadores: Dario Cardoso de Lima
Heraldo Nunes Pitanga

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2019**

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

C287e
2019 Carmo, Cássio Alberto Teoro do, 1971-
Estudo do comportamento mecânico de misturas asfálticas a quente com diferentes faixas granulométricas e métodos de compactação com e sem inclusão de geogrelhas / Cássio Alberto Teoro do Carmo. – Viçosa, MG, 2019.
203f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui apêndices.

Orientador: Taciano Oliveira da Silva.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.

Inclui bibliografia.

1. Asfalto – Análise. 2. Análise estrutural (Engenharia).
3. Pavimentos de asfalto. I. Universidade Federal de Viçosa.
Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. II. Título.

CDD 22 ed. 625.85

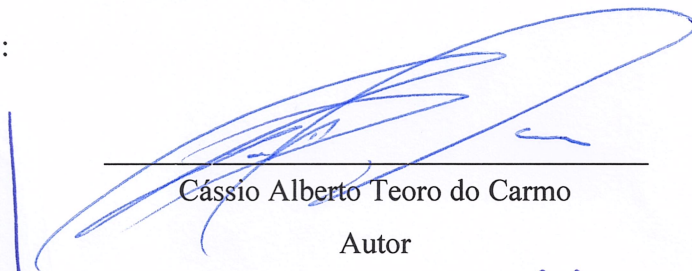
CÁSSIO ALBERTO TEORO DO CARMO

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS
ASFÁLTICAS A QUENTE COM DIFERENTES FAIXAS
GRANULOMÉTRICAS E MÉTODOS DE COMPACTAÇÃO COM
E SEM GEOGRELHAS**

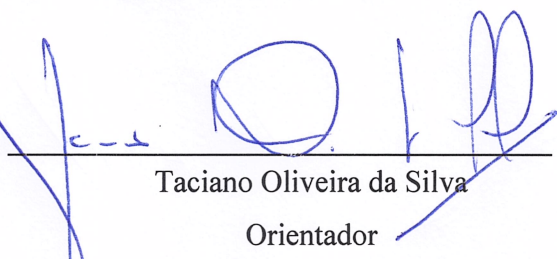
Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 25 de novembro de 2019.

Assentimento:



Cássio Alberto Teoro do Carmo
Autor



Taciano Oliveira da Silva
Orientador

*Dedico este trabalho
aos meus pais, Esmeraldo e Maria Lúcia
a minha esposa, Ana Rita e aos meus filhos, Felipe e Lucas.*

AGRADECIMENTOS

Gratidão acima de tudo a Deus, por ter me proporcionado a oportunidade de fazer este doutorado e por ter me ajudado e dado forças para chegar até o final de mais essa etapa de minha vida.

Aos meus pais, Esmeraldo e Maria Lúcia, minha base e meu refúgio, pelas mais diversas formas de auxílio e por terem me conduzido ao que sou hoje; à minha esposa, Ana Rita, por ser minha companheira e conselheira de todas as horas; e aos meus filhos, Felipe e Lucas, pela paciência e compreensão durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Professor Dr. Taciano Oliveira da Silva, pela orientação e liberdade para o desenvolvimento da pesquisa. Agradeço por sua bondade e por ter sido tão tranquila e agradável nossa convivência por tantos anos.

Ao Professor Dr. Dario Cardoso de Lima, pela coorientação e apoio dado para o desenvolvimento desta pesquisa.

Ao Professor Dr. Heraldo Nunes Pitanga, pela coorientação e importantes participações durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Professor Dr. Geraldo Luciano de Oliveira Marques, pelas valiosas sugestões e orientações dadas no transcorrer da pesquisa.

Ao Professor Dr. Carlos Alexandre Braz de Carvalho, pela amizade, parceria e seu grande incentivo para que esta pesquisa se realizasse.

À Géssica Soares Pereira, pela amizade e apoio durante a execução dos ensaios.

A todo pessoal do Laboratório de Engenharia Civil e do Departamento de Engenharia Civil, em especial, Dr. Giovani Levi Sant'Anna, Eduardo, Cilene e Tiago, pela amizade, solicitude, pelas conversas e brincadeiras que tornaram esse processo muito mais agradável.

Aos Professores Enivaldo Minette e Paulo Sergio de Almeida Barbosa, grandes amigos e colaboradores cujo incentivo não poderia prescindir à elaboração deste trabalho.

À Universidade Federal de Viçosa (UFV) e ao Departamento de Engenharia Civil, pela possibilidade de alcançar mais um grau acadêmico e pelo ensino de excelência desde a graduação.

O trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

À Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF) e ao Laboratório de Pavimentação da Faculdade de Engenharia, pela realização de ensaios mecânicos desta pesquisa.

À Huesker Ltda., em especial ao engenheiro André Estêvão Ferreira da Silva, pelo apoio e fornecimento das geogrelhas utilizadas nesta pesquisa.

Ao engenheiro Flávio Teixeira Montez, grande amigo e cujo incentivo não poderia prescindir à elaboração deste trabalho.

À Stratura Asfalto S.A., em especial ao engenheiro Emerson Simoso, que facilitou todos os contatos para a obtenção dos ligantes asfálticos, e à Pedreira Ervália, pelo fornecimento dos agregados empregados nesta pesquisa.

Desejo agradecer, também, a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

*“Sou das que pensam que a ciência tem uma grande beleza.
Um cientista em seu laboratório não é somente um técnico:
é também uma criança colocada diante de fenômenos naturais
que lhe impressionam como um conto de fadas.”*

Marie Curie

RESUMO

CARMO, Cássio Alberto Teoro, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, novembro de 2019. **Estudo do Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas a Quente com Diferentes Faixas Granulométricas e Métodos de Compactação Com e Sem Inclusão de Geogrelhas.** Orientador: Taciano Oliveira da Silva. Coorientadores: Dario Cardoso de Lima e Heraldo Nunes Pitanga.

Esta pesquisa teve por objetivo analisar o comportamento mecânico de corpos de prova compostos por misturas asfálticas à quente dosadas para diferentes faixas granulométricas reforçadas com diferentes tipos de geogrelhas (poliálcool vinílico, fibra de vidro e poliéster, avaliando-se o efeito da inserção destes geossintéticos, mediante análise comparativa com corpos de prova compostos não reforçados, e sua influência no desempenho de uma estrutura de pavimento flexível, mediante simulação em programa computacional. O programa experimental incluiu a caracterização dos agregados minerais, ligante asfáltico CAP 50/70 e os três tipos de geogrelhas. As dosagens das misturas asfálticas das faixas granulométricas C e B da especificação de serviço ES 031 do DNIT para concreto asfáltico foram realizadas através dos métodos Marshall e Superpave. Definidos os teores de projeto de ligante asfáltico para cada uma das misturas asfálticas analisadas, foram moldados corpos de prova compostos (metade do corpo de prova com a mistura asfáltica da faixa granulométrica C e a outra metade com a mistura asfáltica da faixa granulométrica B) com e sem a inserção das três geogrelhas testadas. A análise do efeito da inserção das geogrelhas nas propriedades mecânicas das misturas asfálticas foram baseadas nos ensaios de Módulo de Resiliência, Resistência à Tração por Compressão Diametral, Fadiga a Tensão Controlada e *Creep* Estático. Além dos ensaios mecânicos, foram realizadas análises numéricas através de modelos mecanístico-empírico, utilizando-se o software *me-PADS*, variando-se os tipos de revestimento asfáltico, equivalente ao Módulo de Resiliência dos corpos de prova compostos (com e sem geogrelha), em uma estrutura de pavimento flexível adotada. De modo geral, os resultados dos ensaios de Módulo de Resiliência dos corpos de prova sem a inclusão das geogrelhas indicaram resultados maiores. Para as análises que envolveram a avaliação do comportamento à fadiga, esse incremento mostrou-se dependente dos níveis de solicitações aplicadas, constatando-se que, para níveis de tensões mais baixos ($\Delta\sigma < 1,0\text{MPa}$), os corpos de prova com a geogrelha de poliéster indicaram melhor desempenho, comparativamente a outros corpos de prova com e sem geogrelhas (poliálcool vinílico e fibra de vidro). Este fato ocorreu para os corpos de prova dosados em ambos os métodos

(Marshall e Superpave). Para o cenário com os níveis de tensão maiores ($\Delta\sigma > 1,0$ MPa), o corpo de prova dosado pelo método Marshall com a geogrelha de poliéster indicou melhor desempenho, comparativamente aos outros corpos de prova com e sem geogrelhas. Já para os corpos dosados pelo método Superpave a condição sem geogrelha indicou o melhor desempenho, dentre os corpos de prova com geogrelha o que indicou melhor desempenho foi o que estava reforçado com a geogrelha de poliéster. Para as análises que envolveram o ensaio de deformação permanente, creep estático, os corpos de prova reforçados com a geogrelha de fibra de vidro foram os que apresentaram maiores deformações plásticas se comparado aos outros corpos de prova com e sem as geogrelhas. Este fato foi observado nos corpos de prova preparados nos dois métodos utilizados. Em relação às análises estruturais, os revestimentos asfálticos reforçados com geogrelhas apresentaram menores níveis de tração nas fibras inferiores para ambos os métodos de dosagem. No que se refere a vida de fadiga das camadas asfálticas da estrutura do pavimento flexível analisado, verifica-se que para ambos os métodos de dosagem Marshall e Superpave o comportamento foi similar, onde o reforço com geogrelha de poliéster indicou melhor desempenho, se comparado às outras condições com e sem as geogrelhas.

Palavras-chave: Misturas asfálticas a quente. Métodos de compactação. Geogrelhas. Composição granulométrica. Análise estrutural.

ABSTRACT

CARMO, Cássio Alberto Teoro, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, November, 2019. **Study of the Mechanical Behavior of Hot Asphalt Mixtures with Different Granulometric Ranges and Compaction Methods With and Without Inclusion of Geogrids.** Advisor: Taciano Oliveira da Silva. Co-advisors: Dario Cardoso de Lima and Heraldo Nunes Pitanga.

This research aimed to analyze the mechanical behavior of specimens composed of hot asphalt mixtures dosed for different granulometric bands reinforced with different types of geogrids (polyvinyl alcohol, fiberglass and polyester), evaluating the effect of the insertion of these geosynthetics, through comparative analysis with non-reinforced composite specimens, and their influence on the performance of a flexible pavement structure, through computer program simulation. The experimental program included the characterization of mineral aggregates, asphalt binder CAP 50/70 and the three types of geogrids. The dosages of the asphalt mixtures of the granulometric bands C and B of the service specification ES 031 of the DNIT for asphalt concrete were performed using the Marshall and Superpave methods. After defining the levels of asphalt binder design for each of the analyzed asphalt mixtures, composite specimens were molded (half of the specimen with the asphalt mixture of the particle size range C and the other half with the asphalt mixture of the particle size range B) with and without the insertion of the three geogrids tested. The analysis of the effect of geogrid insertion on the mechanical properties of asphalt mixtures was based on the tests of Resilient Modulus, Indirect Tensile Strength, Controlled Stress Fatigue and Static Creep. In addition to the mechanical tests, numerical analysis was performed using mechanistic-empirical models, using the me-PADS software, varying the types of asphalt coating, equivalent to the Resilience Module of the composite specimens (with and without geogrid), in an adopted flexible pavement structure. In general, the results of the Resilient Modulus tests of the specimens without the inclusion of geogrids indicated greater results. For the analyzes that involved the assessment of fatigue behavior, this increase was shown to be dependent on the levels of applied stress, showing that, for lower stress levels ($\Delta\sigma < 1.0\text{MPa}$), the test pieces with the polyester geogrid indicated better performance, compared to other specimens with and without geogrids (polyvinyl alcohol and fiberglass). This occurred for the test pieces measured in both methods (Marshall and Superpave). For the scenario with the highest stress levels ($\Delta\sigma > 1.0\text{MPa}$), the test piece dosed by the Marshall method

with the polyester geogrid indicated better performance, compared to the other specimens with and without geogrids. As for bodies dosed by the Superpave method, the condition without geogrid indicated the best performance, among the specimens with geogrid the one that indicated the best performance was the one that was reinforced with the polyester geogrid. For the analyzes that involved the permanent deformation test, static creep, the specimens reinforced with the fiberglass geogrid were those that presented greater plastic deformations when compared to the other specimens with and without geogrids. This fact was observed in the specimens prepared in the two methods used. In relation to structural analysis, asphalt coatings reinforced with geogrids showed lower levels of traction in the lower fibers for both dosage methods. Regarding the fatigue life of the asphalt layers of the analyzed flexible pavement structure, it appears that for both Marshall and Superpave dosing methods the behavior was similar, where the reinforcement with polyester geogrid indicated better performance, when compared to the other conditions with and without geogrids.

Keywords: Hot asphalt mixtures. Compaction methods. Geogrids. Granulometric composition. Structural analysis.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Figura 1 -	Curvas granulométricas dos agregados minerais.....	35
Figura 2 -	Curvas granulométricas estudadas para a faixa granulométrica C para as misturas asfálticas 1 e 3.....	38
Figura 3 -	Curvas granulométricas estudadas para a faixa granulométrica B para as misturas asfálticas 2 e 4.....	39
Figura 4 -	Gráficos utilizados para a definição do teor ótimo de ligante asfáltico da mistura 1: (a) volume de vazios (Vv) versus teor de asfalto; (b) relação betume-vazios (RBV) versus teor de asfalto.....	40
Figura 5 -	Gráficos utilizados para a definição do teor ótimo de ligante asfáltico da mistura asfáltica 2: (a) volume de vazios versus teor de asfalto e (b) relação betume-vazios versus teor de asfalto.....	40
Figura 6 -	Gráfico utilizado para a determinação do teor de projeto de ligante asfáltico da mistura asfáltica 3, volume vazios versus teor de asfalto.....	41
Figura 7 -	Gráfico utilizado para a determinação do teor de projeto de ligante asfáltico da mistura asfáltica 4, volume vazios versus teor de asfalto.....	42
Figura 8 -	Equipamento utilizado para a realização dos ensaios de estabilidade e fluência Marshall.....	43
Figura 9 -	Equipamento utilizado para a realização do ensaio de módulo de resiliência (MR).....	44
Figura 10 -	Equipamento utilizado para a realização do ensaio de fadiga.....	45
Figura 11 -	Equipamento para a realização do ensaio de creep estático.....	46
Figura 12 -	Pavimento flexível adotado para as análises estruturais.....	49
Figura 13 -	Fluxograma das etapas da pesquisa.....	49

3. AVALIAÇÃO COMPARATIVA DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MISTURAS ASFÁLTICAS SIMPLES E COMPOSTAS.

Figura 1 -	Corpos de prova moldados no compactador Marshall; (a) corpo de prova moldados na faixa granulométrica C e (b) corpo de prova composto, moldado nas faixas granulométricas C e B.....	58
Figura 2 -	Pavimento flexível adotado nas análises estruturais.....	61
Figura 3 -	Valores médios de módulo de resiliência (a) e valores de resistência à tração por compressão diametral (b).....	63

Figura 4 -	Curvas de fadiga das misturas asfálticas dosadas pelo método Marshall em função da diferença de tensões ($\Delta\sigma$).....	66
Figura 5 -	Curvas de fadiga das misturas asfálticas dosadas pelo método Superpave em função da diferença de tensões ($\Delta\sigma$).....	67
Figura 6 -	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 $x = 0$	70
Figura 7 -	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 $x = 0$	72
Figura 8 -	Deflexões verticais máximas na estrutura do pavimento flexível analisado em função dos carregamentos adotados para as misturas asfálticas dosadas pelo método Marshall.....	74
Figura 9 -	Deflexões verticais máximas na estrutura do pavimento flexível analisado em função dos carregamentos adotados para as misturas asfálticas dosadas pelo método Superpave.....	76
Figura 10 -	Valores de vida de fadiga (VF) das misturas asfálticas dosadas pelo método Marshall para o pavimento flexível analisado.....	77
Figura 11 -	Valores de vida de fadiga (VF) das misturas asfálticas dosadas pelo método Superpave para o pavimento flexível analisado.....	78

4. AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS ASFÁLTICAS COMPOSTAS DOSADAS PELO MÉTODO MARSHALL REFORÇADAS COM GEOGRELHA.

Figura 1 -	Corpo de prova moldado no compactador Marshall nas faixas granulométricas, C e B.....	90
Figura 2 -	Pavimento asfáltico analisado nas análises estruturais.....	93
Figura 3 -	Distribuição granulométrica das misturas asfáltica da faixa granulométrica C, com os pontos de controle Superpave.....	93
Figura 4 -	Distribuição granulométrica das misturas asfáltica da faixa granulométrica B, com os pontos de controle Superpave.....	94
Figura 5 -	Valores médios de módulo de resiliência e resistência à tração por compressão diametral das misturas asfálticas com e sem a inclusão das geogrelhas.....	95
Figura 6 -	Curvas de fadiga das misturas asfálticas com e sem a inclusão das geogrelhas. Vida de fadiga <i>versus</i> diferença de tensões ($\Delta\sigma$).....	97

Figura 7 -	Resultado do ensaio de creep estático das misturas dosadas pelos métodos Marshall com e sem a inclusão das geogrelhas. Deformação plástica específica <i>versus</i> tempo.....	99
Figura 8 -	Deformação total (D_t) do ensaio de creep estático das misturas dosadas pelos métodos Marshall para cada uma das condições de interface estudadas.....	100
Figura 9 -	Módulo de fluência (M_f) do ensaio de creep estático das misturas dosadas pelos métodos Marshall para cada uma das condições de interface estudadas.....	101
Figura 10 -	Inclinação da curva (I_{curva}) do ensaio de creep estático das misturas dosadas pelos métodos Marshall para cada uma das condições de interface estudadas.....	102
Figura 11 -	Tensão horizontal (σ_h), na camada asfáltica dosada pelo método Marshall, para a condição de interface SGeo e carga por eixo de 80 kN e pressão de enchimento dos pneus de 563 kPa (software <i>me-PADS</i>).....	104
Figura 12 -	Tensões horizontais (σ_h) atuantes na fibra inferior das camadas asfálticas na posição $x=0\text{mm}$ em função dos carregamentos adotados.....	106
Figura 13 -	Tensões verticais (σ_v) atuantes na fibra inferior das camadas asfálticas na posição $x=0\text{mm}$ em função dos carregamentos e das condições de interface adotadas.....	107
Figura 14 -	Tensões de tração atuantes no bordo inferior da camada de binder do pavimento adotado em função da condição de interface, na posição $x=0\text{mm}$	107
Figura 15 -	Fator de segurança à ruptura da camada de Binder em função da condição de interface.....	108
Figura 16 -	Deflexões verticais (δz) na estrutura do pavimento adotado, na condição de interface SGeo, analisado para o carregamento de 80kN por eixo.....	109
Figura 17 -	Deflexões verticais máximas na estrutura do pavimento adotado, na posição $x=0\text{mm}$, em função da condição de interface e do carregamento por eixo.....	110
Figura 18 -	Vida de fadiga das misturas asfálticas dosadas pelos métodos Marshall para o pavimento flexível adotado.....	111

5. AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS ASFÁLTICAS COMPOSTAS DOSADAS PELO MÉTODO SUPERPAVE REFORÇADAS COM GEOGRELHA.

Figura 1 -	Corpo de prova moldado no compactador Marshall nas faixas granulométricas, C e B.....	121
Figura 2 -	Pavimento asfáltico analisado nas análises estruturais.....	124
Figura 3 -	Distribuição granulométrica das misturas asfáltica da faixa granulométrica C, com os pontos de controle Superpave	124
Figura 4 -	Distribuição granulométrica das misturas asfáltica da faixa granulométrica B, com os pontos de controle Superpave	125
Figura 5 -	Valores médios de módulo de resiliência e resistência à tração por compressão diametral das misturas asfálticas com e sem a inclusão das geogrelhas.....	126
Figura 6 -	Curvas de fadiga das misturas asfálticas com e sem a inclusão das geogrelhas. Vida de fadiga <i>versus</i> diferença de tensões ($\Delta\sigma$)	128
Figura 7 -	Resultado do ensaio de creep estático das misturas dosadas pelos métodos Marshall com e sem a inclusão das geogrelhas. Deformação plástica específica <i>versus</i> tempo.....	130
Figura 8 -	Deformação total (D_t) do ensaio de creep estático das misturas dosadas pelos métodos Marshall para cada uma das condições de interface estudadas.....	131
Figura 9 -	Módulo de fluência (M_f) do ensaio de creep estático das misturas dosadas pelos métodos Marshall para cada uma das condições de interface estudadas.....	132
Figura 10 -	Inclinação da curva (I_{curva}) do ensaio de creep estático das misturas dosadas pelos métodos Marshall para cada uma das condições de interface estudadas.....	133
Figura 11 -	Tensão horizontal (σ_h), na camada asfáltica dosada pelo método Marshall, para a condição de interface SGeo e carga por eixo de 80 kN e pressão de enchimento dos pneus de 563 kPa (software <i>me-PADS</i>).....	135
Figura 12 -	Tensões horizontais (σ_h) atuantes na fibra inferior das camadas asfálticas na posição $x=0mm$ em função dos carregamentos adotados.....	136
Figura 13 -	Tensões verticais (σ_v) atuantes na fibra inferior das camadas asfálticas, na posição $x=0mm$, em função dos carregamentos e das condições de interface adotadas.....	137
Figura 14 -	Tensões de tração atuantes no bordo inferior da camada de binder do pavimento adotado em função da condição de interface, na posição $x=0mm$	138
Figura 15 -	Fator de segurança à ruptura da camada de Binder em função da condição de interface.....	139

Figura 16 -	Deflexões verticais (δz) na estrutura do pavimento adotado, na condição de interface SGeo, analisado para o carregamento de 80kN por eixo.....	140
Figura 17 -	Deflexões verticais máximas na estrutura do pavimento adotado em função da condição de interface e do carregamento por eixo.....	141
Figura 18 -	Vida de fadiga das misturas asfálticas dosadas pelos métodos Marshall para o pavimento estudado.....	143

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Figura 1 -	Síntese dos resultados das propriedades mecânicas das misturas asfálticas compostas <i>versus</i> condição de interface.....	147
------------	--	-----

APÊNDICE A. INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DO TEOR DE LIGANTE DE PROJETO E DO MÉTODO DE DOSAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS NA SENSIBILIDADE ESTRUTURAL DE UM PAVIMENTO ASFÁLTICO.

Figura 1 -	Valores médios de módulo de resiliência em função do teor de ligante asfáltico, (a) para as misturas asfálticas da faixa granulométrica C e (b) para as misturas asfálticas da faixa granulométrica B.....	154
Figura 2 -	Resistência à Tração por Compressão Diametral em função do teor de ligante asfáltico: (a) para as misturas asfálticas da faixa granulométrica C e (b) para as misturas asfálticas da faixa granulométrica B.....	155
Figura 3 -	Tensões horizontais (σ_h) na estrutura do pavimento adotado para as misturas asfálticas Marshall.....	157
Figura 4 -	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 $x=0\text{mm}$	158
Figura 5 -	Tensões horizontais (σ_h) na estrutura do pavimento asfáltico analisado para as misturas asfálticas dosadas pelo método Superpave.....	159
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 $x=0\text{mm}$	160
Figura 7 -	Tensões de tração atuantes no bordo inferior da camada de binder dos pavimentos adotado em função do teor de ligante asfáltico: (a) misturas asfálticas Marshall; (b) Misturas asfálticas Superpave.....	161
Figura 8 -	Fator de segurança à ruptura da camada de Binder em função do teor de ligante asfáltico.....	162

Figura 9 -	Deflexões verticais (δz) na estrutura do pavimento adotado analisado para o carregamento de 80kN por eixo: (a) misturas asfálticas dosadas pelo método Marshall e (b) misturas asfálticas dosadas pelo método Superpave.....	163
Figura 10 -	Deflexões verticais máximas na estrutura do pavimento adotado em função do teor de ligante asfáltico das misturas asfálticas: (a) método Marshall e (b) método Superpave.....	164
APÊNDICE B. ANÁLISE MECÂNICO-EMPIRICO DE UM PAVIMENTO FLEXÍVEL EM FUNÇÃO DO FENÔMENO DE FADIGA		
Figura 1 -	Curva de fadiga das misturas asfálticas analisadas em função da diferença de tensões ($\Delta\sigma$).....	177
Figura 2 -	Tensões horizontais (σ_h) na estrutura do pavimento flexível adotado.....	179
Figura 3 -	Tensões horizontais (σ_h) atuantes na fibra inferior das camadas asfálticas do pavimento flexível analisado em função dos níveis de carregamento adotados, na posição $x=0\text{mm}$	181
Figura 4 -	Deflexões verticais (δz) na estrutura do pavimento flexível analisado para o carregamento por eixo de 80 kN: (a) Mistura asfáltica dosada pelo método Marshall e (b) Mistura asfáltica dosada pelo método Superpave.....	182
Figura 5 -	Deflexões verticais máximas na estrutura do pavimento flexível analisado em função dos carregamentos adotados para as misturas asfálticas dosadas pelos métodos Marshall e Superpave.....	183
Figura 6 -	Valores de vida de fadiga das misturas asfálticas dosadas pelos métodos Marshall e Superpave para o pavimento flexível adotado.....	185
APÊNDICE C. DEFORMAÇÃO PERMANENTE DE MISTURAS ASFÁLTICAS A QUENTE DOSADAS PELOS MÉTODOS MARSHALL E SUPERPAVE.		
Figura 1 -	Valores médios de deformação permanente dos corpos de prova das misturas asfálticas analisadas.....	196
Figura 2 -	Valores de deformação total (D_t) do ensaio de creep estático para os corpos de prova das misturas asfálticas analisadas.....	198
Figura 3 -	Valores de módulo de fluência (M_f) após o período de recuperação do ensaio de creep estático para os corpos de prova das misturas asfálticas analisadas.....	198
Figura 4 -	Valores da inclinação da curva (I_{curva}) do ensaio de creep estático para os corpos de prova das composições asfálticas analisadas.....	199

LISTA DE TABELAS

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Tabela 1 -	Resultados dos ensaios de caracterização dos agregados minerais utilizados na pesquisa.....	36
Tabela 2 -	Resultados dos ensaios de caracterização do ligante asfáltico (CAP 50/70) empregados na pesquisa.....	36
Tabela 3 -	Resultados dos ensaios de caracterização das geogrelhas conforme a norma NBR ISO 10319 (ABNT, 2013).....	37

3. AVALIAÇÃO COMPARATIVA DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MISTURAS ASFÁLTICAS SIMPLES E COMPOSTAS.

Tabela 1 -	Parâmetros volumétricos e mecânicos (Estabilidade e Fluência Marshall) dos corpos de prova moldados nos teores de ligante asfáltico de projeto.....	62
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.....	64
Tabela 3 -	Parâmetros das curvas de fadiga das misturas asfálticas estudadas.....	65
Tabela 4 -	Tensões horizontais (σ_h) atuantes nas fibras inferiores das camadas asfálticas em função dos níveis de carregamento adotados e do método de análise, para as misturas dosadas pelo método Marshall, na posição $x = 0$	69
Tabela 5 -	Tensões horizontais (σ_h) atuantes nas fibras inferiores das camadas asfálticas em função dos níveis de carregamento adotados e do método de análise, para as misturas dosadas pelo método Superpave, na posição $x = 0$	71
Tabela 6 -	Valores de deflexões verticais recuperáveis máximas no topo da camada asfáltica do pavimento flexível analisado, para as misturas asfálticas dosadas pelo método Marshall.....	73
Tabela 7 -	Valores de deflexões verticais recuperáveis máximas no topo da camada asfáltica do pavimento flexível analisado, para as misturas asfálticas dosadas pelo método Superpave.....	75
Tabela 8 -	Valores de vida de fadiga das camadas asfálticas do pavimento flexível analisado em função dos carregamentos adotados, para as misturas asfálticas dosadas pelo método Marshall.....	79
Tabela 9 -	Valores de vida de fadiga das camadas asfálticas do pavimento flexível analisado em função dos carregamentos adotados, para as misturas asfálticas dosadas pelo método Superpave.....	80

4. AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS ASFÁLTICAS COMPOSTAS DOSADAS PELO MÉTODO MARSHALL REFORÇADAS COM GEOGRELHA.

Tabela 1 -	Parâmetros volumétricos e mecânicos dos corpos de prova moldados sem e com geogrelha.....	94
Tabela 2 -	Valores do módulo de resiliência e resistência à tração por compressão diametral para os corpos de prova com e sem a inclusão das geogrelhas.....	96
Tabela 3 -	Parâmetros das curvas de fadiga das misturas asfálticas estudada com e sem a inclusão das geogrelhas.....	97
Tabela 4 -	Valores médios de deslocamentos e deformações dos corpos de prova do ensaio de creep estático das misturas asfálticas estudadas com e sem a inclusão das geogrelhas.....	98
Tabela 5 -	Valores médios para os parâmetros D_t (Deformação total), M_f (módulo de fluência), e I_{curva} (inclinação da curva) para os corpos de prova das misturas asfálticas analisadas.....	100
Tabela 6 -	Tensão horizontal (σ_h) e vertical (σ_v) na posição $x=0\text{mm}$, atuantes na fibra inferior das camadas asfáltica em função dos níveis de carregamento adotados para as condições de interface estudadas.....	105
Tabela 7 -	Deflexões verticais (δz) recuperáveis máximas no topo da camada asfáltica, na posição $x=0\text{mm}$, dos pavimentos adotados em função da condição de interface e dos níveis de carregamento sobre as rodas.....	109
Tabela 8 -	Variação dos valores da vida de fadiga das misturas asfálticas para as cargas de eixo simuladas no software <i>me-PADS</i>	111

5. AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS ASFÁLTICAS COMPOSTAS DOSADAS PELO MÉTODO SUPERPAVE REFORÇADAS COM GEOGRELHA.

Tabela 1 -	Parâmetros volumétricos e mecânicos dos corpos de prova moldados sem e com geogrelha.....	125
Tabela 2 -	Valores do módulo de resiliência e resistência à tração por compressão diametral para os corpos de prova com e sem a inclusão das geogrelhas.....	127
Tabela 3 -	Parâmetros estatísticos das curvas de fadiga das misturas asfálticas estudada com e sem a inclusão das geogrelhas.....	128
Tabela 4 -	Valores médios de deslocamentos e deformações dos corpos de prova do ensaio de creep estático das misturas asfálticas estudadas com e sem a inclusão das geogrelhas.....	129

Tabela 5 -	Valores médios para os parâmetros Dt (Deformação total), Mf (módulo de fluência), e Icurva (inclinação da curva) para os corpos de prova das misturas asfálticas analisadas.....	131
Tabela 6 -	Tensão horizontal (σ_h) e vertical (σ_v) atuantes na fibra inferior das camadas asfáltica em função dos níveis de carregamento adotados para as condições de interface estudadas.....	136
Tabela 7 -	Deflexões verticais (δ_z) recuperáveis máximas no topo da camada asfáltica, na posição $x=0\text{mm}$ dos pavimentos adotados em função da condição de interface e dos níveis de carregamento.....	140
Tabela 8 -	Variação dos valores da vida de fadiga das misturas asfálticas para as cargas de eixo simuladas no software me-PADS.....	142

APÊNDICE A. INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DO TEOR DE LIGANTE DE PROJETO E DO MÉTODO DE DOSAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS NA SENSIBILIDADE ESTRUTURAL DE UM PAVIMENTO ASFÁLTICO.

Tabela 1 -	Parâmetros volumétricos e mecânicos (Estabilidade e Fluência Marshall) dos corpos de prova moldados nos teores de ligante asfáltico de projeto.....	153
Tabela 2 -	Valores de Módulo de Resiliência em função do teor de ligante asfáltico.....	155
Tabela 3 -	Valores de Resistência à Tração por Compressão Diametral em função do teor de ligante asfáltico.....	156
Tabela 4 -	Tensões horizontais (σ_h) atuantes nas fibras inferiores das camadas asfálticas em função dos níveis de carregamento adotados, para as misturas dosadas pelo método Marshall, na posição $x=0\text{mm}$	157
Tabela 5 -	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 $x=0\text{mm}$	159
Tabela 6 -	Deflexões verticais recuperáveis máximas no topo da camada asfáltica do pavimento adotado em função da variação dos valores de Módulos de Resiliência das misturas asfálticas analisadas e dos níveis de carregamento adotados.....	164

APÊNDICE B. ANÁLISE MECÂNICO-EMPIRICO DE UM PAVIMENTO FLEXÍVEL EM FUNÇÃO DO FENÔMENO DE FADIGA

Tabela 1 -	Parâmetros volumétricos e propriedades mecânicas de corpos de prova moldados das misturas asfálticas analisadas.....	174
------------	--	-----

Tabela 2 -	Valores médios de módulo de resiliência e resistência à tração por compressão diametral e a relação MR/RT para os corpos de prova das misturas asfálticas analisadas.....	175
Tabela 3 -	Parâmetros estatísticos das curvas de fadiga das misturas asfálticas analisadas.....	177
Tabela 4 -	Tensões horizontais (σ_h) atuantes na fibra inferior das camadas asfálticas, na posição $x=0\text{mm}$ em função dos níveis de carregamento adotados, para as misturas asfálticas dosadas pelo método Marshall e Superpave.....	180
Tabela 5 -	Valores de deflexões verticais recuperáveis máximas no topo da camada asfáltica do pavimento flexível analisado.....	183
Tabela 6 -	Valores de vida de fadiga das camadas asfálticas do pavimento flexível analisado em função dos carregamentos adotados no software <i>me-PADS</i>	184

APÊNDICE C. DEFORMAÇÃO PERMANENTE DE MISTURAS ASFÁLTICAS A QUENTE DOSADAS PELOS MÉTODOS MARSHALL E SUPERPAVE.

Tabela 1 -	Parâmetros volumétricos e propriedades mecânicas de corpos de prova das misturas asfálticas analisadas.....	193
Tabela 2 -	Valores médios de módulo de resiliência em função do teor de ligante asfáltico.....	194
Tabela 3 -	Valores médios dos parâmetros do ensaio de creep estático para os corpos de prova das misturas asfálticas analisadas.....	195
Tabela 4 -	Valores médios dos parâmetros D_t , M_f , I_{curva} para os corpos de provas das misturas asfálticas analisadas.....	197

LISTA DE ABREVIACOES E SIGLAS

AASHTO	- American Association of State Highway and Transportation Officials.
ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
AEMC	- Análise Elástica de Múltiplas Camadas
ASTM	- American Society for Testing and Materials
CAP	- Cimento Asfáltico de Petróleo
CM	- Composta Marshall
CS	- Composta Superpave
DMT	- Densidade Máxima Teórica
DNER	- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
ELSYM5	- Elastic Layered System
ES	- Especificação de Serviço
FHWA	- Federal Highway Administration
FV	- Fibra de Vidro
LVDT	- Linear Variable Differential Transformer
MA	- Mistura Asfáltica
ME	- Método de Ensaio
MeDiNa	- Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos
me-PADS	- Mechanistic Empirical Pavement Analysis and Design Software
NBR	- Norma Brasileira
PAV	- Pavimento
PET	- Poliéster
PRO	- Procedimento
PVA	- Poliálcool Vinílico
RBV	- Relação Betume Vazios
REGAP	- Refinaria Gabriel Passos
SHRP	- Strategic Highway Research Program

T _{Asf}	-	Teor de Asfalto
TMN	-	Tamanho Máximo Nominal
UFJF	-	Universidade Federal de Juiz de Fora
UFV	-	Universidade Federal de Viçosa
VAM	-	Vazios do Agregado Mineral

LISTA DE SÍMBOLOS

σ	-	Tensão
σ_x, σ_h	-	Tensão Horizontal
σ_z, σ_v	-	Tensão Vertical
ϵ_{1000}	-	Deformação para 1000 Segundos de Ensaio.
ϵ_{3600}	-	Deformação para 3600 Segundos de Ensaio
Δh_0	-	Altura Inicial da Altura do Corpo de Prova
Δh_{4500}	-	Altura do Corpo de Prova, após o período de Recuperação (4500s)
$\Delta \sigma$	-	Diferença de Tensões
ν	-	Coefficiente de Poisson
δz	-	Deflexões Verticais Recuperáveis
E	-	Elasticidade
Dt	-	Deformação Total
Gmm	-	Densidade Máxima Medida da Mistura
Icurva	-	Inclinação da Curva
k_1, k_2	-	Constante de Regressão Linear
Mf	-	Módulo de Fluência
MR	-	Módulo de Resiliência
N	-	Número de Repetições do Eixo Padrão (8,2 toneladas)
P_1, P_2, P_3	-	Pressão de Enchimento dos Pneus
Q_1, Q_2, Q_3	-	Carregamentos
RT	-	Resistência à Tração por Compressão Diametral
Pl _i	-	Teor de Ligante Asfáltico Inicial
VF	-	Vida de Fadiga
V _v	-	Volume de Vazios

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	29
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	29
1.2	OBJETIVOS.....	31
1.2.1	Objetivo Geral.....	31
1.2.2	Objetivo Específico.....	31
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	31
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	34
2	MATERIAIS E MÉTODOS.....	35
2.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	35
2.2	MATERIAIS.....	35
2.2.1	Agregados Minerais.....	35
2.2.2	Ligante Asfáltico.....	35
2.2.3	Geogrelhas.....	37
2.3	MÉTODOS.....	37
2.3.1	Dosagem de Misturas Asfálticas.....	37
2.3.1.1	Misturas granulométricas.....	38
2.3.2	Dosagem Marshall.....	39
2.3.2.1	Mistura asfáltica 1.....	39
2.3.2.2	Mistura asfáltica 2.....	40
2.3.3	Dosagem Superpave.....	40
2.3.3.1	Mistura asfáltica 3.....	41
2.3.3.2	Mistura asfáltica 4.....	42
2.3.4	Ensaio de Desempenho das Misturas Asfálticas.....	42
2.3.4.1	Estabilidade e fluência Marshall.....	42
2.3.4.2	Módulo de resiliência.....	43
2.3.4.3	Ensaio de resistência à tração por compressão diametral.....	44
2.3.4.4	Ensaio de fadiga por compressão diametral.....	44
2.3.4.5	Ensaio de creep estático.....	46
2.3.5	Análise Estrutural de Pavimento Flexível Adotado.....	47
2.3.6	Etapas do Desenvolvimento da Pesquisa.....	49
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	50

3	AVALIAÇÃO COMPARATIVA DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MISTURAS ASFÁLTICAS SIMPLES E COMPOSTAS.....	53
	RESUMO.....	53
	ABSTRACT.....	54
3.1	INTRODUÇÃO.....	55
3.2	MATERIAIS E MÉTODOS.....	57
3.2.1	Moldagem dos Corpos de Prova.....	57
3.2.1.1	Moldagem no Compactador Marshall.....	58
3.2.1.2	Moldagem no Compactador Giratório Superpave.....	59
3.2	ANÁLISE ESTRUTURAL DO PAVIMENTO ADOTADO.....	60
3.4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	62
3.4.1	Parâmetros Volumétricos das Dosagens Marshall e Superpave....	62
3.4.2	Ensaio de Módulo de Resiliência e de Resistência à Tração por Compressão Diametral.....	63
3.4.3	Ensaio de Fadiga por Compressão Diametral.....	65
3.4.4	Análise Estrutural do Pavimento Adotado.....	68
3.4.4.1	Análise das tensões horizontais.....	68
3.4.4.2	Deflexões.....	73
3.4.4.3	Vida de fadiga.....	76
3.5	CONCLUSÕES.....	81
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	81
4	AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS ASFÁLTICAS COMPOSTAS DOSADAS PELO METODO MARSHALL REFORÇADAS COM GEOGRELHAS.....	84
	RESUMO.....	84
	ABSTRACT.....	85
4.1	INTRODUÇÃO.....	86
4.1.1	Considerações Iniciais.....	86
4.1.2	Influência dos Geossintéticos quanto à Vida de Fadiga.....	86
4.1.3	Influência dos Geossintéticos quanto à Deformação Permanente	88
4.2	MATERIAIS E MÉTODOS.....	90
4.2.1	Moldagem dos Corpos de Prova Compostos.....	90
4.2.2	Análise Estrutural do Pavimento Adotado.....	91
4.3	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	93
4.3.1	Granulometria de Projeto das Misturas Asfálticas Estudadas.....	93

4.3.2	Parâmetros Volumétricos das Misturas Estudadas.....	94
4.3.3	Ensaio de Módulo de Resiliência e Resistência à Tração por Compressão Diametral.....	95
4.3.4	Ensaio de Fadiga por Compressão Diametral.....	96
4.3.5	Ensaio de Creep Estático.....	98
4.3.6	Análise Estrutural do Pavimento Adotado.....	103
4.4	CONCLUSÕES.....	112
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	113
5	AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS ASFÁLTICAS COMPOSTAS DOSADAS PELO MÉTODO SUPERPAVE REFORÇADAS COM GEOGRELHAS.....	116
	RESUMO.....	116
	ABSTRACT.....	117
5.1	INTRODUÇÃO.....	118
5.1.1	Considerações Iniciais.....	118
5.2	MATERIAIS E MÉTODOS.....	120
5.2.1	Moldagem dos Corpos de Prova Compostos.....	121
5.2.2	Análise Estrutural do Pavimento Adotado.....	122
5.3	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	124
5.3.1	Análise Granulométrica das Misturas Asfálticas.....	124
5.3.2	Parâmetros Volumétricos das Misturas Asfálticas.....	125
5.3.3	Ensaio de Módulo de Resiliência e Resistência à Tração por Compressão Diametral.....	126
5.3.4	Ensaio de Fadiga por Compressão Diametral.....	127
5.3.5	Ensaio de Creep Estático.....	129
5.3.6	Análise Estrutural do Pavimento Adotado.....	134
5.4	CONCLUSÕES.....	143
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	144
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	146
6.1	CONCLUSÕES GERAIS.....	146
6.2	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	148
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	148

APÊNDICE A.	INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DO TEOR DE LIGANTE DE PROJETO E DO MÉTODO DE DOSAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS NA SENSIBILIDADE ESTRUTURAL DE UM PAVIMENTO ASFÁLTICO.....	149
	RESUMO.....	149
	ABSTRACT.....	150
A.1	INTRODUÇÃO.....	151
A.2	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	153
A.2.1	Parâmetros Volumétricos das Dosagens Marshall e Superpave.....	153
A.2.1	Ensaio de Módulo de Resiliência.....	154
A.2.3	Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral.....	155
A.2.4	Análise Estrutural do Pavimento Adotado.....	156
A.3	CONCLUSÕES.....	165
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	166
APÊNDICE B.	ANÁLISE MECÂNICO-EMPIRICO DE UM PAVIMENTO FLEXÍVEL EM FUNÇÃO DO FENÔMENO DE FADIGA.....	169
	RESUMO.....	169
	ABSTRACT.....	170
B.1	INTRODUÇÃO.....	171
B.2	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	173
B.2.1	Parâmetros Volumétricos das Dosagens Marshall e Superpave.....	173
B.2.2	Ensaio de Módulo de Resiliência e Resistência à Tração por Compressão Diametral.....	174
B.2.3	Ensaio de Fadiga por Compressão Diametral à Tensão Controlada.....	176
B.2.4	Análise Estrutural do Pavimento Adotado.....	179
B.3	CONCLUSÕES.....	185
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	186
APÊNDICE C.	DEFORMAÇÃO PERMANENTE DE MISTURAS ASFÁLTICAS A QUENTE DOSADAS PELOS MÉTODOS MARSHALL E SUPERPAVE	188
	RESUMO.....	188
	ABSTRACT.....	189

C.1	INTRODUÇÃO.....	190
C.2	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	192
C.2.1	Parâmetros Volumétricos das Dosagens Marshall e Superpave.....	192
C.2.2	Ensaio de Módulo de Resiliência.....	194
C.2.3	Ensaio de Creep Estático.....	194
C.3	CONCLUSÕES.....	200
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	201

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

As estruturas dos pavimentos são compostas por múltiplas camadas de espessuras finitas, que se interagem entre si, constituídas por materiais de natureza e comportamentos diversos, destinados a resistir aos esforços provenientes do tráfego e das intempéries, além de proporcionar aos usuários conforto e segurança.

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.

A ação combinada do tráfego e do clima provocam na estrutura do pavimento efeitos de degradação, que irão resultar na queda de desempenho funcional e de serventia. A queda desses fatores está condicionada ao surgimento de dois dos principais defeitos, que são o trincamento por fadiga ou reflexão e a deformação permanente. Assim, intervenções de reabilitação e restauração de pavimentos devem ser promovidas.

Nos últimos anos, a ocorrência prematura da perda das características funcionais e de serventia dos pavimentos asfálticos levou ao desenvolvimento e adoção de novos métodos de dosagem e a utilização de materiais inovadores para aumentar a vida de serviço das camadas asfálticas.

Atualmente existem vários métodos de dosagem de misturas asfálticas, como, por exemplo, os métodos Marshall, Hveem 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. De acordo com Ahmad et al. (2012), o método Marshall é o mais utilizado nos países de clima tropical para o projeto de misturas asfálticas (KHEDR; SAUDY, 2016; ALMEIDA JR, 2018).

O método Superpave foi desenvolvido no ano de 1993 pelo *Strategic Highway Research Program* (SHRP). Esse método, segundo Liu et al. (2018), consiste em três etapas principais, a saber: (1) grau de desempenho do asfalto, que depende de uma gama de graus de temperatura e ajuste de acordo com as características do tráfego; (2) critérios de graduação do agregado, com mais restrições que o método Marshall; (3) procedimento da mistura asfáltica, através do qual simulam-se as condições de campo e desempenho, conseqüentemente considerando as condições climáticas e de tráfego.

As principais diferenças entre as misturas asfálticas dosadas pelos métodos Marshall e Superpave são a graduação dos agregados minerais e o processo de compactação, uma vez que o método Marshall utiliza a compactação por impacto (golpes) e o Superpave utiliza a compactação por amassamento (giros).

A sobreposição de uma nova camada asfáltica sobre outra já existente tem seu desempenho marcado pelas fraquezas estruturais do pavimento antigo subjacente (RODRIGUES, 1991). Como o pavimento flexível é composto por camada de ligação ou binder (faixa granulométrica B) e a camada de revestimento (faixa granulométrica C), a qual sofre maior influência das cargas do tráfego, tem-se buscado materiais que forneçam um incremento na vida de serviço destes revestimentos asfálticos, atuando como elemento de reforço.

Atualmente, novos materiais vêm sendo desenvolvidos para prolongar a vida de serviço dos pavimentos asfálticos, um destes são as geogrelhas para reforço de novas camadas asfálticas e principalmente nas restaurações de pavimentos antigos. As geogrelhas quando instaladas entre uma camada asfáltica trincada e uma nova camada asfáltica subrejacente, constituem-se como uma barreira à propagação de trincas por reflexão da camada antiga. A inclusão de uma geogrelha como camada intermediária tem como principal finalidade o alívio das tensões de tração das camadas asfálticas provocadas pela passagem do tráfego (NEJAD; ASADI; FALLAH; VADOOD, 2016). Portanto, o controle do trincamento no pavimento é fundamental para os bons desempenhos funcional e estrutural do mesmo, assim como para a eficiência econômica da restauração do pavimento.

Neste contexto, esta pesquisa busca avaliar a utilização de geogrelhas como camada intermediária de reforço de misturas asfálticas à quente, através de parâmetros como rigidez e fadiga, de modo a se apresentar análises comparativas do comportamento mecânico do pavimento com e sem geogrelha.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Visando entender o comportamento mecânico relativo à interação de diferentes geogrelhas em misturas asfálticas dosadas tanto pelo método Marshall quanto pelo método Superpave para granulometrias nas faixas granulométricas C e B da especificação de serviço ES 031 (DNIT, 2006), este trabalho realizará ensaios em laboratório sobre corpos de prova moldados, inclusive de forma composta, isto é metade superior na faixa granulométrica C (rolamento) e a metade inferior na faixa granulométrica B (binder) e análise numérica com base nas respostas mecânicas obtidas.

1.2.2 Objetivos Específicos

Para se atingir o objetivo geral foram estipulados os seguintes objetivos específicos:

- Determinar os teores de projeto pelos métodos de dosagem Marshall e Superpave para as misturas asfálticas nas duas faixas granulométricas utilizadas.
- Para os teores de projeto obtidos através dos métodos de dosagem Marshall e Superpave, avaliar o comportamento mecânico quanto, ao módulo de resiliência, resistência à tração por compressão diametral, fadiga a tensão controlada e creep estático.
- Moldagem dos corpos de prova compostos (metade superior na faixa granulométrica C e a metade inferior na faixa granulométrica B) para os dois métodos (Marshall e Superpave) nos teores de projeto das misturas asfálticas.
- Analisar o comportamento mecânico dos corpos de prova compostos quanto a incorporação ou não de uma geogrelha na interface entre duas faixas granulométricas estudadas.
- Avaliação comparativa dos resultados das propriedades mecânicas dos corpos de prova das misturas asfálticas simples e compostas através de três softwares [ELSYM5, *me*-PADS (v1.1) e AEMC/MeDiNa 2018], visando analisar as respostas estruturais de um pavimento flexível adotado.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Além deste capítulo introdutório, outros cinco capítulos e três apêndices compõem este trabalho. Na sequência, com o propósito de facilitar o entendimento e compreensão do trabalho, são comentados de forma sucinta as partes integrantes.

Capítulo 1, INTRODUÇÃO, é feita a apresentação do trabalho através do contexto geral e dos parâmetros adotados e são definidos os objetivos.

No capítulo 2, intitulado MATERIAIS E MÉTODOS, são apresentadas as características dos materiais estudados, agregados minerais, cimento asfáltico de petróleo (CAP), e as geogrelhas. Além das informações a respeito da origem dos materiais empregados, este capítulo traz os procedimentos seguidos na parte experimental com relação aos ensaios de caracterização, dosagem das misturas asfálticas e os ensaios mecânicos (módulo de resiliência, resistência à tração por compressão diametral, fadiga e creep estático). Também é descrito a análise estrutural realizada com o software *me-PADS (Mechanistic Empirical Pavement Analysis and Design Software)*, que envolveu a estimativa da tensão e deformação na estrutura de um pavimento flexível adotado.

No capítulo 3, intitulado AVALIAÇÃO COMPARATIVA DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS MISTURAS ASFÁLTICAS SIMPLES E COMPOSTAS, são apresentadas em forma de artigo as análises comparativas das respostas estruturais de um pavimento flexível adotado, desenvolvido com o auxílio de três softwares de análise de sistemas elásticos de múltiplas camadas, ELSYM5, *me-PADS (v1.1)* e AEMC/MeDiNa 2018. Neste capítulo, mostra-se ainda a conclusão referente a esta avaliação comparativa entre os softwares.

No capítulo 4, intitulado AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS ASFÁLTICAS COMPOSTAS DOSADAS PELO MÉTODO MARSHALL REFORÇADAS COM GEOGRELHA, são apresentadas as análises mecânicas das misturas asfálticas dosadas pelo método Marshall com e sem a inserção das geogrelhas na interface entre as misturas asfálticas nas faixas granulométricas C e B. Descrevem-se ainda neste capítulo os procedimentos adotados para a confecção dos corpos de prova compostos por misturas asfálticas dosadas para as faixas granulométricas C e B, com e sem a inserção de geogrelha na interface das misturas asfálticas a quente. Neste capítulo mostra-se ainda as principais conclusões referentes a este estudo.

No capítulo 5, intitulado AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS ASFÁLTICAS COMPOSTAS DOSADAS PELO MÉTODO SUPERPAVE REFORÇADAS COM GEOGRELHA, são apresentadas as análises mecânicas das misturas asfálticas dosadas pelo método Superpave com e sem a inserção das geogrelhas na interface entre as misturas asfálticas nas faixas granulométricas C e

B. Descrevem-se ainda neste capítulo os procedimentos adotados para a confecção dos corpos de prova compostos por misturas asfálticas dosadas para as faixas granulométricas C e B, com e sem a inserção de geogrelha na interface das misturas asfálticas a quente, além das principais conclusões referentes a este estudo.

No capítulo 6, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES, são apresentadas, a partir dos resultados alcançados, as conclusões gerais da pesquisa, uma vez que as conclusões específicas para cada estudo estão descritas nos capítulos correspondentes.

Por fim, nos APÊNDICES A, B e C, são devidamente apresentados os resultados dos ensaios mecânicos das misturas asfálticas, das faixas granulométricas C e B, dosadas pelos métodos Marshall e Superpave, realizados o entendimento das propriedades mecânicas destas misturas separadamente.

No apêndice A, INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DO TEOR DE LIGANTE DE PROJETO E DO MÉTODO DE DOSAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS NA SENSIBILIDADE ESTRUTURAL DE UM PAVIMENTO ASFÁLTICO, apresenta-se a resposta estrutural de um pavimento asfáltico em função da variação do módulo de resiliência obtido através das dosagens Marshall e Superpave. São analisadas neste capítulo a sensibilidade do comportamento das misturas asfálticas quanto ao módulo de resiliência (MR) e resistência à tração por compressão diametral (RT), para quatro misturas asfálticas à quente, sendo duas enquadradas na faixa granulométrica C e duas na faixa granulométrica B. Foi realizado ainda neste capítulo, uma análise de um pavimento flexível adotado aplicando os valores de MR e RT, com o auxílio do software *me-PADS*. São apresentadas ainda as principais conclusões referentes a este estudo.

No apêndice B, ANÁLISE MECÂNICO-EMPÍRICO DE UM PAVIMENTO FLEXÍVEL EM FUNÇÃO DO FENÔMENO DE FADIGA, é apresentada neste apêndice a resposta estrutural de um pavimento asfáltico em função da sua vida de fadiga de quatro misturas asfálticas a quente, sendo duas enquadradas na faixa granulométrica C e duas na faixa granulométrica B. Neste capítulo, também foi feita a verificação da vida de fadiga do pavimento tipo analisado com o auxílio do software *me-PADS*. São apresentadas ainda as principais conclusões referentes a este estudo.

No apêndice C, DEFORMAÇÃO PERMANENTE DE MISTURAS ASFÁLTICAS A QUENTE DOSADAS PELOS MÉTODOS MARSHALL E SUPERPAVE, são apresentados o ensaio de creep estático de quatro misturas asfálticas a quente, sendo duas enquadradas na faixa granulométrica C e duas na faixa granulométrica B, dosadas

pelos métodos Marshall e Superpave. Mostra-se neste capítulo os resultados do ensaio de creep para as quatro misturas asfálticas analisadas e as principais conclusões obtidas neste estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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.

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.

ALMEIDA JR.; BOEIRA, F.D.; SPECHT, L.P; CERVO, T.C.; PEREIRA, D.S.; CENTOFANTE, R.; BARBOSA JR., V.; SILVA, C.C.. Avaliação Laboratorial do Tipo e Teor de Ligante e da Granulometria na Deformação Permanente de Misturas Asfálticas. **TRANSPORTES**. v. 26. n. 2. 2018.

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

KHEDR, S.; SAUDY, M.. Superpave versus Conventional Techniques for Designing Normal and Modified Asphalt Mixes. **Interaction between Theory and Practice in Civil Engineering and Construction**. Edited by Komurlu, R., Gurgun, A. P., Singh, A., and Yazdani, S.. p. 103-108. 2016.

LIU, S.; CAO, W.; LI, X.; SUN, C.. Principle Analysis of Mix Design and Performance Evaluation on Superpave Mixture Modified with Buton Rock Asphalt. **Construction and Building Materials**. v. 176 p. 549–555. 2018.

NEJAD, F.M.; ASADI, S.; FALLAH, S.; VADOOD, M., Statistical-experimental study of geosynthetics performance on reflection cracking phenomenon. **Geotextiles and Geomembranes**. n. 44, p. 178-187. 2016.

RODRIGUES, R.M. **Estudo do Trincamento dos Pavimentos**. Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro. 1991.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

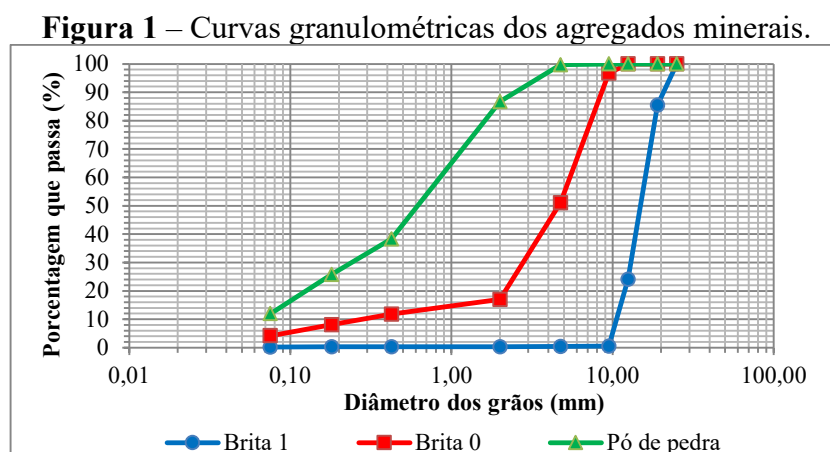
O programa experimental foi conduzido de maneira a possibilitar uma análise da sensibilidade estrutural de um pavimento asfáltico flexível adotado com o auxílio do software *Mechanistic Empirical Pavement Analysis and Design Software* (me-PADS v1.1), que utiliza o sistema de camadas elástico-lineares. Para atendimento ao objetivo geral desse estudo, foi necessário obter os parâmetros mecânicos de misturas asfálticas dosadas pelos métodos Marshal, e Superpave. As propriedades mecânicas das misturas asfálticas estudadas foram o módulo de resiliência, resistência à tração a tensão controlada, fadiga por compressão diametral e o ensaio de creep estático.

2.2 MATERIAIS

2.2.1 Agregados minerais

Os agregados minerais (brita 1, brita 0 e pó de pedra) empregados nessa pesquisa são de formação gnáissica, oriundos de uma jazida localizada na microrregião de Viçosa, no município de Ervália, estado de Minas Gerais, Brasil.

As granulometrias dos agregados minerais foram determinadas conforme o método de ensaio ME 083 (DNER, 1998c) (Figura 1). Na Tabela 1, são apresentados os resultados de caracterização física dos agregados minerais, verificando-se que os resultados obtidos estão dentro dos limites estabelecidos na especificação de serviço ES 031 (DNIT, 2006b).



Fonte: Os Autores (2019).

Tabela 1 – Resultados dos ensaios de caracterização dos agregados minerais utilizados na pesquisa.

ENSAIO	Norma	UNID.	RESULTADOS		
			Brita 1	Brita 0	Pó de pedra
Determinação da abrasão “Los Angeles”	ME 035 (DNER, 1998a)	%	45	45	-
Absorção do agregado graúdo	ME 081 (DNER, 1998b)	%	1,14	1,14	-
Massa específica aparente		g/cm ³	2,722	2,722	
Massa específica real	ME 194 (DNER, 1998d)	g/cm ³	2,794	2,794	-
Massa específica real de agregados miúdos por meio do frasco Chapman		g/cm ³	-	-	2,794
Material pulverulento		ME 266 (DNER, 1997)	%	16,66	
Índice de forma dos agregados graúdos	ME 086 (DNER, 1994d)	-	0,68	0,68	-
Adesividade dos agregados graúdos ao ligante asfáltico	ME 078 (DNER, 1994c).	-	Satisfatório com 0,10% de aditivo orgânico		

Fonte: Os Autores (2019).

2.2.2 Ligante asfáltico

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, Minas Gerais, Brasil.

Na Tabela 2, são apresentados os ensaios de caracterização do ligante asfáltico (CAP 50/70) e os respectivos resultados.

Tabela 2: Resultados dos ensaios de caracterização do ligante asfáltico (CAP 50/70) empregados.

ENSAIO	NORMA	VALORES LIMITES (*)	RESULTADOS	UNID.
Penetração	ME 155 (DNIT, 2010b)	50 a 70	56.93	mm
Viscosidade Saybolt-Furol a 135 °C, mín	ME 004 (DNER, 1994a)	141	170 segundos e 34 milésimos	sSF
Ponto de amolecimento	ME 131 (DNIT, 2010a)	Min. 46	51	°C
Ponto de fulgor	ME 148 (DNER, 1994e)	Min. 235	343	°C
Ponto de combustão		-	365	°C
Massa específica	ME 193 (DNER, 1996).	-	1,010	g/cm ³
Densidade relativa		-	1,006	

(*) Valores limites recomendados pela especificação de materiais EM 095 (DNIT, 2006a)

Fonte: Os Autores (2019).

Observa-se que os resultados da caracterização do ligante asfáltico utilizado estão dentro dos limites estabelecidos na especificação de materiais EM 095 (DNIT, 2006a).

2.2.3 Geogrelhas

Como a finalidade principal desta pesquisa é avaliar a influência de diferentes tipos de geogrelhas no reforço de revestimentos asfálticos, foram incorporados três tipos de geogrelhas entre as camadas asfálticas, nos corpos de provas a serem ensaiados, a saber: poliálcool vinílico (PVA), fibra de vidro (FV) e poliéster (PET). As geogrelhas utilizadas foram fornecidas pela empresa Huesker Ltda, localizada no município de São José dos Campos, São Paulo, Brasil.

Na Tabela 3, são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização das geogrelhas utilizadas e os respectivos resultados.

Tabela 3 – Resultados dos ensaios de caracterização das geogrelhas conforme a norma NBR ISO 10319 (ABNT, 2013).

Propriedades	Unid.	Geo 1	Geo 2	Geo 3
Matéria-prima principal	-	PVA	FV	PET
Abertura da malha	mm	40 x 40		
Resistência à tração				
Longitudinal	kN/m	54,9	64,6	53,6
Transversal		63,1	60,9	55,7
Deformação na resistência à tração				
Longitudinal	%	5,9	2,4	9,3
Transversal		5,8	2,1	9,9
Resistência à tração a 2% de deformação				
Longitudinal	kN/m	15,9	56,5	12,2
Transversal		17,6	57,7	12,4

Fonte: Os Autores (2019).

2.3 MÉTODOS

2.3.1 Dosagens de Misturas Asfálticas

Nesta pesquisa, utilizaram-se quatro composições granulométricas contínuas para misturas asfálticas densas, sendo duas enquadradas na faixa granulométrica C e duas na faixa granulométrica B, da especificação de serviço ES 031 (DNIT, 2006b). As misturas asfálticas das composições granulométricas 1 e 2 dosadas pelo método Marshall, conforme os métodos de ensaio ME 043 (DNER, 1995) e D6926 (ASTM, 2016), e inserem-se nas faixas granulométricas C e B, respectivamente. As composições granulométricas 3 e 4 das misturas asfálticas foram dosadas pelo método Superpave (Nível 1), conforme as recomendações SA-95-003 (FHWA, 1995), A-407 (SHRP, 1994)

e R 35-14 (AASHTO, 2014), e também, estão inseridas nas granulometrias C e B, respectivamente, da especificação de serviço ES 031 (DNIT, 2006b) de modo que as composições granulométricas atendem aos critérios estabelecidos nas normas técnicas supracitadas quanto ao tamanho nominal máximo (TNM) de 19,0mm.

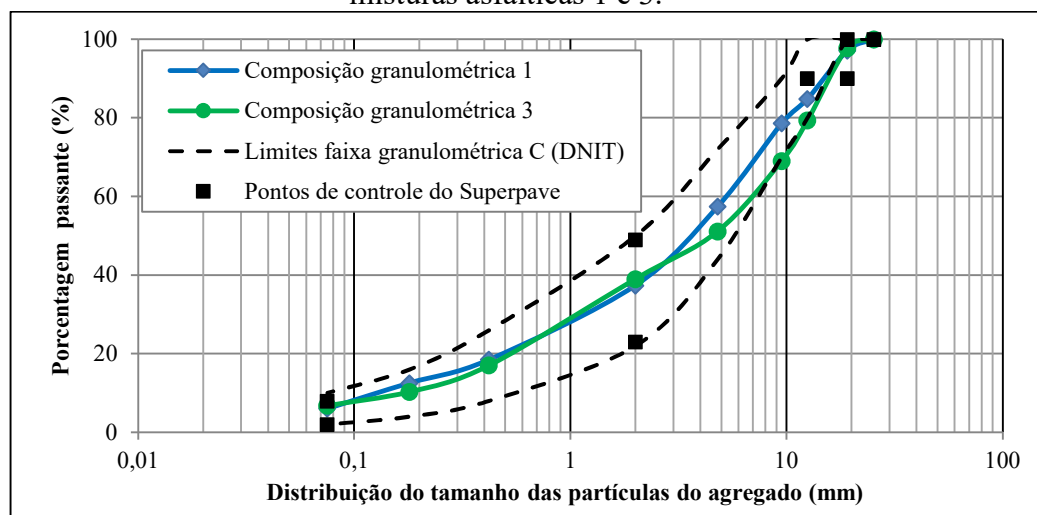
2.3.1.1 Mistura granulométrica

Após a caracterização dos agregados naturais, escolheram-se duas faixas granulométricas de trabalho contidas na especificação de serviço ES 031 (DNIT, 2006b), a saber: (i) faixa granulométrica C, utilizada como camada de revestimento; e (ii) faixa granulométrica B, utilizada como camada de ligação ou binder.

As granulometrias estudadas foram escolhidas de modo a se enquadrarem na especificação de serviço ES 031 (DNIT, 2006b), para as misturas asfálticas dosadas pelo método Marshall, e nas especificações das normas técnicas A-407 (SHRP, 1994), SA-95-003 (FHWA, 1995), e R 35-14 (AASHTO, 2014), para as misturas asfálticas dosadas pelo método Superpave.

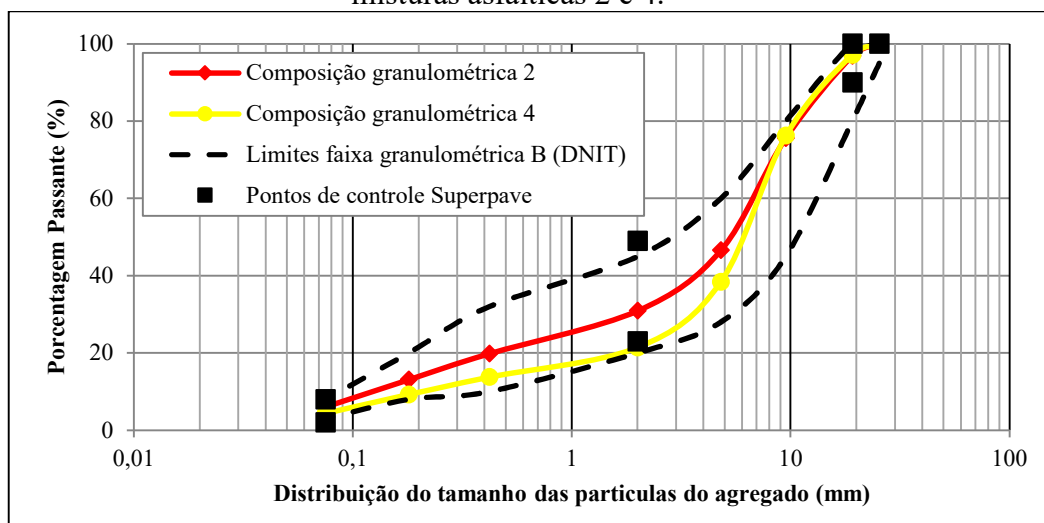
Na Figura 2, têm-se as curvas granulométricas da faixa de serviço C, para as misturas asfálticas 1 e 3, e na Figura 3 são apresentadas as curvas granulométricas da faixa de serviço B, para as misturas asfálticas 2 e 4.

Figura 2 – Curvas granulométricas estudadas para a faixa granulométrica C para as misturas asfálticas 1 e 3.



Fonte: Os Autores (2019).

Figura 3 – Curvas granulométricas estudadas para a faixa granulométrica B para as misturas asfálticas 2 e 4.



Fonte: Os Autores (2019).

2.3.2 Dosagens Marshall

Para as misturas concebidas pelo método de dosagem Marshall foram moldados corpos de prova com cinco teores de ligante asfáltico e analisado o seu comportamento segundo a ES 031 (DNIT, 2006b) para cada um desses teores. Os teores adotados para a faixa C foram 4,0%, 4,5%, 5,0%, 5,5% e 6,0% e para a faixa B foram 3,5%, 4,0%, 4,5%, 5,0% e 5,5%, baseado na experiência de misturas asfálticas já produzidas em outras pesquisas para os mesmos materiais e agregados (TINAJEROS, 2016; PEREIRA, 2019). Para cada teor de ligante asfáltico analisado, foram produzidos três corpos de prova.

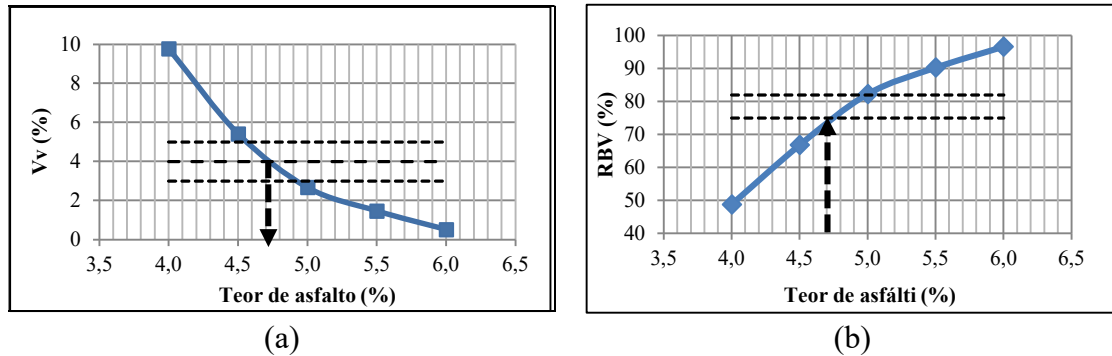
Segundo a ES 031 (DNIT, 2006b), o teor de projeto do ligante asfáltico utilizado para a mistura asfáltica da faixa granulométrica C deve atender aos critérios de volume de vazios (V_v) entre 3% e 5% e relação betume vazios (RBV) entre 75% e 82%. Para a mistura asfáltica da faixa granulométrica B, os critérios segundo esta mesma especificação são: volume de vazios entre 4% e 6% e relação betume vazios entre 65% e 72%.

2.3.2.1 Mistura asfáltica 1

O valor do teor de projeto de ligante asfáltico utilizado para a mistura asfáltica 1 (composição granulométrica 1) foi determinado através da análise gráfica da variação dos volumes de vazios (V_v), sendo o critério de escolha V_v igual a 4%, que corresponde à média da recomendação ES 031 (DNIT, 2006b). Desta forma, para a mistura asfáltica 1,

o valor do teor de ligante de projeto encontrado para o V_v igual a 4% foi de 4,7%; para esse teor de ligante, o RBV foi de 76%, conforme se apresenta na Figura 4.

Figura 4 – Gráficos utilizados para a definição do teor ótimo de ligante asfáltico da mistura 1: (a) volume de vazios (V_v) versus teor de asfalto; (b) relação betume-vazios (RBV) versus teor de asfalto.

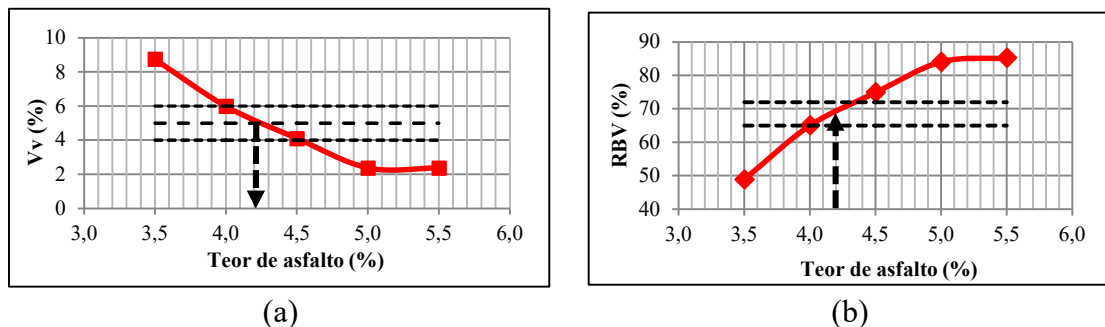


Fonte: Os Autores (2019).

2.3.2.2 Mistura asfáltica 2

O valor do teor de projeto de ligante asfáltico para a mistura asfáltica 2 (composição granulométrica 2) foi determinado através da análise gráfica da variação dos volumes de vazios (V_v), sendo o critério de escolha V_v igual a 5%, que corresponde à média da recomendação ES 031 (DNIT, 2006b). Desta forma, para a mistura asfáltica 2, o valor de teor de ligante de projeto encontrado para V_v igual 5% foi de 4,2%; para esse teor de ligante, o RBV foi de 70,4%, conforme ilustrado na Figura 5.

Figura 5 – Gráficos utilizados para a definição do teor ótimo de ligante asfáltico da mistura asfáltica 2: (a) volume de vazios versus teor de asfalto e (b) relação betume-vazios versus teor de asfalto.



Fonte: Os Autores (2019).

2.3.3 Dosagens Superpave

A determinação do teor de ligante asfáltico para a dosagem Superpave foi feita a partir da compactação de três corpos de prova com teores de ligante inicial (Pl_i) de 5,0%

para as misturas asfálticas das faixas C e B. Foram também compactados corpos de prova com teores de ligante variando de $\pm 0,5\%$ e $+1,0\%$ em relação ao Pli.

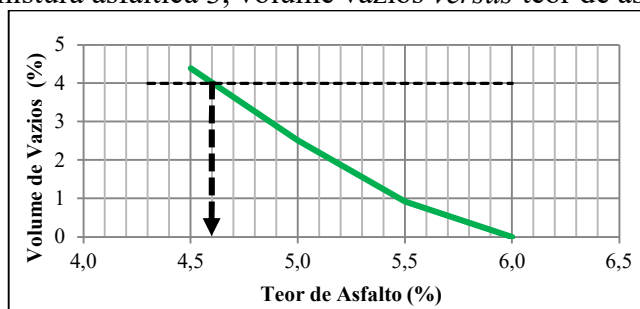
Após o período de envelhecimento de curto prazo das misturas asfálticas analisadas, foi realizada a compactação dos corpos de prova para a determinação dos seus respectivos teores de ligante de projeto. A compactação foi realizada para $N_{projeto}$ igual a 100 giros (rodovia com tráfego médio a alto, conforme SHRP, 2014; FHWA, 1995; AASHTO, 2014). Estas dosagens foram realizadas de acordo com o procedimento Superpave Nivel 1 - R 35-14 (AASHTO, 2014).

Para a determinação do teor de ligante asfáltico de projeto das misturas asfálticas, foram traçadas curvas do volume de vazios *versus* teor de ligante asfáltico inicial, para cada mistura asfáltica analisada, que permitiu determinar a quantidade necessária de ligante asfáltico para que a mistura asfáltica atendesse aos requisitos volumétricos descritos no método Superpave, segundo a SA-95-003 (FHWA, 1995). O valor do teor de ligante asfáltico de projeto para a mistura asfáltica é aquele correspondente ao Vv de 4% (FHWA, 1995).

2.3.3.1 Mistura asfáltica 3

A mistura asfáltica 3 (composição granulométrica 3) enquadra-se na faixa granulométrica C de projeto da ES 031 (DNIT, 2006b). Para cada teor analisado, foram moldados três corpos de prova. O valor do teor de projeto de ligante asfáltico para a mistura asfáltica 3 foi conhecido através da análise gráfica da variação dos volumes de vazios (Vv) em função do teor de ligante asfáltico, sendo o critério de escolha Vv igual a 4%. Desta forma, o valor do teor de projeto do ligante asfáltico determinado para a mistura asfáltica 3 foi de 4,6% e o RBV foi de 75,1%. Na Figura 6, apresentam-se as relações volume de vazios *versus* teor de asfalto para a amostra de agregado mineral com tamanho máximo nominal (TMN) igual a 19 mm.

Figura 6 – Gráfico utilizado para a determinação do teor de projeto de ligante asfáltico da mistura asfáltica 3, volume vazios *versus* teor de asfalto.

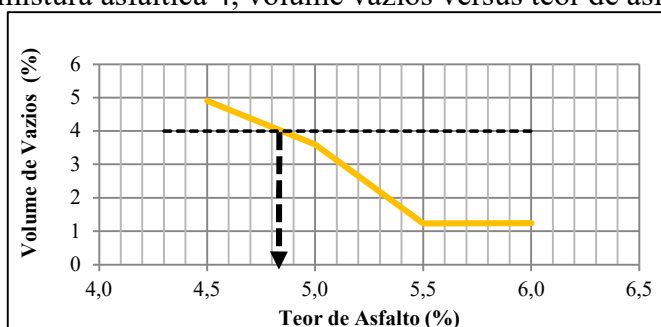


Fonte: Os Autores (2019).

2.3.3.2 Mistura asfáltica 4

A mistura asfáltica 4 (composição granulométrica 4) enquadra-se na faixa granulométrica B de projeto da ES 031 (DNIT, 2006b). Foram moldados, para cada teor analisado, três corpos de prova. O valor do teor de projeto de ligante asfáltico para a mistura asfáltica 4 foi conhecido através da análise gráfica da variação dos volumes de vazios (V_v) em função do teor de ligante, sendo o critério de escolha V_v igual 4%. Desta forma, o valor do teor de projeto de ligante asfáltico para a mistura asfáltica 4 foi de 4,85% e o RBV foi de 71,4%. Na Figura 7, apresentam-se as relações volume de vazios *versus* teor de asfalto para a amostra com tamanho máximo nominal (TMN) igual a 19 mm.

Figura 7 – Gráfico utilizado para a determinação do teor de projeto de ligante asfáltico da mistura asfáltica 4, volume vazios versus teor de asfalto.



Fonte: Os Autores (2019).

2.3.4 Ensaios de Desempenho das Misturas Asfálticas

Após a determinação dos teores de ligante de projeto das respectivas misturas asfálticas, segundo as especificações de cada método de dosagem utilizado, foram confeccionados corpos de prova e realizados ensaios mecânicos [estabilidade e fluência Marshall, módulo de resiliência (MR), resistência à tração por compressão diametral (RT), fadiga e creep estático]. Para as misturas asfálticas estudadas, as moldagens dos corpos de prova foram feitas segundo o método Marshall de compactação por impacto e o método Superpave de compactação por amassamento.

2.3.4.1 Estabilidade e fluência Marshall

Foram realizados ensaios de laboratório para a determinação das propriedades mecânicas estabilidade e fluência Marshall de corpos de prova das misturas asfálticas dosadas pelos métodos Marshall e Superpave, conforme recomendações dos métodos de ensaio ME 043 (DNER, 1995) e D6927 (ASTM, 2015).

Na Figura 8, é apresentado o equipamento para a realização dos ensaios estabilidade e fluência Marshall.

Figura 8 – Equipamento utilizado para a realização dos ensaios de estabilidade e fluência Marshall.



Fonte: Os Autores (2019).

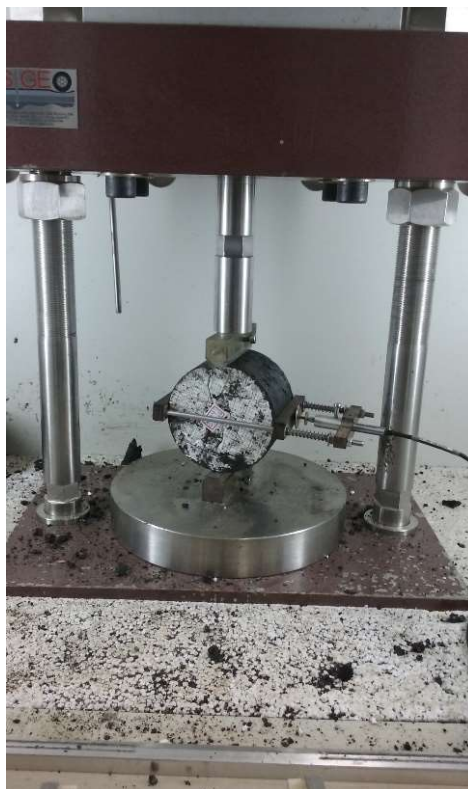
2.3.4.2 Módulo de resiliência

Foram realizados ensaios para a determinação dos valores dos módulos de resiliência dos corpos de prova das misturas asfálticas analisadas segundo os métodos de ensaio ME 135 (DNIT, 2018a) e D7369 (ASTM, 2011). Os módulos de resiliência (MR) foram determinados para corpos de prova moldados em laboratório com o compactador Marshall e com o compactador giratório Superpave, a uma temperatura de ensaio de 25 °C, e os resultados foram obtidos através da leitura do deslocamento resiliente instantâneo. Estes resultados estão apresentados nos Capítulos 3, 4 e 5 e Apêndices A, B e C.

Para as tensões empregadas nos ensaios, levou-se em consideração o valor de tensão do ensaio de resistência à tração por compressão diametral (RT), com valor máximo de 15% desta resistência, a depender da mistura asfáltica analisada.

Na Figura 9, é mostrado a montagem do corpo de prova para a realização do ensaio de módulo de resiliência.

Figura 9 – Equipamento utilizado para a realização do ensaio de módulo de resiliência (MR).



Fonte: Os Autores (2019).

2.3.4.3 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral

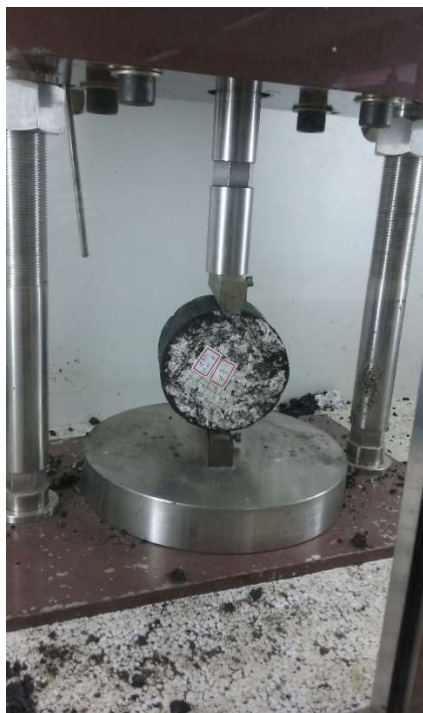
Foram realizados ensaios de resistência à tração por compressão diametral (RT) em corpos de provas das misturas asfálticas analisadas e dosadas pelos métodos Marshall e Superpave de acordo com os métodos de ensaio ME 136 (DNIT, 2018b) e D6931 (ASTM, 2017), sendo as rupturas desses corpos de prova feitas à velocidade recomendada no ensaio Marshall (0,83 mm/s). Os resultados da resistência à tração por compressão diametral (RT) estão apresentados nos Capítulos 3, 4 e 5 e Apêndices A e B.

2.3.4.4 Ensaio de fadiga por compressão diametral

Foram realizados ensaios de laboratório para a determinação de valores de fadiga por compressão diametral com tensão controlada de corpos de prova das misturas asfálticas dosadas pelo método Marshall e Superpave, aplicando-se carregamentos de 15%, 20%, 25%, 30%, 35% e 40% da tensão de ruptura do corpo de prova obtido no ensaio de resistência à tração por compressão diametral (RT), e em conformidade com o método de ensaio ME 183 (DNIT, 2018c).

Na Figura 10, é apresentado o equipamento utilizado para a realização do ensaio de fadiga, conforme o método de ensaio ME 183 (DNIT, 2018c).

Figura 10 – Equipamento utilizado para a realização do ensaio de fadiga.



Fonte: Os Autores (2019).

A estimativa da vida de fadiga (VF) de misturas asfálticas em laboratório é expressa pelo número de sollicitação, relacionado à diferença de tensões ($\Delta\sigma$) em gráfico mono-log empregando-se a Equação 1, onde as constantes k_1 e k_2 são obtidas através da regressão das curvas de fadiga. A diferença de tensões ($\Delta\sigma$) é calculada através da Equação 2. As constantes da vida de fadiga das misturas asfálticas estudadas estão apresentadas nos Capítulos 3, 4 e 5 e Apêndice B e D.

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

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

Em que:

VF: número de ciclos de vida em 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 obtidas na regressão linear.

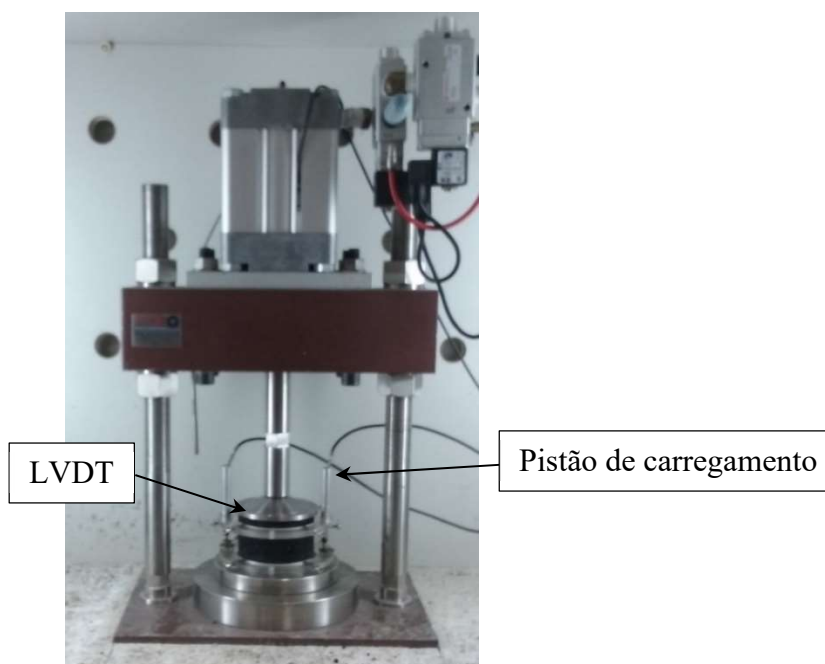
2.3.4.5 Ensaio de creep estático

Foram realizados os ensaios de creep estático de quatro misturas asfálticas analisadas, em que os corpos de prova de duas delas foram moldados no compactador Marshall e os corpos de prova das outras duas no compactador giratório Superpave, ambas utilizando-se das faixas granulométricas C e B.

Os ensaios de creep estático consistem na aplicação de uma carga de compressão estática e contínua sobre os corpos de prova cilíndricos (Figura 11). Os ensaios foram realizados nas condições: (i) temperatura a 40°C; (ii) aplicação de uma carga estática durante um tempo de 60 minutos e 15 minutos de repouso; e (iii) carregamento aplicado de 81,07 kgf, valor correspondente a uma tensão de compressão da ordem de 1,0 kgf/cm².

Os carregamentos e deslocamentos axiais do corpo de prova que ocorrem durante o ensaio foram medidos por dois medidores do tipo LVDT (*linear variable differential transducer*). Os deslocamentos axiais foram determinados pela média aritmética entre as leituras fornecidas pelos LVDTs.

Figura 11 – Equipamento para a realização do ensaio de creep estático.



Fonte: Os Autores (2019).

Com as leituras dos carregamentos e deslocamentos axiais sofridos pelos corpos de prova durante o ensaio de creep estático foi possível obter os indicadores que permitem analisar a sensibilidade do corpo de prova da mistura asfáltica à deformação permanente, sendo eles: a deformação total (D_t) média durante todo o ensaio (4500 segundos), que é apresentada na Equação 3; o módulo de fluência (M_f) após o período de recuperação do

corpo de prova da mistura asfáltica (4500 segundos), conforme apresentado na Equação 4; e a inclinação do estágio secundário da curva (I_{curva}) de deformação versus tempo de carregamento, de acordo com a Equação 5 (BERNUCCI, 2008).

O módulo de fluência (equação 4) é usado para determinar a capacidade da mistura asfáltica de resistir à deformação em determinado nível de tensão. Como este parâmetro está relacionado ao nível de tensão aplicado sobre o corpo de prova e com a deformação total após o término do ensaio ($t=4500$ segundos), observa-se que quanto maior o valor para M_f maior será a capacidade dessa mistura asfáltica de resistir a deformações permanentes.

A inclinação média da curva de fluência, obtida através da equação 5, mostra a velocidade com que a fluência ocorre, ou seja, o comportamento mecânico de uma mistura asfáltica é melhor quanto menor for a inclinação da curva de fluência. Portanto, quanto maior o valor deste parâmetro maior a suscetibilidade da mistura asfáltica a uma velocidade de deformação mais elevada. Estes resultados estão apresentados nos Capítulos 4 e 5 e Apêndice C.

$$D_t = \frac{\Delta h_{4500}}{h_0} \quad (3)$$

$$M_f = \frac{\sigma}{D_t} \quad (4)$$

$$I_{curva} = \frac{\log(\epsilon_{3600}) - \log(\epsilon_{1000})}{\log(3600) - \log(1000)} \quad (5)$$

Em que:

D_t : deformação total (mm/mm);

Δh_{4500} : variação da altura do corpo de prova, após o período de recuperação (4500s);

Δh_0 : medida inicial da altura do corpo de prova (mm);

M_f : módulo de fluência após o período de recuperação;

σ : nível de tensão do ensaio (MPa);

ϵ_{3600} : deformação para 3600 segundos de ensaio (mm);

ϵ_{1000} : deformação para 1000 segundos de ensaio (mm).

2.3.5 Análise Estrutural do Pavimento Flexível Adotado

A análise estrutural do pavimento flexível adotado foi realizada por meio do software *me-PADS* (*Mechanistic Empirical Pavement Analysis and Design Software*). Adotou-se um pavimento flexível constituído de camada de rolamento (capa asfáltica), camada de ligação (binder), base granular e reforço do subleito, a fim de se verificar as tensões, deformações e deslocamentos desta estrutura para diferentes misturas asfálticas, analisadas segundo os métodos de dosagem utilizados. Os dados de entrada desse

software foram: (i) propriedades das camadas estruturais (espessura, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson), (ii) localização e magnitude das cargas; e (iii) 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 estruturais realizadas.

A seguir são apresentados os níveis de carregamento utilizados nessa pesquisa:

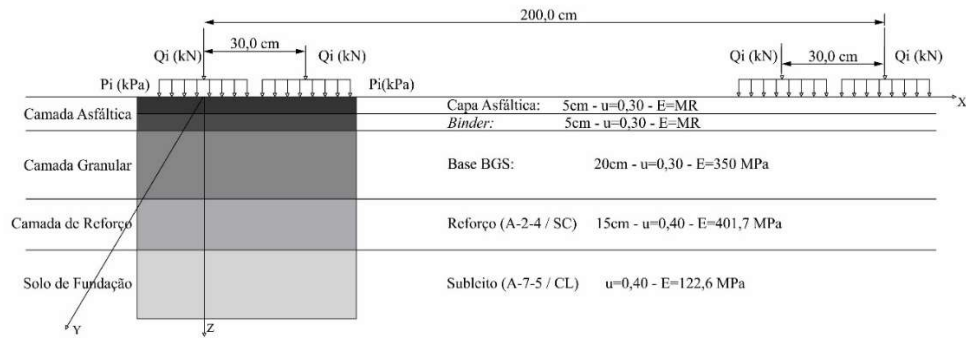
- i. $Q_1 = 80 \text{ kN}$ (8,2 tf): carga correspondente ao eixo padrão de 18.000 lb, considerada baixa;
- ii. $Q_2 = 98 \text{ kN}$ (10,0 tf): carga máxima permitida pela legislação brasileira para eixo simples de rodas duplas;
- iii. $Q_3 = 118 \text{ kN}$ (12,0 tf): 20% acima da carga máxima permitida pela legislação brasileira, sendo que 10% da carga máxima permitida é o limite de tolerância legal. Adotou-se a carga de 20% acima da permitida para avaliar os eventuais danos nos pavimentos flexíveis quando há excesso de carga nos eixos de veículos comerciais.

Da mesma forma, foram utilizados três níveis de pressão de enchimento de pneus, conforme apresentado a seguir:

- i. $P_1 = 563 \text{ kPa}$ (80 psi): pressão-padrão de enchimento de pneus utilizada na pista experimental da AASHTO de 1958 a 1961 e normalizada para a determinação da deflexão superficial do pavimento, conforme o método de ensaio ME 024 (DNER, 1994b), que tem sido adotada em diversos métodos de dimensionamento de pavimentos flexíveis;
- ii. $P_2 = 633 \text{ kPa}$ (90 psi): pressão de enchimento de pneus considerada média;
- iii. $P_3 = 703 \text{ kPa}$ (100 psi): pressão de enchimento de pneus considerada alta.

A Figura 12 apresenta um esquema do pavimento flexível adotado para a análise das tensões e deformações em alguns pontos de suas camadas e o carregamento 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).

Figura 12 – Pavimento flexível adotado para as análises estruturais.

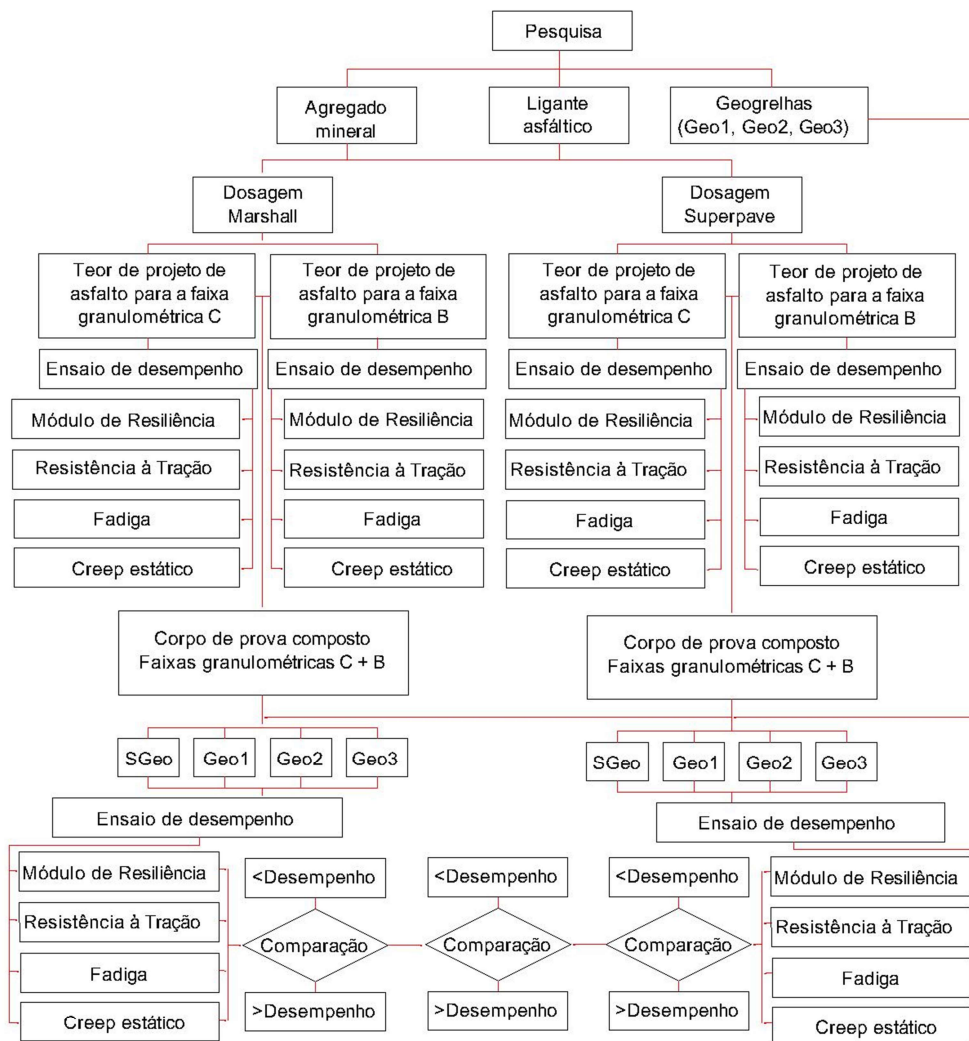


Fonte: Os Autores (2019).

2.3.6 Etapas do Desenvolvimento da Pesquisa

Na Figura 13, está representada em forma de fluxograma as etapas do desenvolvimento desta pesquisa.

Figura 13 – Fluxograma das etapas da pesquisa



Fonte: Os Autores (2019).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 10319**. Geossintéticos - Ensaio de faixa larga. Rio de Janeiro. 2013. 11p.

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

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D6926-16**, Standard Practice for Preparation of Asphalt Mixture Specimens Using Marshall Apparatus, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D6931-17**, Standard Test Method for Indirect Tensile (IDT) Strength of Asphalt Mixtures. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D7369-11**, Standard Test Method for Determining the Resilient Modulus of Bituminous Mixtures by Indirect Tension Test, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011.

BERNUCCI, L.B.; MOTTA, L.M.G.; CERATTI, J.A.P; SOARES, J.B. **Pavimentação Asfáltica, Formação Básica para Engenheiro**. Rio de Janeiro. Petrobrás, ABDA. 2008. 504p.

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 004**: Material betuminoso – determinação da viscosidade Saybolt-Furol a alta temperatura método da película delgada. Método de ensaio. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Rio de Janeiro, 1994a, 2 p.

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, 1994b, 6 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **ME 078**: Agregado graúdo: adesividade a ligante betuminoso. Método de ensaio. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Rio de Janeiro, 1994c, 3 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **ME 086**: Agregado - determinação do índice de forma. Método de ensaio. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Rio de Janeiro, 1994d, 5 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **ME 148**: Material betuminoso - determinação dos pontos de fulgor e de combustão (vaso aberto cleveland). Método de ensaio. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Rio de Janeiro, 1994e, 2 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 ESTRADAS DE RODAGEM. **ME 193**: Materiais betuminosos líquidos e semi-sólidos – determinação da densidade e da massa específica. Método de ensaio. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Rio de Janeiro, 1996, 6 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **ME 266**: Agregados – determinação do teor de materiais pulverulentos. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Rio de Janeiro, 1997, 4 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **ME 035**: Agregados - determinação da abrasão Los Angeles. Método de ensaio. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Rio de Janeiro, 1998a, 6 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **ME 081**: Agregados - determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo. Método de ensaio. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Rio de Janeiro, 1998b, 6 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **ME 083**: Agregados – análise granulométrica. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Rio de Janeiro, 1998c, 5 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **ME 194**: Agregados - determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman. Método de ensaio. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Rio de Janeiro, 1998d, 4 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **EM 095**: Cimento asfáltico de petróleo. Especificação de material. Rio de Janeiro, 2006a, 6 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. **ME 131**. Materiais asfálticos - determinação do ponto de amolecimento - método do anel e bola. Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2010a, 6 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **ME 155**: Material asfáltico - determinação da penetração. Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2010b, 7 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, **ME 135**: Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação do módulo de resiliência. Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2018a, 13 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, **ME 136**: Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral. Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2018b, 9 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, **ME 183**: Pavimentação asfáltica – Ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada. Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2018c, 15 p.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. Background of SUPERPAVE asphalt mixture design and analysis. **FHWA-SA-95-003**. 1995. 160 p.

PEREIRA, G.S. **Análise do comportamento mecânico de misturas asfálticas à quente reforçadas com geogrelhas**. 2019. 88 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2019.

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, 2014, p. 85-94.

STRATEGIC HIGHWAY RESEARCH PROGRAM. The Superpave Mix Design Manual for New Construction and Overlays. **SHRP-A-407**. Washington, DC. National Research Council. 1994. 172 p.

TINAJEROS, R.A.P. **Estudo do comportamento mecânico de misturas asfálticas a quente convencional e modificada com polímero**. 2016. 143 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2016.

3 AVALIAÇÃO COMPARATIVA DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MISTURAS ASFÁLTICAS SIMPLES E COMPOSTAS.

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 as misturas asfálticas simples da faixa granulométrica C e maiores do que as 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. Método Marshall. Método Superpave

COMPARATIVE EVALUATION OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF SIMPLE AND COMPOSITE ASPHALT MIXTURES.

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 method. Superpave method.

3.1 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 mecanísticos 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 baseada 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.

3.2 MATERIAIS E METODOS

Os materiais empregados para a composição das misturas asfálticas à quente, agregados minerais (brita 1, brita 0 e pó de pedra) de formação gnáissica e o ligante asfáltico convencional CAP 50/70 estão caracterizados no Capítulo 2.

As misturas asfálticas foram dosadas pelo método Marshall, conforme os métodos de ensaio ME 043 (DNER, 1995) e D6926 (ASTM, 2016), e pelo método Superpave (Nível 1), conforme o procedimento R 35-14 (AASHTO, 2014).

Após a moldagem dos corpos de prova corpos de prova compostos e simples, foram realizados os ensaios mecânicos (i) módulo de resiliência; (ii) resistência à tração por compressão diametral; (iii) fadiga por compressão diametral e (iv) creep estático. Ensaio estes que estão descritos no Capítulo 2.

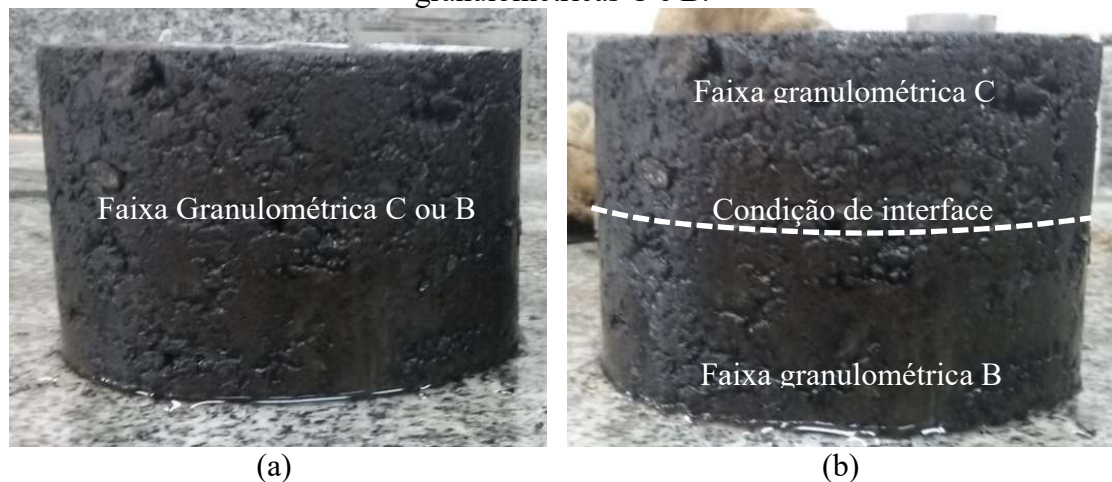
3.2.1 Moldagem do Corpos de Prova

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).

Os corpos de prova das misturas asfálticas 1 e 2 foram moldados utilizando-se o compactador por impacto Marshall, sendo a mistura asfáltica 1 enquadrada na faixa granulométrica C (Figura 1a) e a mistura asfáltica 2 enquadrada na faixa granulométrica B, da especificação de serviço ES 031 (DNIT, 2006b). Na mistura asfáltica CM, foram moldados corpos de prova com as duas faixas granulométricas (C e B) no mesmo corpo de prova (Figura 1b). Já os corpos de prova das misturas asfálticas 3 e 4 foram moldados utilizando o compactador giratório Superpave nas faixas granulométricas C e B,

respectivamente, e os corpos de prova da mistura asfáltica CS foram moldados com as duas faixas granulométricas (C e B) no mesmo corpo de prova.

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.



Fonte: Os Autores (2019)

3.2.1.1 Moldagem no Compactador Marshall

O procedimento de moldagem dos corpos de prova compostos seguiu basicamente o procedimento de compactação dos corpos de prova Marshall, segundo o método de ensaio ME 043 (DNER, 1995), com algumas alterações. O procedimento adotado foi:

- Pesagem dos agregados minerais e do ligante asfáltico para cada metade do corpo de prova, em recipientes separados, nas quantidades de 50% das frações obtidas nas dosagens de cada faixa granulométrica (C e B) e os teores de projeto definidos;
- Aquecimento dos agregados minerais e o ligante asfáltico em estufa separadas de acordo com os procedimentos PRO 178 (DNIT, 2018a);
- Os agregados minerais da faixa granulométrica C foram homogeneizados com o ligante asfáltico no teor de projeto determinado pelo método de dosagem Marshall;
- Após a homogeneização do agregado mineral da faixa granulométrica C com o ligante asfáltico, a mistura asfáltica retornava para a estufa por um intervalo de 2 minutos, para que a segunda metade do corpo de prova possa ser homogeneizada;
- Os agregados minerais da faixa granulométrica B foram homogeneizados com o ligante asfáltico no teor de projeto determinado pelo método de dosagem Marshall;

- f. Após a homogeneização do agregado mineral da faixa granulométrica B com o ligante asfáltico, a mistura asfáltica retornava para a estufa por um intervalo de 2 minutos,
- g. Colocou-se a mistura asfáltica homogeneizada da faixa granulométrica C no molde Marshall e aplicaram-se dois golpes, com a finalidade de fazer um nivelamento da primeira mistura.
- h. Colocou-se a mistura asfáltica homogeneizada da faixa granulométrica B sobre a mistura da faixa granulométrica C e iniciar a compactação com 75 golpes em cada face do corpo de prova.
- i. Extraí-se o corpo de prova do molde após a compactação.

3.2.1.2 Moldagem no Compactador Giratório Superpave

O procedimento de moldagem dos corpos de prova compostos no compactador giratório Superpave seguiu basicamente os procedimentos R 35-14 (AASHTO, 2014), com algumas alterações. O procedimento adotado foi:

- a. Pesagem dos agregados minerais e do ligante asfáltico para cada metade do corpo de prova, em recipientes separados, nas quantidades de 50% das frações obtidas nas dosagens de cada faixa granulométrica (C e B) e os teores de projeto definidos;
- b. Aquecimento dos agregados minerais e o ligante asfáltico em estufa separadas de acordo com os procedimentos PRO 178 (DNIT, 2018a);
- c. Os agregados minerais da faixa granulométrica C foram homogeneizados com o ligante asfáltico no teor de projeto determinado pelo método de dosagem Superpave;
- d. Após a homogeneização do agregado mineral da faixa granulométrica C com o ligante asfáltico, a mistura asfáltica retornava para a estufa por um intervalo de 2 horas em temperatura de compactação, para o envelhecimento de curto prazo;
- e. Os agregados minerais da faixa granulométrica B foram homogeneizados com o ligante asfáltico no teor de projeto determinado pelo método de dosagem Superpave;
- f. Após a homogeneização do agregado mineral da faixa granulométrica B com o ligante asfáltico, a mistura asfáltica retornava para a estufa por um intervalo de 2 horas em temperatura de compactação para o envelhecimento de curto prazo;
- g. Coloca-se do papel-filtro no fundo do molde;

- h. Coloca-se da mistura asfáltica homogeneizada da faixa granulométrica B no molde Superpave e aplicação de dois golpes com um soquete de madeira, com a finalidade de fazer um nivelamento da primeira mistura;
- i. Coloca-se a mistura asfáltica homogeneizada da faixa granulométrica C no molde Superpave e colocação do papel filtro no topo do molde após a mistura;
- j. Ajuste do corpo de prova no compactador giratório Superpave para iniciar a compactação a 100 giros;
- k. Extraí-se o corpo de prova do molde após a compactação.

3.3 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:

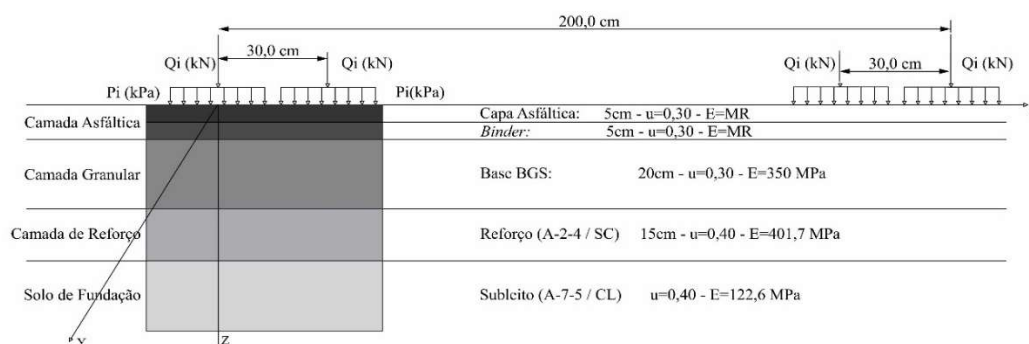
- P1 igual a 563 kPa (80 psi): pressão-padrão utilizada na pista experimental da AASHTO de 1958 a 1961 e normalizada para a determinação da deflexão, conforme o método de ensaio ME 024 (DNER, 1994), que tem sido adotada em diversos métodos de dimensionamento de pavimentos flexíveis;

- 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.

Figura 2 – Pavimento flexível adotado nas análises estruturais.



Fonte: Os Autores (2019).

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).

3.4 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.

3.4.1 Parâmetros Volumétricos 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.

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).

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
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

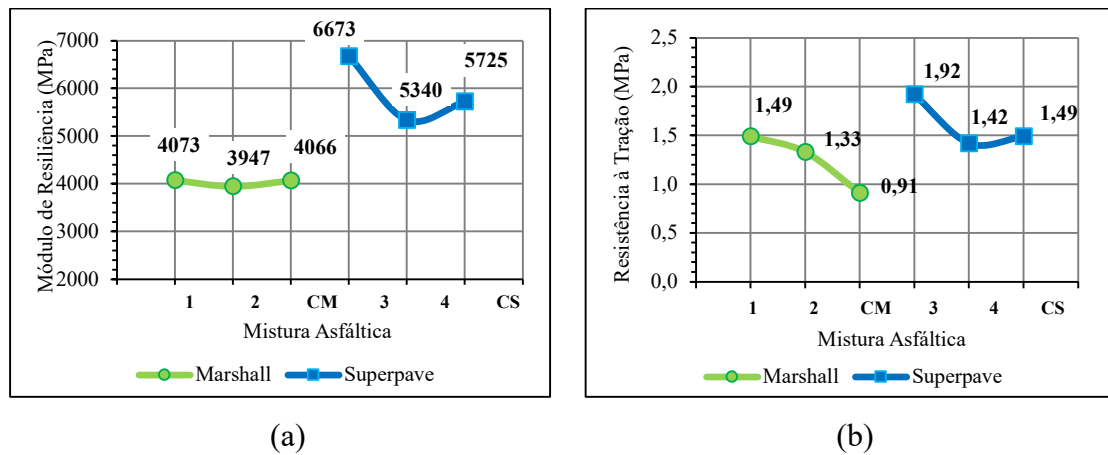
⁽¹⁾CM = camada composta Marshall e ⁽²⁾CS = camada composta Superpave

Fonte: Os Autores (2019).

3.4.2 Ensaio 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).



Fonte: Os Autores (2019).

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

Fonte: Os Autores (2019).

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.

3.4.3 Ensaios 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;

k₁ e k₂ : constantes determinadas nas curvas do ensaio.

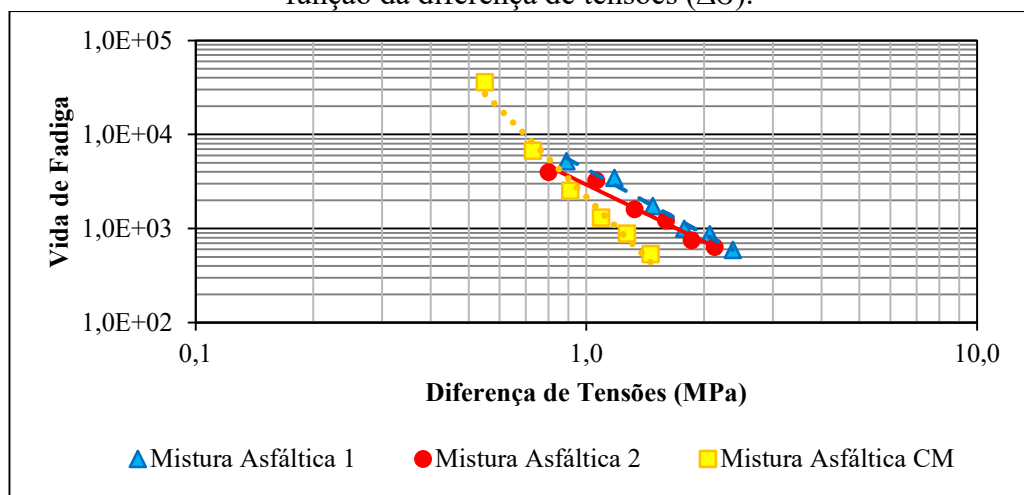
Tabela 3 – Parâmetros das curvas de fadiga das misturas asfálticas estudadas.

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

Fonte: Os Autores (2019).

Na Figura 4, 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, $VF=7,2 \times 10^2$.

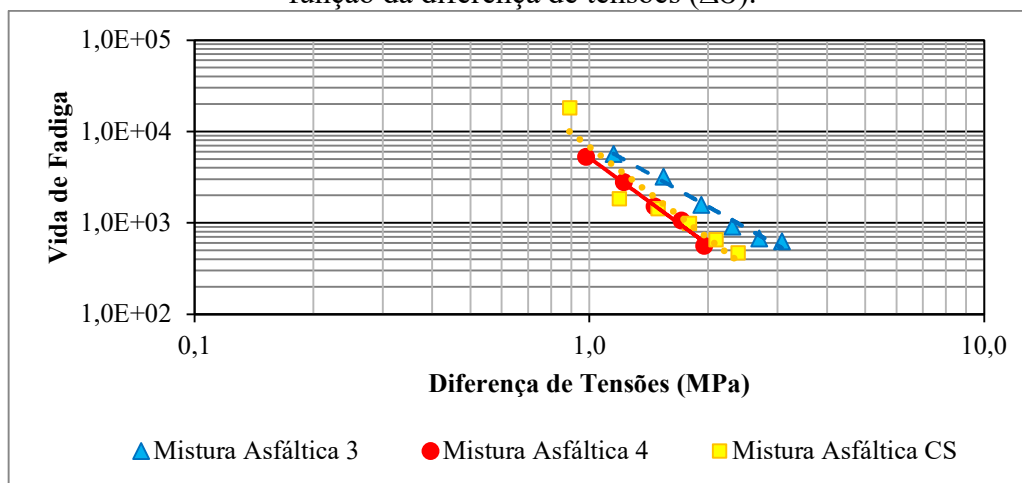
Figura 4 – Curvas de fadiga das misturas asfálticas dosadas pelo método Marshall em função da diferença de tensões ($\Delta\sigma$).



Fonte: Os Autores (2019).

Já na Figura 5, 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 ($VF=5,7 \times 10^2$).

Figura 5 – Curvas de fadiga das misturas asfálticas dosadas pelo método Superpave em função da diferença de tensões ($\Delta\sigma$).



Fonte: Os Autores (2019).

Observa-se, nas Figuras 4 e 5, 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.

3.4.4 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.

3.4.4.1 Análise das tensões horizontais

Na Tabela 4 e Figura 6, 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.

Tabela 4 – Tensões horizontais (σ_h) atuantes nas fibras inferiores das camadas asfálticas em função dos níveis de carregamento adotados e do método de análise, para as misturas dosadas pelo método Marshall, na posição $x = 0$.

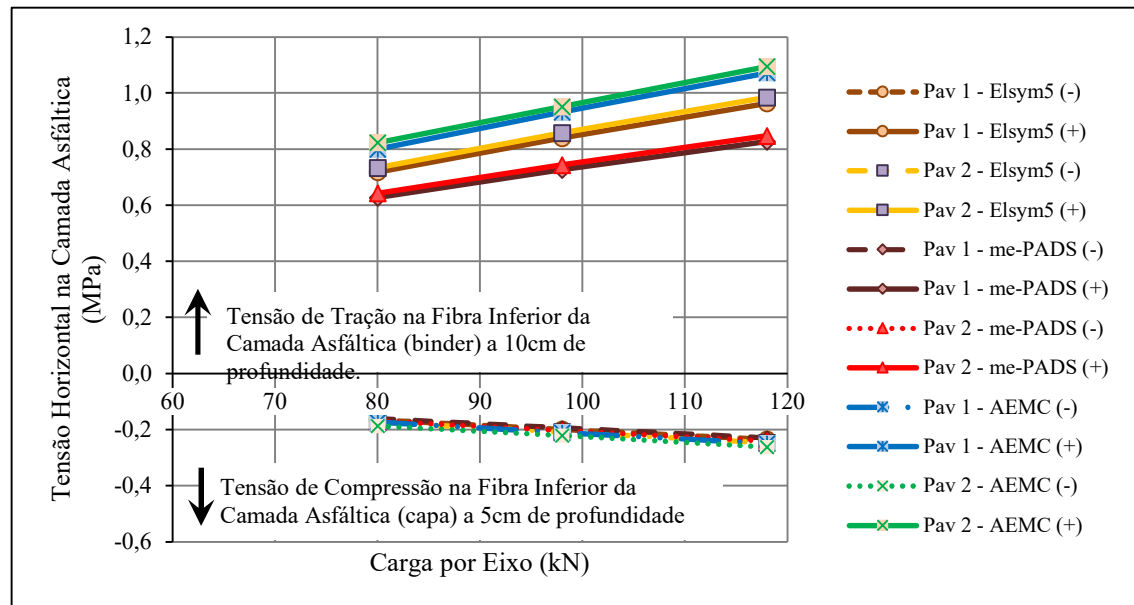
Software de Análise	Pavimento	Camadas Asfáltica	Q_{eixo} (kN)	P_{pneus} (kPa)	σ_h (MPa) à 5,0cm	σ_h (MPa) à 10,0cm
Elsym5	1	Mistura asfáltica 1 e Mistura asfáltica 2	80	563	-0,165	0,718
			98	633	-0,199	0,840
			118	703	-0,235	0,964
	2	Mistura asfáltica CM	80	563	-0,174	0,734
			98	633	-0,209	0,858
			118	703	-0,247	0,985
me- PADS	1	Mistura asfáltica 1 e Mistura asfáltica 2	80	563	-0,160	0,628
			98	633	-0,194	0,726
			118	703	-0,229	0,827
	2	Mistura asfáltica CM	80	563	-0,169	0,643
			98	633	-0,205	0,744
			118	703	-0,241	0,848
AEMC/Me DiNa	1	Mistura asfáltica 1 e Mistura asfáltica 2	80	563	-0,173	0,800
			98	633	-0,210	0,932
			118	703	-0,249	1,072
	2	Mistura asfáltica CM	80	563	-0,187	0,823
			98	633	-0,221	0,951
			118	703	-0,262	1,095

Observação: (-) compressão e (+) tração

Fonte: Os Autores (2019).

Na Figura 6, é apresentada uma representação gráfica da variação das tensões horizontais (σ_h) (apresentadas na Tabela 4) atuantes na fibra inferior das camadas asfálticas do pavimento asfáltico adotado, dosadas pelo método Marshall, em função dos carregamentos estudados. Observa-se nesta figura 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 6 – 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 $x = 0$.



Fonte: Os Autores (2019).

Analisando-se estatisticamente os resultados dos dados apresentados na Tabela 4 e Figura 6, 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.

Na Tabela 5, são apresentadas as maiores tensões horizontais (σ_h) na fibra inferior das camadas asfálticas em função da variação do carregamento e do software de análise para as misturas asfálticas dosadas pelo método Superpave.

Tabela 5 – Tensões horizontais (σ_h) atuantes nas fibras inferiores das camadas asfálticas em função dos níveis de carregamento adotados e do método de análise, para as misturas dosadas pelo método Superpave, na posição $x = 0$.

Software de Análise	Pavimento	Camadas Asfálticas	Q _{eixo} (kN)	P _{pneus} (kPa)	σ_h (MPa) à 5,0cm	σ_h (MPa) à 10,0cm
Elsym5	3	Mistura asfáltica 3 e Mistura asfáltica 4	80	563	-0,084	0,870
			98	633	-0,105	1,023
			118	703	-0,129	1,181
	4	Mistura asfáltica CS	80	563	-0,168	0,915
			98	633	-0,201	1,075
			118	703	-0,238	1,241
me- PADS	3	Mistura asfáltica 3 e Mistura asfáltica 4	80	563	-0,085	0,755
			98	633	-0,107	0,881
			118	703	-0,132	1,012
	4	Mistura asfáltica CS	80	563	-0,163	0,799
			98	633	-0,196	0,932
			118	703	-0,232	1,069
AEMC/Me DiNa	3	Mistura asfáltica 3 e Mistura asfáltica 4	80	563	-0,095	0,975
			98	633	-0,116	1,133
			118	703	-0,143	1,313
	4	Mistura asfáltica CS	80	563	-0,179	1,027
			98	633	-0,212	1,192
			118	703	-0,251	1,380

Observação: (-) compressão e (+) tração

Fonte: Os Autores (2019).

Ao analisar as tensões horizontais (σ_h), Tabela 5, 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).

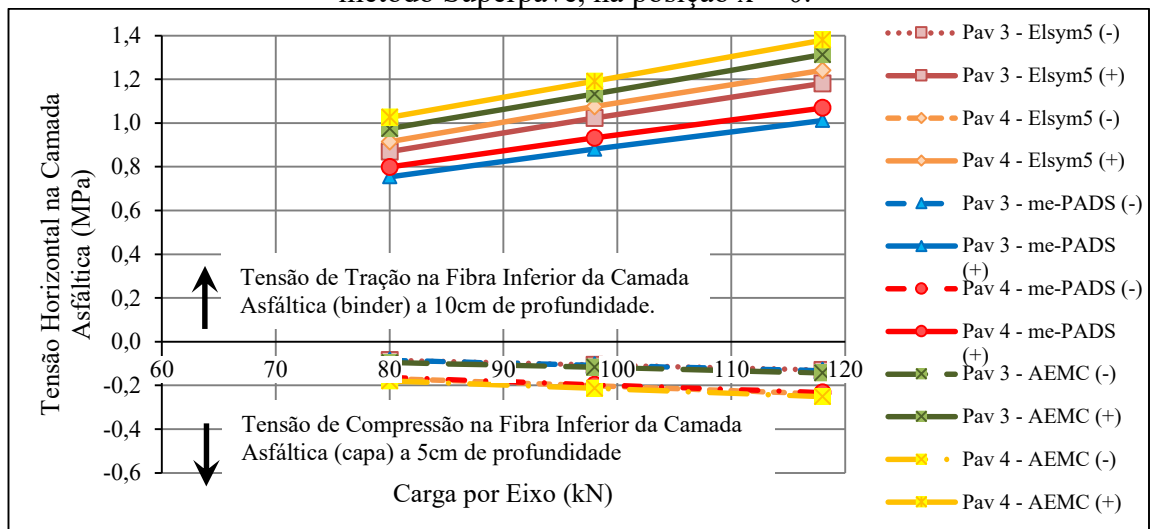
Para as tensões horizontais que atuam na fibra inferior da camada de binder, das misturas asfálticas dosadas pelo método Superpave, verificou-se que estas são de tração (sinal positivo). Analisando-as também com o auxílio do programa R (*R Development Core Team 2008*), verifica-se que, as retas de regressão 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 na Figura 7 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.

A Figura 7, apresenta uma representação gráfica da variação das tensões horizontais (σ_h) (apresentadas na Tabela 5) atuantes na fibra inferior das camadas asfálticas do pavimento asfáltico adotado, dosadas pelo método Superpave, em função dos carregamentos adotados.

Verifica-se na Figura 7 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.

Figura 7 – 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 $x = 0$.



Fonte: Os Autores (2019).

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 7) 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%.

3.4.4.2 Deflexões

As deflexões verticais recuperáveis máximas no topo da camada asfáltica dos pavimentos flexíveis adotados para cada um dos carregamentos analisados estão apresentadas na Tabela 6 em que as estruturas dos pavimentos estão representadas por camadas asfálticas dosadas pelo método Marshall.

Tabela 6 – Valores de deflexões verticais recuperáveis máximas no topo da camada asfáltica do pavimento flexível analisado, para as misturas asfálticas dosadas pelo método Marshall.

Software de Análise	Pavimento	Camadas Asfálticas	Q _{eixo} (kN)	P _{pneus} (kPa)	Deflexão recuperável (0,01 mm)
Elsym5	1	Mistura asfáltica 1 e Mistura asfáltica 2	80	563	35,1
			98	633	42,6
			118	703	50,8
	2	Mistura asfáltica CM	80	563	35,0
			98	633	42,5
			118	703	50,7
me- PADS	1	Mistura asfáltica 1 e Mistura asfáltica 2	80	563	21,5
			98	633	26,1
			118	703	31,3
	2	Mistura asfáltica CM	80	563	21,5
			98	633	26,2
			118	703	31,4
AEMC/MeDiNa	1	Mistura asfáltica 1 e Mistura asfáltica 2	80	563	30,7
			98	633	36,6
			118	703	43,9
	2	Mistura asfáltica CM	80	563	30,7
			98	633	36,4
			118	703	43,7

Fonte: Os Autores (2019).

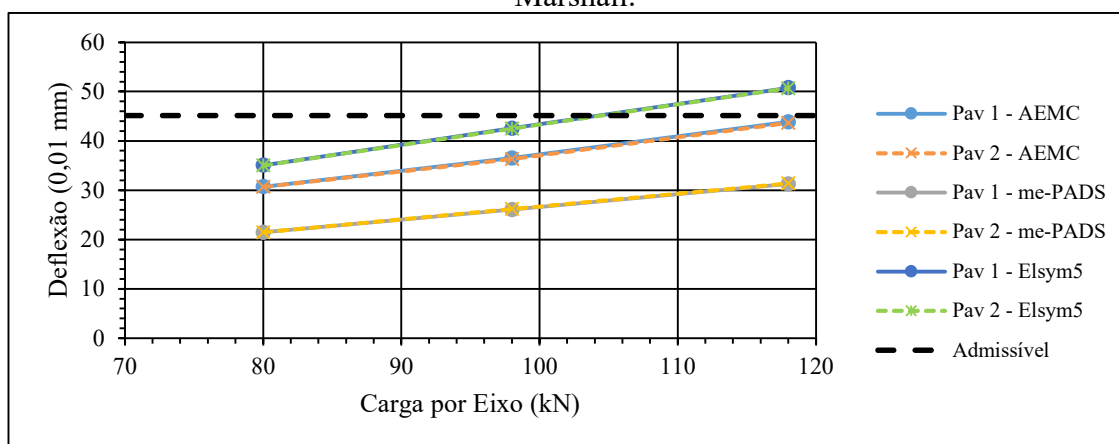
Para a avaliação dos valores de deflexões máximas apresentadas na Tabela 6, foram calculadas as deflexões admissíveis, segundo o procedimento PRO 011 (DNER, 1979),

para um tráfego pesado ($N=5 \times 10^7$), de acordo com DNIT (2006a). A deflexão admissível calculada para este nível de tráfego é de 45,18x0,01 mm e está representada pela linha tracejada apresentada na Figura 8.

Observa-se na Figura 8, que as deflexões verticais (δz) recuperáveis máximas para o pavimento flexível adotado, em que as misturas asfálticas foram dosadas pelo método Marshall apresentaram valores de deflexões máximas nos softwares me-PADS e AEMC/MeDiNa inferiores aos valores das deflexões admissíveis para o nível de tráfego pesado, de acordo com DNIT (2006a), para todos os níveis de carregamento. Já para as calculadas com o auxílio do software Elsym5, observa-se que estas deflexões verticais recuperáveis para o carregamento de 118 kN, foi superior a deflexão admissível, o que não ocorreu para os carregamentos de 80 kN e 98 kN, onde as deflexões verticais recuperáveis foram inferiores as admissíveis.

Analisando-se ainda os valores apresentados na Tabela 6 e representada na Figura 8, é possível observar que os valores das deflexões verticais (δz) recuperáveis máximas determinadas na superfície do pavimento flexível analisado, cujas misturas asfálticas foram dosadas pelo método Marshall, não indicaram variações dentro do mesmo software (AEMC/MeDiNa, me-PADS e Elsym5) de análise. Observa-se ainda, na Figura 8, que as maiores deflexões foram determinadas pelo software Elsym5, sendo 14% superior ao AEMC/MeDiNa e 63% superior ao me-PADS, para todos os níveis de carregamento. É importante ressaltar que os resultados de cada software conduziram a valores aproximadamente iguais para as duas estruturas de pavimento analisadas.

Figura 8 – Deflexões verticais máximas na estrutura do pavimento flexível analisado em função dos carregamentos adotados para as misturas asfálticas dosadas pelo método Marshall.



Fonte: Os Autores (2019).

Na Tabela 7 estão apresentadas as deflexões verticais recuperáveis máximas no topo da camada asfáltica dos pavimentos flexíveis adotados para cada um dos carregamentos analisados, em que as estruturas dos pavimentos estão representadas por camadas asfálticas dosadas pelo método Superpave.

Da mesma forma como foi realizado para as misturas asfálticas dosadas pelo método Marshall, foram realizadas avaliações dos valores de deflexões máximas apresentadas na Tabela 7, calculando-se as deflexões admissíveis, segundo o procedimento PRO 011 (DNER, 1979), para um tráfego pesado ($N=5 \times 10^7$), de acordo com DNIT (2006a). A deflexão admissível calculada para este nível de tráfego é de $45,18 \times 0,01$ mm e está representada pela linha tracejada apresentada na Figura 9.

Tabela 7 – Valores de deflexões verticais recuperáveis máximas no topo da camada asfáltica do pavimento flexível analisado, para as misturas asfálticas dosadas pelo método Superpave.

Software de Análise	Pavimento	Camadas Asfálticas	Q _{eixo} (kN)	P _{pneus} (kPa)	Deflexão recuperável (0,01 mm)
Elsym5	3	Mistura asfáltica 3 e Mistura asfáltica 4	80	563	33,2
			98	633	40,3
			118	703	48,2
	4	Mistura asfáltica CS	80	563	33,5
			98	633	40,6
			118	703	48,5
me- PADS	3	Mistura asfáltica 3 e Mistura asfáltica 4	80	563	19,7
			98	633	24,0
			118	703	28,8
	4	Mistura asfáltica CS	80	563	20,0
			98	633	24,4
			118	703	29,3
AEMC/MeDiNa	3	Mistura asfáltica 3 e Mistura asfáltica 4	80	563	28,8
			98	633	34,3
			118	703	41,1
	4	Mistura asfáltica CS	80	563	29,1
			98	633	34,6
			118	703	41,5

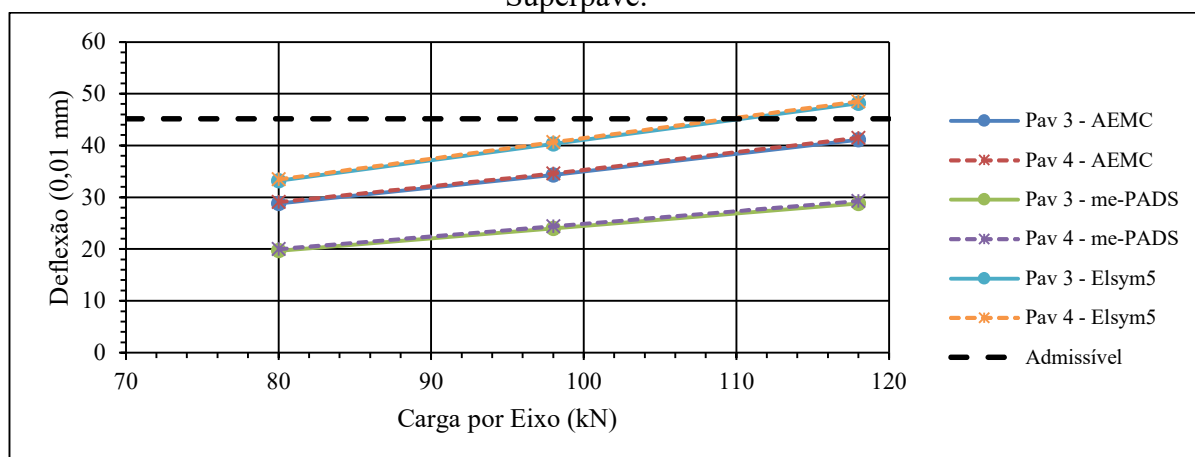
Fonte: Os Autores (2019).

Analisando-se ainda os valores apresentados na Tabela 7 e representada na Figura 9, é possível observar que os valores das deflexões verticais (δz) recuperáveis máximas determinadas na superfície do pavimento flexível analisado, cujas misturas asfálticas foram dosadas pelo método Superpave, não indicaram variações dentro do mesmo software (AEMC/MeDiNa, me-PADS e Elsym5) de análise. Observa-se ainda, na Figura 9, que as maiores deflexões máximas foram determinadas pelo software Elsym5, sendo 15% superior ao AEMC/MeDiNa e 67% superior ao me-PADS, para todos os níveis de carregamento.

Observa-se na Figura 9, que as deflexões verticais (δz) recuperáveis máximas para o pavimento flexível adotado, em que as misturas asfálticas foram dosadas pelo método Superpave apresentaram valores de deflexões máximas nos softwares me-PADS e AEMC/MeDiNa inferiores aos valores das deflexões admissíveis para o nível de tráfego pesado, de acordo com DNIT (2006a), para todos os níveis de carregamento. Já para as calculadas com o auxílio do software Elsym5, observa-se que estas deflexões verticais recuperáveis para o carregamento de 118 kN, foi superior a deflexão admissível, o que não ocorreu para os carregamentos de 80 kN e 98 kN, onde as deflexões verticais recuperáveis foram inferiores as admissíveis. É importante ressaltar que os resultados de cada software foram aproximadamente iguais para as duas estruturas de pavimento analisadas.

Esta constatação também foi observada para as estruturas dos pavimentos flexíveis analisados compostos pelas misturas asfálticas dosadas pelo método Marshall.

Figura 9 – Deflexões verticais máximas na estrutura do pavimento flexível analisado em função dos carregamentos adotados para as misturas asfálticas dosadas pelo método Superpave.



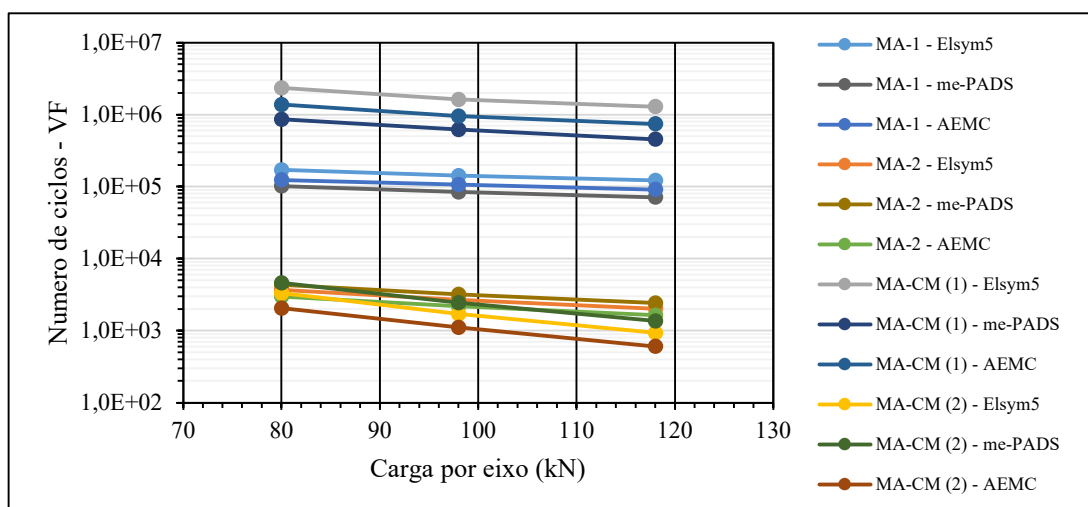
Fonte: Os Autores (2019).

3.4.4.3 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 Tabelas 8 e 9, respectivamente.

Na Figura 10, 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 10 – Valores de vida de fadiga (VF) das misturas asfálticas (MA) dosadas pelo método Marshall para o pavimento flexível analisado.



Fonte: Os Autores (2019).

A vida de fadiga (VF) das misturas asfálticas foram calculadas através da equação 1, os valores dos parâmetros k da Tabela 3 e tensões de tração expressas na Tabela 8.

Analisando-se a Figura 10, 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).

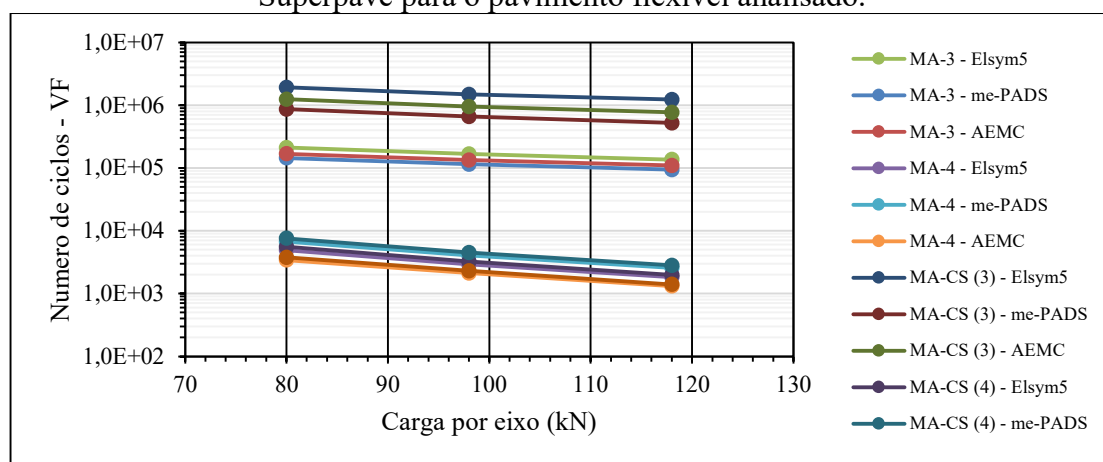
Observa-se ainda na Figura 10, que as misturas asfálticas 2 e CM (2) estão na zona de tração das camadas asfálticas. Para a carga por eixo de 80 kN, verifica-se que a vida de fadiga obtida quando o pavimento flexível foi analisado considerando os parâmetros da mistura asfáltica 2, foi maior para o software 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 11, 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.

A vida de fadiga (VF) das misturas asfálticas foram calculadas através da equação 1, os valores dos parâmetros k da Tabela 3 e tensões de tração expressas na Tabela 9.

Analisando-se a Figura 11, evidencia-se que, para os níveis de carregamento adotados, os valores de vida de fadiga (VF) 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).

Figura 11 – Valores de vida de fadiga (VF) das misturas asfálticas dosadas pelo método Superpave para o pavimento flexível analisado.



Fonte: Os Autores (2019).

Observa-se ainda na Figura 11 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).

Na Tabela 8 são apresentados 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 e a vida de fadiga da estrutura do pavimento flexível analisado em função das misturas asfálticas dosadas pelo método Marshall.

Tabela 8 – Valores de vida de fadiga das camadas asfálticas do pavimento flexível analisado em função dos carregamentos adotados, para as misturas asfálticas dosadas pelo método Marshall.

Software de Análise	Pav.	Mistura Asfáltica - MA	Q _{eixo} (kN)	$\sigma_h^{(1)}$ (MPa)	$\sigma_v^{(1)}$ (MPa)	$\Delta\sigma^{(2)}$ (MPa)	Vida de Fadiga
Elsym5	1	1 (Faixa granulométrica C e teor de asfalto = 4,7%)	80	-0,165	-0,364	0,199	1,72 x 10 ⁵
			98	-0,199	-0,415	0,217	1,42 x 10 ⁵
			118	-0,235	-0,466	0,231	1,23 x 10 ⁵
		2 (Faixa granulométrica B e teor de asfalto = 4,2%)	80	0,718	-0,171	0,889	3,71 x 10 ⁵
			98	0,840	-0,204	1,044	2,69 x 10 ⁵
			118	0,964	-0,238	1,201	2,02 x 10 ⁵
	2	CM (1) ⁽³⁾	80	-0,174	-0,364	0,190	2,35 x 10 ⁶
			98	-0,209	-0,416	0,208	1,63 x 10 ⁶
			118	-0,247	-0,466	0,219	1,29 x 10 ⁶
		CM (2) ⁽⁴⁾	80	0,734	-0,170	0,904	3,32 x 10 ³
			98	0,858	-0,202	1,060	1,70 x 10 ³
			118	0,985	-0,237	1,221	9,35 x 10 ²
me- PADS	1	1 (Faixa granulométrica C e teor de asfalto = 4,7%)	80	-0,160	-0,411	0,250	1,02 x 10 ⁵
			98	-0,194	-0,466	0,272	8,42 x 10 ⁴
			118	-0,229	-0,522	0,293	7,13 x 10 ⁴
		2 (Faixa granulométrica B e teor de asfalto = 4,2%)	80	0,628	-0,194	0,822	4,36 x 10 ³
			98	0,726	-0,231	0,957	3,20 x 10 ³
			118	0,827	-0,270	1,097	2,43 x 10 ³
	2	CM (1) ⁽³⁾	80	-0,169	-0,411	0,242	8,62 x 10 ⁵
			98	-0,205	-0,466	0,261	6,24 x 10 ⁵
			118	-0,241	-0,522	0,281	4,55 x 10 ⁵
		CM (2) ⁽⁴⁾	80	0,643	-0,192	0,835	4,63 x 10 ³
			98	0,744	-0,229	0,973	2,44 x 10 ³
			118	0,848	-0,268	1,116	1,37 x 10 ³
AEMC/ MeDiNa	1	1 (Faixa granulométrica C e teor de asfalto = 4,7%)	80	-0,173	-0,403	0,230	1,24 x 10 ⁵
			98	-0,210	-0,456	0,246	1,06 x 10 ⁵
			118	-0,249	-0,512	0,263	9,13 x 10 ⁴
		2 (Faixa granulométrica B e teor de asfalto = 4,2%)	80	0,800	-0,191	0,991	2,98 x 10 ³
			98	0,932	-0,224	1,156	2,19 x 10 ³
			118	1,072	-0,262	1,334	1,64 x 10 ³
	2	CM (1) ⁽³⁾	80	-0,187	-0,403	0,216	1,38 x 10 ⁶
			98	-0,221	-0,457	0,236	9,52 x 10 ⁵
			118	-0,262	-0,512	0,250	7,47 x 10 ⁵
		CM (2) ⁽⁴⁾	80	0,823	-0,190	1,013	2,06 x 10 ³
			98	0,951	-0,223	1,174	1,10 x 10 ³
			118	1,095	-0,260	1,355	6,04 x 10 ²

⁽¹⁾ σ : (-) compressão e (+) tração ⁽²⁾ $\Delta\sigma$: diferença de tensão = $\sigma_h - \sigma_v$

⁽³⁾CM (1): corpo de prova composto, método de dosagem Marshall, a 5cm de profundidade na camada asfáltica, do pavimento flexível (Figura 2), correspondente à faixa granulométrica C e teor de asfalto = 4,7%.

⁽⁴⁾CM (2) = corpo de prova composto, método de dosagem Marshall, a 10cm de profundidade na camada asfáltica, do pavimento flexível (Figura 2), correspondente à faixa granulométrica B e teor de asfalto = 4,2%.

Fonte: Os Autores (2019).

Na Tabela 9, são apresentados 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 e a vida de fadiga da estrutura do pavimento flexível analisado em função das misturas asfálticas dosadas pelo método Superpave.

Tabela 9 – Valores de vida de fadiga das camadas asfálticas do pavimento flexível analisado em função dos carregamentos adotados, para as misturas asfálticas dosadas pelo método Superpave.

Software de Análise	Pav	Mistura Asfáltica - MA	Q _{eixo} (kN)	$\sigma_h^{(1)}$ (MPa)	$\sigma_v^{(1)}$ (MPa)	$\Delta\sigma^{(2)}$ (MPa)	Vida de Fadiga
Elsym5	3	3 (Faixa granulométrica C e teor de asfalto = 4,6%)	80	-0,084	-0,344	0,259	2,12 x 10 ⁵
			98	-0,105	-0,392	0,287	1,66 x 10 ⁵
			118	-0,129	-0,440	0,311	1,37 x 10 ⁵
		4 (Faixa granulométrica B e teor de asfalto = 4,85%)	80	0,870	-0,145	1,015	4,92 x 10 ³
			98	1,023	-0,173	1,196	2,92 x 10 ³
			118	1,181	-0,202	1,384	1,84 x 10 ³
	4	CS (3) ⁽³⁾	80	-0,168	-0,351	0,183	1,93 x 10 ⁶
			98	-0,201	-0,400	0,199	1,48 x 10 ⁶
			118	-0,238	-0,448	0,209	1,24 x 10 ⁶
		CS (4) ⁽⁴⁾	80	0,915	-0,148	1,063	5,56 x 10 ³
			98	1,075	-0,176	1,251	3,23 x 10 ³
			118	1,241	-0,206	1,447	1,99 x 10 ³
me- PADS	3	3 (Faixa granulométrica C e teor de asfalto = 4,6%)	80	-0,085	-0,388	0,303	1,45 x 10 ⁵
			98	-0,107	-0,441	0,334	1,15 x 10 ⁵
			118	-0,132	0,494	0,362	9,45 x 10 ⁴
		4 (Faixa granulométrica B e teor de asfalto = 4,85%)	80	0,755	-0,165	0,920	6,72 x 10 ³
			98	0,881	-0,197	1,078	4,06 x 10 ³
			118	1,012	-0,231	1,244	2,58 x 10 ³
	4	CS (3) ⁽³⁾	80	-0,163	-0,396	0,233	8,66 x 10 ⁵
			98	-0,196	-0,449	0,253	6,61 x 10 ⁵
			118	-0,232	-0,503	0,271	5,25 x 10 ⁵
		CS (4) ⁽⁴⁾	80	0,799	-0,167	0,967	7,61 x 10 ³
			98	0,932	-0,200	1,132	4,51 x 10 ³
			118	1,069	-0,235	1,304	2,81 x 10 ³
AEMC/ MeDiNa	3	3 (Faixa granulométrica C e teor de asfalto = 4,6%)	80	-0,095	-0,380	0,285	1,69 x 10 ⁵
			98	-0,116	-0,430	0,314	1,33 x 10 ⁵
			118	-0,143	-0,483	0,340	1,10 x 10 ⁵
		4 (Faixa granulométrica B e teor de asfalto = 4,85%)	80	0,975	-0,162	1,137	3,43 x 10 ³
			98	1,133	-0,190	1,323	2,12 x 10 ³
			118	1,313	-0,223	1,536	1,32 x 10 ³
	4	CS (3) ⁽³⁾	80	-0,179	-0,388	0,209	1,25 x 10 ⁶
			98	-0,212	-0,439	0,227	9,46 x 10 ⁵
			118	-0,251	-0,492	0,241	7,71 x 10 ⁵
		CS (4) ⁽⁴⁾	80	1,027	-0,165	1,192	3,79 x 10 ³
			98	1,192	-0,194	1,386	2,30 x 10 ³
			118	1,380	-0,227	1,607	1,40 x 10 ³

⁽¹⁾ σ : (-) compressão e (+) tração ⁽²⁾ $\Delta\sigma$: diferença de tensão = $\sigma_h - \sigma_v$

⁽³⁾CS (3): corpo de prova composto, método de dosagem Superpave, a 5cm de profundidade na camada asfáltica, do pavimento flexível (Figura 2), correspondente à faixa granulométrica C e teor de asfalto = 4,6%.

⁽⁴⁾CS (4): corpo de prova composto, método de dosagem Superpave, a 10cm de profundidade na camada asfáltica, do pavimento flexível (Figura 2), correspondente à faixa granulométrica B e teor de asfalto = 4,85%

Fonte: Os Autores (2019)

3.5 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 BIBLIOGRÁFICAS

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.

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.

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.

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

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.

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.

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.

4 AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS ASFÁLTICAS COMPOSTAS DOSADAS PELO MÉTODO MARSHALL REFORÇADAS COM GEOGRELHA.

RESUMO

O objetivo principal desta pesquisa foi avaliar a influência de diferentes tipos de geogrelhas para reforço de misturas asfálticas dosadas pelo método Marshall. Para tanto, o programa experimental desenvolvido, quanto aos materiais, foi composto por um ligante asfáltico CAP 50/70 e uma composição de agregados minerais de origem gnáissica e três tipos de geogrelhas (poliálcool vinílico, fibra de vidro e poliéster). Os resultados das dosagens Marshall indicaram teores de projeto de ligante asfáltico de 4,7% e 4,2% para as misturas asfálticas representativas das faixas granulométricas C e B da especificação de serviço ES 031 do DNIT para concreto asfáltico, respectivamente. Utilizaram-se corpos de provas moldados no compactador por impacto (sendo metade do corpo de prova na faixa granulométrica C e a outra metade com a faixa granulométrica B) para a realização dos ensaios mecânicos de módulo de resiliência (MR), resistência à tração por compressão diametral (RT), fadiga e deformação permanente (creep). Os parâmetros das misturas asfálticas resultantes foram aplicados na estrutura do pavimento flexível analisado pelo software *Mechanistic Empirical Pavement Analysis and Design Software (me-PADS v1.1)*, visando à obtenção das respostas estruturais referentes às deformações na superfície desse pavimento e às tensões nas fibras inferiores das camadas asfálticas. Dos resultados obtidos, conclui-se que as misturas asfálticas com a inclusão da geogrelha de poliéster (Geo3) apresentaram melhor desempenho quanto à fadiga e à deformação permanente quando comparadas às demais misturas analisadas.

Palavras-chaves: Misturas asfálticas densas. Ensaios mecânicos. Método Marshall, Geogrelhas.

EVALUATION OF THE MECHANICAL BEHAVIOR OF ASPHALT MIXTURES DOSED BY THE MARSHALL METHOD REINFORCED WITH GEOGRID.

ABSTRACT

The main objective of this research was to evaluate the influence of different types of geogrids for reinforcement of asphalt mixtures dosed by the Marshall method. To this end, the experimental program developed for the materials was composed of an asphalt binder CAP 50/70 and a composition of mineral aggregates of gneissic origin and three types of geogrids (polyvinyl alcohol, fiberglass and polyester). The results of the Marshall dosages indicated asphalt binder design levels of 4.7% and 4.2% for asphalt mixtures representative of the particle size ranges C and B of DNIT service specification ES 031 for asphalt concrete, respectively. Test specimens molded in the impact compactor were used (half of the test specimens being in the particle size range C and the other half in the particle size range B) to perform the mechanical tests of modulus of resilience (MR), tensile strength by diametrical compression (RT), fatigue and permanent deformation (creep). The parameters of the resulting asphalt mixtures were applied to the flexible pavement structure analyzed by the Mechanistic Empirical Pavement Analysis and Design Software (me-PADS v1.1), aiming at obtaining the structural responses related to the deformations on the pavement surface and the stresses in the lower fibers of the asphalt layers. From the results obtained, it can be concluded that the asphalt mixtures with the inclusion of polyester geogrid (Geo3) showed better performance regarding fatigue and permanent deformation when compared to other mixtures analyzed.

Keywords: Dense asphalt mixtures. Mechanical tests. Marshall method. Geogrids.

4.1 INTRODUÇÃO

4.1.1 Considerações Iniciais

As sobreposições de camadas asfálticas à quente são comumente aplicadas em pavimentos flexíveis e rígidos existentes, quando as condições estruturais e funcionais atingem um nível inadequado de serviço. Estas sobreposições são projetadas para resistir à fadiga e à deformações permanentes. Contudo, estas sobreposições ainda podem mostrar padrões de trincamento semelhantes aos que existiam no antigo pavimento após um curto período de tempo (FALLAH; KHODAII, 2015 e DHAKAL; ELSEIFI; ZHANG, 2016).

Nos últimos anos, a ocorrência prematura da perda das características funcionais e de serventia dos pavimentos asfálticos levou ao desenvolvimento e adoção de materiais inovadores para aumentar a vida de serviço das camadas asfálticas. Segundo Nejad, Asadi Fallah e Vadood (2016), uma das técnicas reconhecidas para mitigar as perdas funcionais do pavimento asfáltico é o uso de geossintéticos de reforço intercalado entre o pavimento antigo e a nova camada asfáltica sobreposta. O reforço ocorre quando o geossintético intercalado tem um módulo de rigidez superior ao das camadas asfálticas do pavimento (DE BONDT, 1999).

Em termos de reforço, as geogrelhas, dependendo do material constituinte, geometria da malha (forma e tamanho), rigidez e posição na estrutura do pavimento, são capazes de aumentar a resistência à fadiga da mistura asfáltica, reduzir o afundamento de trilha de roda e limitar a reflexão de trincas (FERROTTI; CANESTRARI; PASQUINI; VIRGILI, 2012 e ABDESSEMED; KENAI; BALI, 2015). A influência desses parâmetros foi minuciosamente estudada por vários pesquisadores através de investigações laboratoriais *in situ*, mas ainda é um assunto importante a ser estudado.

4.1.2 Influência dos Geossintéticos quanto à Vida de Fadiga

O movimento das trincas existentes devido às tensões de tração e cisalhamento resultantes das cargas de tráfego ou variação de temperatura causam novos trincamentos que refletem através de sobreposições de camadas asfálticas, comumente conhecidas como reflexão de trincas (LYTTON, et al., 2010). Para atenuar esta perda de serventia, são especificados materiais que impeçam o trincamento da nova camada asfáltica sobreposta. Segundo Walubita, Faruk, Zhang e Hu (2015), a sobreposição de camadas asfálticas intercalada com a geogrelha é o melhor método para proteger as novas camadas asfálticas contra a reflexão de trincas.

Fritzen e Motta (2006) avaliaram o efeito da geogrelha de poliéster entre camadas asfálticas construindo um trecho experimental na rodovia BR-116/RJ. Para simular a aplicação de carga pelo tráfego, foi utilizado o simulador do tipo HVS (*Heavy Vehicle Simulator*). Verificou-se que o trecho com a geogrelha entre camadas asfálticas convencionais teve um fator de efetividade superior ao do trecho com asfalto borracha.

Khodaii et al. (2009) estudaram o efeito da geogrelha poliéster para mitigar a propagação de trincas de sobreposições de camadas asfálticas. Os ensaios foram realizados com vigotas de concreto asfáltico em forma de prismas, variando-se a posição da geogrelha, o tipo de pavimento existente e a abertura da trinca. Os resultados indicaram um aumento significativo no desempenho das amostras reforçadas com geogrelha, quanto à resistência à propagação da trinca do pavimento antigo. Concluíram também que a posição de melhor desempenho para a instalação da geogrelha foi no terço inferior da amostra.

Ferrotti et al. (2011; 2012) estudaram o desempenho mecânico de pavimentos reforçados com geogrelha de fibra de vidro (FV) através do ensaio de flexão a quatro pontos. Os resultados obtidos mostraram que a utilização da geogrelha de FV possibilitou um aumento considerável quanto à resistência à fadiga, aumentando o desempenho da mistura asfáltica em números de ciclos de carregamento cíclico, garantindo um maior tempo de vida útil para os sistemas reforçados.

Norambuena-Contreras e Gonzales-Torre (2015) avaliaram a influência de diferentes tipos de geossintéticos - geogrelhas de polipropileno (PP), poliálcool vinílico (PVA), poliéster (PET), fibra de vidro (FV) e fibra de carbono (FC) e um geotêxtil não tecido - como reforço de camada asfáltica com a finalidade de um sistema que retardasse o aparecimento de trincas. Os ensaios foram realizados em corpos de prova prismáticos apoiados sobre uma base elástica, com aplicações de carregamentos cíclicos e de baixa frequência, a fim de simular os carregamentos do tráfego. Verificou-se, que todos os geossintéticos apresentaram uma redução na abertura da trinca proveniente da camada inferior. Para que os geossintéticos possam contribuir com a resistência à fadiga da mistura asfáltica é necessário certa deformação do pavimento. Assim, os geossintéticos utilizados foram classificados da maior para a menor contribuição, como segue FC, PET, FV, PP, não tecido, PVA.

Saride e Kumar (2017) avaliaram o desempenho da camada intermediária geossintética no controle de trincas por reflexão e na melhoria da vida de fadiga da camada asfáltica colocada sobre um pavimento antigo pré-trincado. Os ensaios de flexão

a quatro pontos foram realizados com vigotas prismáticas e os geossintéticos utilizados foram uma geogrelha de poliéster, uma de polipropileno e um geotêxtil de fibra natural. De uma forma geral, os autores concluíram que nos resultados dos ensaios de resistência à flexão e fadiga, os geossintéticos tiveram um ótimo desempenho em aumentar a vida de fadiga das amostras antes da propagação da trinca. A geogrelha de PET, como camada intermediária, mostrou-se com melhor desempenho em termos de maior vida de fadiga e potencial de retardamento das trincas de reflexão.

Em resumo, atualmente, existem vários produtos e sistemas de reforço de camadas asfálticas de diferentes matérias-primas (poliéster, fibra de vidro, fibra de carbono, polipropileno e poliálcool vinílico) disponíveis no mercado. Porém, existe um consenso que todas essas matérias-primas tem um efeito positivo na batalha contra a propagação de trincas para a nova camada asfáltica (NORAMBUENA-CONTRERAS; GONZALES-TORRE, 2015). No entanto, existem diferenças essenciais no comportamento e na eficácia de cada matéria-prima. A geogrelha para reforço de camadas asfálticas melhora as propriedades de tensão-deformação desta camada. Como descrito na bibliografia, vários estudos demonstram que o poliéster como matéria prima mostra melhores resultados na prevenção de trincas reflexivas do que matérias-primas mais rígidas (ELSING; LEITE-GEMBUS, 2019).

4.1.3 Influência dos Geossintéticos sobre a Deformação Permanente

A deformação permanente é um dos fatores de degradação de um pavimento asfáltico que afeta a superfície de rolamento, principalmente em regiões quentes. Segundo Mounes et al. (2016), um dos meios de se combater a deformação permanente em misturas asfálticas é a utilização de geossintéticos como camada intermediária entre misturas asfálticas.

Siriwardane et al. (2010) construíram vinte seções testes em um simulador de tráfego de pequena dimensão (1,20 m x 1,80 m), com e sem a inclusão da geogrelha de fibra de vidro (FV). Os resultados deste estudo mostraram que as geogrelhas de FV podem ser usadas para melhorar o desempenho quanto aos deslocamentos plásticos em um pavimento flexível. Observou-se, também, que a inclusão da geogrelha de FV na camada asfáltica proporcionou maior resistência à propagação de trinca.

Correia e Zornberg (2018) utilizaram em sua pesquisa um simulador de tráfego de pequena dimensão (1,60 m de largura por 1,80 m de comprimento) desenvolvido na Escola de Engenharia de São Carlos, USP. Verificou-se que a geogrelha de poliálcool

vinílico (PVA) reduziu consideravelmente os afundamentos plásticos e deformações laterais na superfície do pavimento, além da diminuição nos níveis de deslocamentos elásticos. Pode-se concluir que as seções com a inclusão da geogrelha de PVA no revestimento asfáltico tiveram um desempenho superior quando comparados com as seções sem geogrelha.

Lee et al. (2015) também realizaram ensaios com um simulador de tráfego em escala reduzida para verificar o efeito da geogrelha de fibra de vidro, quanto aos deslocamentos plásticos de uma mistura asfáltica. Os resultados demonstraram que as placas reforçadas com geogrelhas apresentaram menores deformações plásticas comparadas às não reforçadas e maior resistência ao cisalhamento, devido à resistência da geogrelha. Segundo Lee et. al. (2015), este fato pode ser atribuído à abertura da geogrelha que promoveu um aumento no atrito entre as partículas dos agregados da mistura asfáltica.

Mounes et al. (2016) desenvolveram pesquisa através do ensaio de creep dinâmico, com corpos de prova moldados no compactador Marshall, com e sem a utilização de geogrelhas de fibra de vidro (FV). Os resultados dos ensaios indicaram que o reforço com a geogrelha de FV é eficaz na redução de deformação permanente em misturas asfálticas, provavelmente devido às forças de tração e ao confinamento proporcionado pela abertura da malha. Outro fator importante, também observado por Lee et al. (2015), foi o tamanho da malha da geogrelha, que teve um papel considerável, pois quanto maior a malha, melhor é o desempenho da mistura asfáltica.

De uma forma geral, os trabalhos apresentados na literatura envolvendo o reforço de camadas asfálticas, revelam que há poucas informações disponíveis para avaliar o impacto das geogrelhas na melhoria da capacidade estrutural da mistura asfáltica. Em particular, faltam informações sobre os possíveis mecanismos que poderiam levar a um comportamento aprimorado a longo prazo das camadas de asfalto reforçadas com geogrelhas. Portanto, este trabalho tem por objetivo avaliar a influência de diferentes tipos de geogrelhas para reforço de misturas asfáltica dosadas pelo método Marshall. O estudo quantifica e avalia os parâmetros mecânicos das misturas asfáltica com e sem a inclusão das geogrelhas e faz uma análise estrutural de um pavimento flexível. Estas informações facilitam a compreensão da resposta estrutural do pavimento asfáltico e espera-se que leve ao desenvolvimento de uma metodologia para prever a resposta dos pavimentos asfálticos reforçados com geogrelhas.

4.2 MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais empregados para a composição das misturas asfálticas à quente foram: agregados minerais (brita 1, brita 0 e pó de pedra) de formação gnáissica, ligante asfáltico convencional CAP 50/70 e as geogrelhas poliméricas. Esses materiais estão caracterizados no Capítulo 2.

As misturas asfálticas foram dosadas pelo método Marshall, conforme os métodos de ensaio ME 043 (DNER, 1995) e D6926 (ASTM, 2016), e inserem-se nas faixas granulométricas C e B da especificação de serviço ES 031 (DNIT, 2006).

Após a moldagem dos corpos de prova compostos, foram realizados os ensaios mecânicos: (i) módulo de resiliência (MR), (ii) resistência à tração por compressão diametral (RT), (iii) fadiga por compressão diametral e (iv) creep estático. Estes ensaios estão descritos no Capítulo 2.

4.2.1 Moldagem dos Corpos de Prova Compostos

Os corpos de prova das misturas asfálticas dosadas pelo método Marshall foram moldados segundo os procedimentos de ensaio ME 043 (DNER, 1995) e D6926 (ASTM, 2016), utilizando-se 75 golpes por face no compactador Marshall, com algumas alterações, uma vez que os corpos de prova foram moldados com as duas faixas granulométricas (C e B) no mesmo corpo de prova, conforme Figura 1. A geogrelha foi colocada na interface entre as duas misturas.

Figura 1 – Corpo de prova moldado no compactador Marshall nas faixas granulométricas C e B.



Fonte: Os Autores (2019).

O procedimento de moldagem dos corpos de prova compostos Marshall seguiu o procedimento descrito abaixo:

- a. Pesagem dos agregados minerais e do ligante asfáltico para cada metade do corpo de prova, em recipientes separados, nas quantidades de 50% das frações obtidas nas dosagens de cada faixa granulométrica (C e B) e os teores de projeto definidos;
- b. Aquecimento dos agregados minerais e do ligante asfáltico em estufa separadas de acordo com os procedimentos PRO 178 (DNIT, 2018);
- c. Os agregados minerais da faixa granulométrica C foram homogeneizados com o ligante asfáltico no teor de projeto determinado pelo método de dosagem Marshall;
- d. Após a homogeneização do agregado mineral da faixa granulométrica C com o ligante asfáltico, a mistura asfáltica retornava para a estufa por um intervalo de 2 minutos, para que a segunda metade do corpo de prova possa ser homogeneizada;
- e. Os agregados minerais da faixa granulométrica B foram homogeneizados com o ligante asfáltico no teor de projeto determinado pelo método de dosagem Marshall;
- f. Após a homogeneização do agregado mineral da faixa granulométrica B com o ligante asfáltico, a mistura asfáltica retornava para a estufa por um intervalo de 2 minutos,
- g. Colocou-se a mistura asfáltica homogeneizada da faixa granulométrica C no molde Marshall e aplicar dois golpes, com a finalidade de fazer um nivelamento da primeira mistura.
- h. Colocou-se a geogrelha nos corpos de prova. Nos corpos de prova sem a geogrelha esta etapa é suprimida.
- i. Colocou-se a mistura asfáltica homogeneizada da faixa granulométrica B sobre a geogrelha e iniciar a compactação com 75 golpes em cada face do corpo de prova.
- j. Extração do corpo de prova do molde.

4.2.2 Análise Estrutural do Pavimento Flexível Adotado

A análise estrutural do pavimento flexível adotado nessa pesquisa foi realizada sobre uma estrutura pré-definida. 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 as diferentes combinações de misturas asfálticas com e sem a inclusão das geogrelhas. Com o auxílio do software *me-PADS*, 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 constituído de capa asfáltica, binder, base e reforço do subleito, assentado sobre o subleito. Os dados de entrada utilizados nesse software foram: propriedades das camadas (espessura, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson); localização; e magnitude das cargas e as coordenadas dos pontos para a determinação das respostas estruturais esperadas do pavimento asfáltico analisado.

Para os dados de entrada referentes às camadas do pavimento asfáltico analisado, 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, já para as camadas de reforço (A-2-4) e subleito (A-7-5) foram adotados $\nu=0,40$, conforme Carmo et al. (2019).

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.

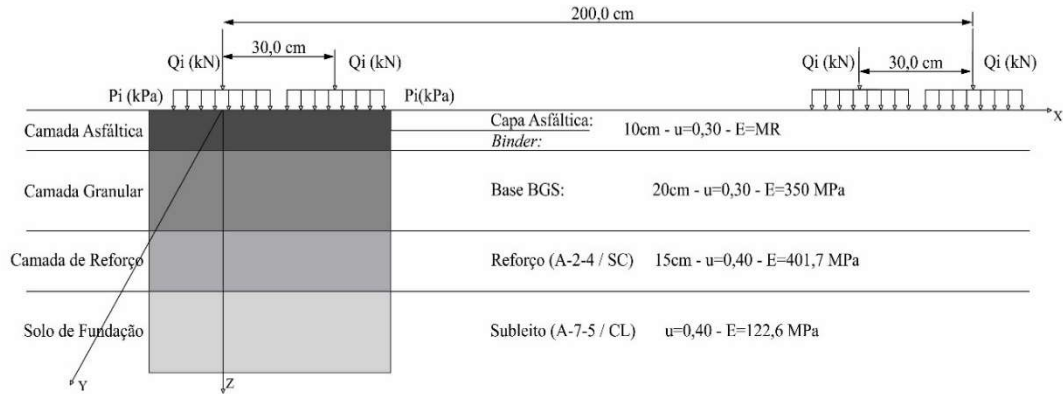
Da mesma forma, foram utilizados três níveis correspondentes de pressão de enchimento de pneus, quais sejam:

- 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 uma representação do pavimento flexível adotado para a análise das tensões e deformações em alguns pontos de sua camada e o carregamento com duas

rodas aplicado na sua superfície. As características dos materiais utilizados no subleito, reforço do subleito e base foram extraídos do estudo de Carmo et al. (2019).

Figura 2 – Pavimento asfáltico analisado nas análises estruturais.



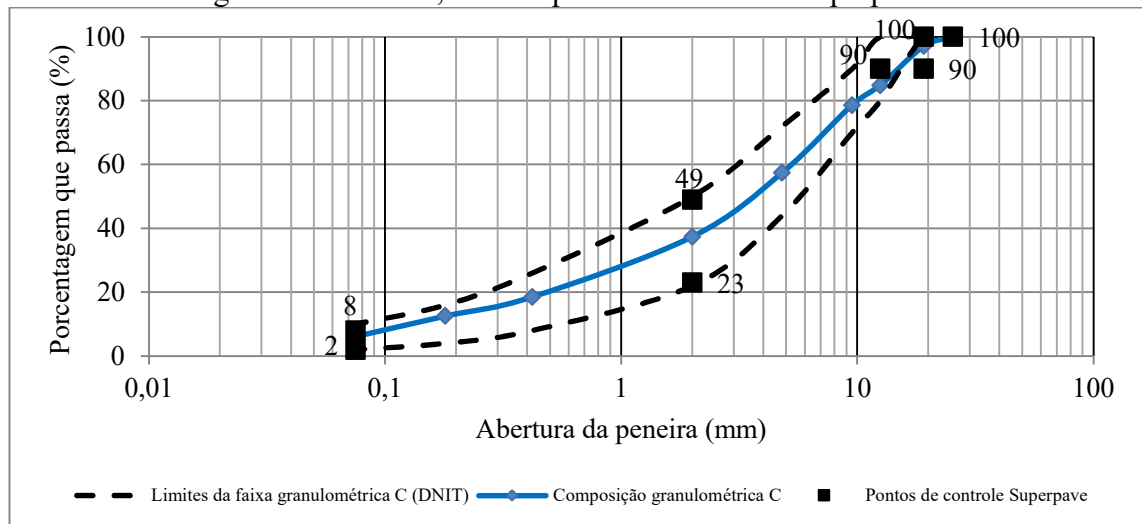
Fonte: Os Autores (2019).

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.3.1 Análise Granulométrica das Misturas Asfálticas Estudadas

Na Figura 3, é apresentada a distribuição granulométrica da mistura asfáltica enquadrada na faixa C da especificação de serviço do ES 031 (DNIT, 2006b).

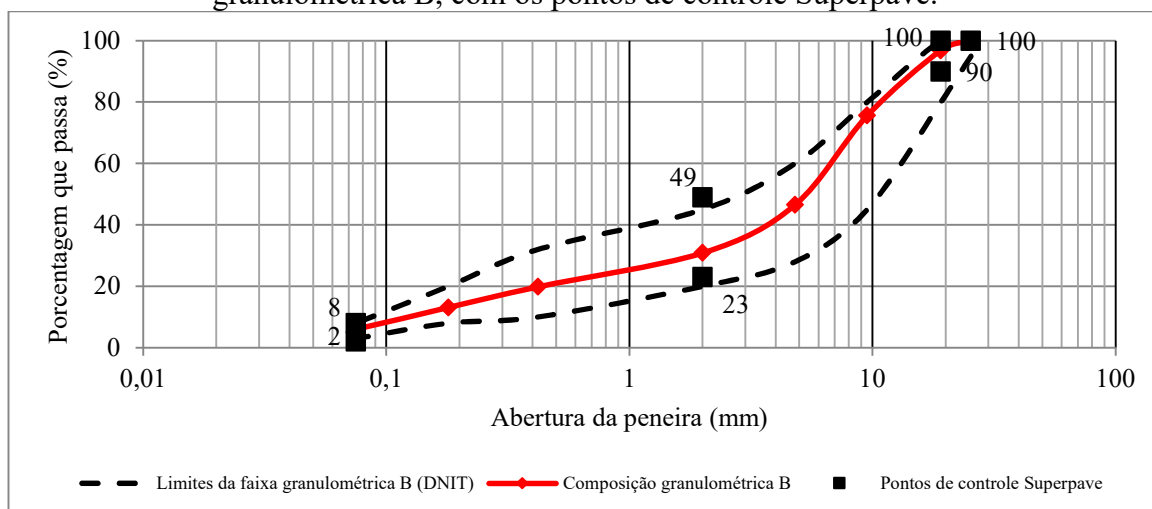
Figura 3 – Distribuição granulométrica das misturas asfálticas da faixa granulométrica C, com os pontos de controle Superpave.



Fonte: Os Autores (2019).

Na Figura 4, é apresentada a distribuição granulométricas da mistura asfáltica enquadrada na faixa B da especificação de serviço do ES 031 (DNIT, 2006).

Figura 4 – Distribuição granulométrica das misturas asfálticas da faixa granulométrica B, com os pontos de controle Superpave.



Fonte: Os Autores (2019).

4.3.2 Parâmetros Volumétricos das Misturas Estudadas

Na Tabela 1, são apresentados os parâmetros volumétricos das misturas asfálticas estudadas e seus respectivos dados mecânicos de estabilidade e fluência Marshall.

Tabela 1 – Parâmetros volumétricos e mecânicos dos corpos de prova moldados sem e com geogrelha.

	SGeo	Geo1	Geo2	Geo3	
Condição de interface	sem geogrelha	com geogrelha 1	com geogrelha 2	com geogrelha 3	
Matéria prima da geogrelha	NA	Poliálcool vinílico (PVA)	Fibra de vidro (FV)	Poliéster (PET)	
Faixa granulométrica	C e B				
Teor de projeto (%)	C ^(*)	4,70			
	B ^(**)	4,20			
V _v (%)	CP ^(***)	4,65	5,07	5,02	4,90
	C ^(*)	4,26	4,68	4,61	4,49
	B ^(**)	5,04	5,46	5,43	5,31
RBV (%)	CP ^(***)	70,03	68,08	68,33	68,86
	C ^(*)	72,97	70,96	71,32	71,86
	B ^(**)	67,09	65,19	65,34	65,86
VAM (%)	CP ^(***)	15,53	15,91	15,86	15,76
	C ^(*)	15,75	16,13	16,06	15,96
	B ^(**)	15,31	15,69	15,66	15,56
Estabilidade (kgf)	559,12	704,10	721,43	694,75	
Fluência (mm)	4,20	4,40	4,49	4,31	
Massa específica aparente (g/cm ³)	2,470	2,459	2,461	2,465	
DMT (g/cm ³) – C ^(*)	2,580				
DMT (g/cm ³) – B ^(**)	2,601				
(*) parte superior do CP		(**) parte inferior do CP		(***) corpo de prova composto	

Fonte: Os Autores (2019).

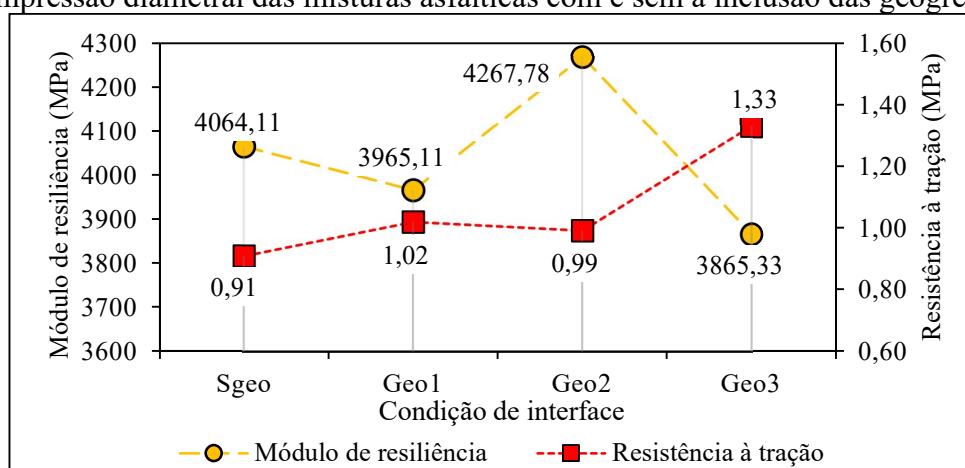
Observa-se, que apesar de os corpos de prova serem compactados com misturas asfálticas com duas faixas granulométricas (C e B), conforme a Tabela 1, os volumes de vazios ficaram dentro das especificações de serviço ES 031 (DNIT, 2006b).

Através da análise dos valores dos parâmetros de estabilidade e fluência Marshall apresentados na Tabela 1, percebeu-se que a incorporação da geogrelha promoveu um aumento na estabilidade, se comparado com a mistura asfáltica sem geogrelha. Outro fator a se observar que quanto maior a rigidez da geogrelha maior foi o valor desses parâmetros.

4.3.3 Ensaio de Módulo de Resiliência e Resistência à Tração por Compressão Diametral

Na Figura 5, são apresentados os valores médios do módulo de resiliência e resistência à tração por compressão diametral obtidos de três corpos de prova, determinados para as amostras ensaiadas com e sem a inclusão dos três tipos de geogrelhas estudadas.

Figura 5 – Valores médios de módulo de resiliência e resistência à tração por compressão diametral das misturas asfálticas com e sem a inclusão das geogrelhas.



Fonte: Os Autores (2019).

Observa-se que apesar dos corpos de prova serem compactados com as mesmas configurações de misturas asfálticas, a variação entre os valores de módulo de resiliência fora da ordem de 10,4%. Para qual a média dos valores da mistura asfáltica compactada com a utilização da geogrelha Geo2 apresentou maior módulo de resiliência, e a configuração com a Geo3 o menor valor.

Com relação à resistência à tração por compressão diametral, a variação entre o maior valor e o menor encontrado foi da ordem de 46,3%, que a condição do corpo de prova

com a inclusão da geogrelha tipo Geo3 foi a que apresentou maior resistência à tração. Por outro lado, a que apresentou menor resistência à tração foi a do corpo de prova sem a inclusão da geogrelha.

Na Tabela 2, são apresentados os valores médios dos módulos de resiliência (MR), resistência à tração por compressão diametral (RT) determinados para as misturas asfálticas investigadas e as respectivas relações MR/RT. 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.

Tabela 2 – Valores do módulo de resiliência e resistência à tração por compressão diametral para os corpos de prova com e sem a inclusão das geogrelhas.

Condição de Interface	Geogrelha	Módulo de Resiliência (MPa)	Resistência à Tração (MPa)	Relação MR / RT
Sem Geogrelha SGeo	-	4.064,11	0,91	4.473,56
Com Geogrelha Geo1	PVA	3.965,11	1,02	3.891,02
Com Geogrelha Geo2	FV	4.267,78	0,99	4.306,07
Com Geogrelha Geo3	PET	3.865,33	1,33	2.907,96

Fonte: Os Autores (2019).

Nesta pesquisa, a relação MR/RT mais próximas da sugerida pelos autores acima citados foi a condição de interface Geo3. A condição de interface Geo2 resultou no maior valor de módulo de resiliência, enrijecendo a mistura asfáltica e podendo levar ao trincamento, fato este que será verificado nos ensaios de vida de fadiga.

4.3.4 Ensaio de Fadiga por Compressão Diametral

Na Tabela 3, estão apresentadas as constantes “ k_1 e k_2 ” das curvas de fadiga para o modelo mostrado na equação 1, referente às misturas estudadas.

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

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

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.

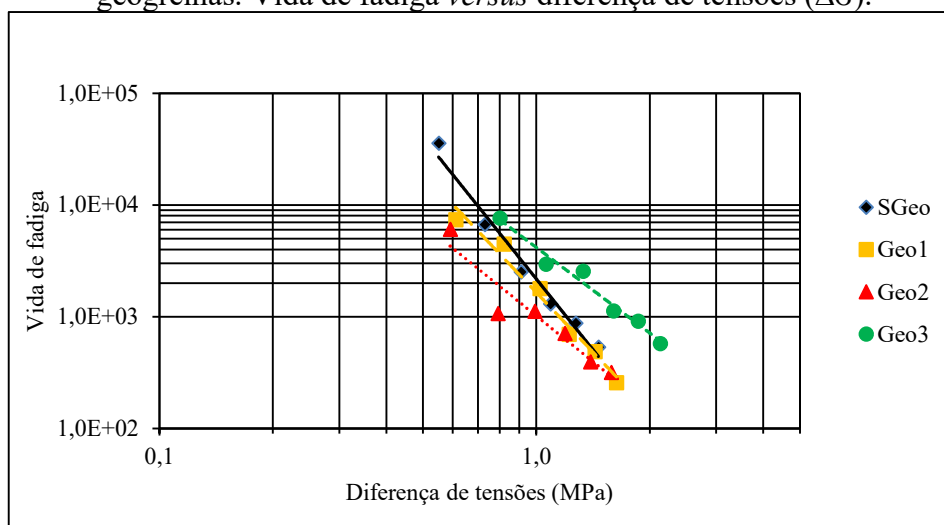
Tabela 3 – Parâmetros das curvas de fadiga das misturas asfálticas estudada com e sem a inclusão das geogrelhas.

Condição de Interface	Geogrelha	Fadiga		R ²
		k ₁	k ₂	
Sem Geogrelha SGeo	-	2.171,5	-4,213	0,9791
Com Geogrelha Geo1	PVA	1.644,5	-3,554	0,9748
Com Geogrelha Geo2	FV	1.015,5	-2,733	0,9101
Com Geogrelha Geo3	PET	4.166,3	-2,546	0,9742

Fonte: Os Autores (2019).

A Figura 6 apresenta os resultados das curvas de fadiga, expressas em número de repetições de carga, para as misturas asfálticas dosadas pelo método Marshall nas quatro condições de interface estudadas.

Figura 6 – Curvas de fadiga das misturas asfálticas com e sem a inclusão das geogrelhas. Vida de fadiga *versus* diferença de tensões ($\Delta\sigma$).



Fonte: Os Autores (2019).

Analisando-se os resultados do ensaio de vida de fadiga através da variação de diferença de tensão ($\Delta\sigma$), percebe-se que as misturas asfálticas com a inclusão Geo3 na interface entre as camadas asfálticas apresentaram melhores resultados em relação às outras condições de interface. Este fato está relacionado com a rigidez do material de interface, pois de acordo com Bastos et al. (2015) e Elsing e Leite-Gambus (2019), quanto menor a rigidez da geogrelha de interface maior será a vida de fadiga da mistura asfáltica, isto pode ser observado na Figura 6.

4.3.5 Ensaio de Creep Estático

Na Tabela 4, são apresentadas as médias dos valores obtidos de deslocamentos e deformações de três corpos de prova durante o ensaio de creep estático, para cada configuração de mistura asfáltica com e sem a inclusão das geogrelhas de reforço. Na Figura 7, têm-se as curvas do ensaio de deformação permanente para cada uma destas misturas estudadas.

Tabela 4 – Valores médios de deslocamentos e deformações dos corpos de prova do ensaio de creep estático das misturas asfálticas estudadas com e sem a inclusão das geogrelhas.

Condição de interface	Condição de interface			
	SGeo	Geo1	Geo2	Geo3
Geogrelha	-	PVA	FV	PET
Teor de asfalto (%) – faixa granulométrica C	4,70			
Teor de asfalto (%) – faixa granulométrica B	4,20			
Tempo do ensaio (segundo)	4500			
Deslocamento plástico máximo (mm)	0,0930	0,1800	0,3307	0,1250
Deformação plástica específica máxima (mm/mm)	0,0020	0,0039	0,0072	0,0027
Deslocamento plástico final (mm)	0,0613	0,1307	0,2687	0,0747
Deformação plástica específica final (mm/mm)	0,0013	0,0028	0,0059	0,0016
Deformação recuperável (%)	58,9	71,8	80,7	59,2
Deformação permanente (%)	41,1	28,2	19,3	40,8

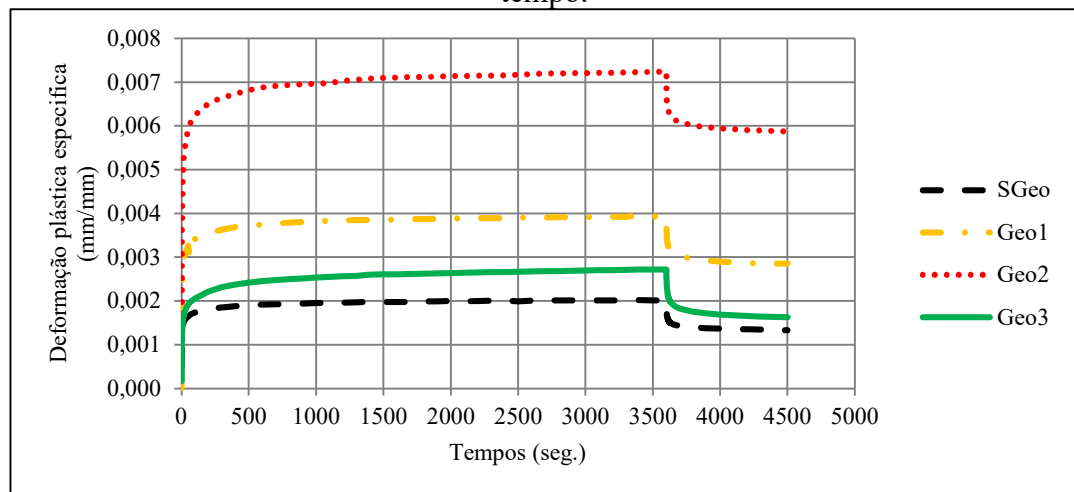
Fonte: Os Autores (2019).

Observa-se na Tabela 4 que os valores de deformação plástica obtido para a condição de interface SGeo é menor do que os obtidos para as condições de interface com geogrelha (Geo1, Geo2 e Geo3). Além disso, verifica-se que, comparando-se os resultados das condições de interface com geogrelha, o valor médio de deformação plástica obtido para o corpo de prova Geo2 é o maior, já o menor valor foi obtido para a condição de interface Geo3.

Observa-se, na Figura 7, que as misturas que apresentaram maiores deformações totais (D_t) foram a Geo1 e a Geo2. Observa-se que a mistura asfáltica Geo2 apresentou deformação plástica específica, igual a 3,5 vezes o valor obtido para a mistura asfáltica sem a inclusão da geogrelha (SGeo). Em termos de valores absolutos, a mistura asfáltica Geo2 apresentou o maior valor de deformação permanente e a melhor recuperação desta.

Em termos de recuperação elástica, a Tabela 4 apresenta os valores médios de cada uma das misturas estudadas. Os corpos de prova SGeo e Geo3 apresentaram valores de recuperação elástica dentro da mesma magnitude, evidenciando uma melhor recuperação elástica para os corpos de prova SGeo.

Figura 7 – Resultado do ensaio de creep estático das misturas dosadas pelos métodos Marshall com e sem a inclusão das geogrelhas. Deformação plástica específica *versus* tempo.



Fonte: Os Autores (2019).

A partir dos resultados dos ensaios de creep estático e das Equações 3, 4 e 5 obtêm-se os indicadores que permitem analisar a sensibilidade dos corpos de prova de cada composição asfáltica à deformação permanente: deformação total (D_t) média durante todo o ensaio (4500 segundos); o módulo de fluência (M_f) após o período de recuperação do corpo de prova da mistura asfáltica (4500 segundos); e a inclinação do estágio secundário da curva (I_{curva}) de deformação *versus* tempo de carregamento. Os valores destes parâmetros estão apresentados na Tabela 5.

$$D_t = \frac{\Delta h_{4500}}{h_0} \quad (3)$$

$$M_f = \frac{\sigma}{D_t} \quad (4)$$

$$I_{curva} = \frac{\log(\varepsilon_{3600}) - \log(\varepsilon_{1000})}{\log(3600) - \log(1000)} \quad (5)$$

Em que:

D_t : deformação total (mm/mm);

Δh_{4500} : variação da altura do corpo de prova, após o período de recuperação (4500s);

Δh_0 : medida inicial da altura do corpo de prova (mm);

M_f : módulo de fluência após o período de recuperação;

σ : nível de tensão do ensaio (MPa);

ϵ_{3600} : deformação para 3600 segundos de ensaio (mm);

ϵ_{1000} : deformação para 1000 segundos de ensaio (mm).

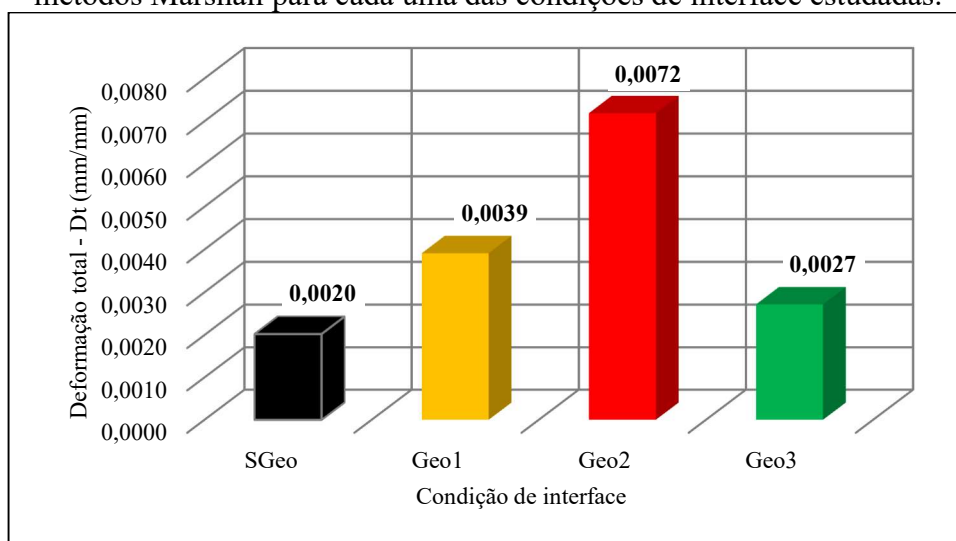
Tabela 5 – Valores médios para os parâmetros D_t (Deformação total), M_f (módulo de fluência), e I_{curva} (inclinação da curva) para os corpos de prova das misturas asfálticas analisadas.

Condição de Interface	Geogrelha	D_t (mm/mm)	M_f (4500s) (MPa)	I_{curva}
Sem Geogrelha SGeo	-	0,0020	54,70	0,029
Com Geogrelha Geo1	PVA	0,0039	26,56	0,022
Com Geogrelha Geo2	FV	0,0072	14,02	0,030
Com Geogrelha Geo3	PET	0,0027	36,12	0,059

Fonte: Os Autores (2019).

A Figura 8 apresenta os valores de deformação total (D_t), obtidos dos ensaios de creep estático realizado a 0,1 MPa à temperatura de 40°C. Nesta figura, pode-se verificar que a condição de interface Geo2 apresentou maior deformação total (D_t), por outro lado a condição de interface SGeo foi a que apresentou menor deformação total.

Figura 8 – Deformação total (D_t) do ensaio de creep estático das misturas dosadas pelos métodos Marshall para cada uma das condições de interface estudadas.

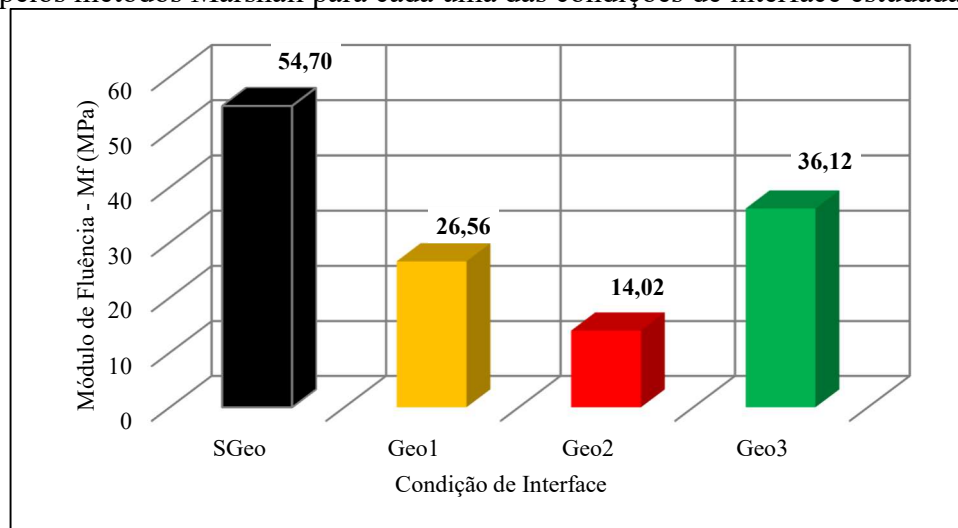


Fonte: Os Autores (2019).

O comportamento dos corpos de prova estudados, em relação à deformação total (D_t), indica que a condição de interface Geo2 apresentou maior deformação total (D_t), pelo menos 3,6 vezes o valor da deformação medida para a condição de interface SGeo, que apresentou menor deformação total.

A Figura 9 apresenta os valores do módulo de fluência (M_f) das misturas asfálticas estudadas após o período de recuperação do material ($t=4500$ segundos). Este parâmetro é usado para determinar a capacidade da mistura asfáltica de resistir à deformação em determinado nível de tensão. Como o módulo de fluência está relacionado ao nível de tensão aplicado sobre o corpo de prova e com a deformação total após o término do ensaio ($t=4500$ segundos), observa-se que quanto maior o valor de M_f maior é a capacidade dessa mistura asfáltica de resistir a deformações permanentes.

Figura 9 – Módulo de fluência (M_f) do ensaio de creep estático das misturas dosadas pelos métodos Marshall para cada uma das condições de interface estudadas.



Fonte: Os Autores (2019).

A partir da análise da Figura 9, nota-se que a mistura asfáltica com a condição de interface SGeo, apresentou o maior módulo de fluência, portanto esta condição de interface tem maior capacidade de resistir a deformação permanente se comparada com a Geo2.

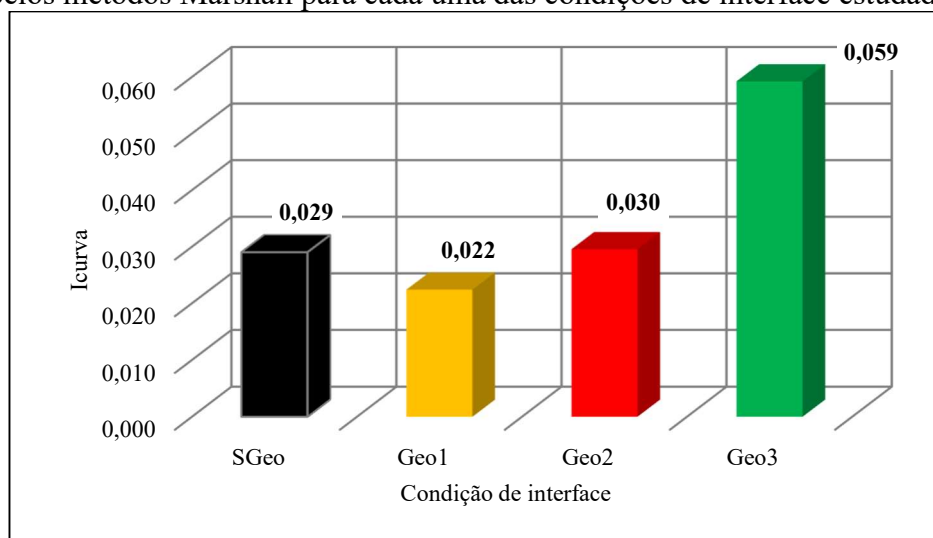
No entanto, Kronfuss et al. (1984) apud Little; Button; Youssef (1993), sugerem um critério para análise das misturas asfálticas através do resultado do módulo de fluência, no qual a mistura asfáltica com a condição de interface Geo1 se enquadra no nível de tráfego moderado. Já a mistura asfáltica com Geo2, se enquadra no nível baixo de tráfego e a mistura asfáltica com Geo3, no nível de tráfego alto. A mistura asfáltica com interface SGeo apresentou valor de módulo de fluência acima do limite superior estabelecido pelos

autores acima citados. Para estes, o módulo acima de 46,5 MPa a uma temperatura de 40°C, e carregamento de 0,1 MPa eram considerados muito altas e sujeitas ao trincamento por fadiga induzido pelo carregamento ou efeitos térmicos. Contudo, este limite superior foi estabelecido para climas europeus mais frios, onde os efeitos de trincamento por baixas temperaturas devem ser considerados como tendo um significado diferente do que em países com climas tropicais.

Observa-se que os parâmetros D_t e M_f mostram uma relação inversa, isto é, à medida que o M_f cresce, os valores de D_t das misturas estudadas diminuem.

Na Figura 10, apresenta-se a variação dos valores da I_{curva} da mistura asfáltica para cada uma das condições de interface estudada. A inclinação média da curva de fluência, mostra a velocidade com que a fluência ocorre, ou seja, o comportamento de uma mistura asfáltica é melhor quanto menor a inclinação. Portanto, quanto maior o valor deste parâmetro maior a suscetibilidade da mistura asfáltica a uma velocidade de deformação mais elevada.

Figura 10 – Inclinação da curva (I_{curva}) do ensaio de creep estático das misturas dosadas pelos métodos Marshall para cada uma das condições de interface estudadas.



Fonte: Os Autores (2019).

A inclinação da curva para a mistura asfáltica com a condição de interface Geo3 indica um aumento na velocidade de deformação. Por outro lado a mistura asfáltica com a condição de interface Geo1 apresentou a menor velocidade de deformação por fluência. As condições de interface SGeo e Geo2 apresentaram praticamente a mesma velocidade de deformação.

Em suma, os resultados do ensaio de creep estático apresentaram a mistura asfáltica com a condição de interface Geo2, que apresentaram maiores valores de

deformação total, menor módulo de fluência e menor deformação por fluência. Esta mistura asfáltica apresenta maior valor de deformação inicial, porém entre os instantes 1000 e 3600 segundos, os valores de deformação aumentaram apenas 3%. Já a mistura asfáltica com a condição de interface Geo3 apresentaram valor de deformação inicial da ordem de 3 vezes menor que a deformação inicial da Geo2, entretanto no intervalo de 1000 a 3600 segundos, esta cresce 7%.

4.3.6 Análise Estrutural do Pavimento Flexível Adotado

Empregando-se os resultados dos ensaios mecânicos realizados na mistura asfáltica com e sem a inclusão das geogrelhas, foram realizadas doze análises empírico-mecanísticas para a estrutura do pavimento flexível adotado (Figura 2), considerando-se os três níveis de carregamento e de pressões de enchimento.

Nas análises empírico-mecanísticas realizadas foram consideradas as combinações das misturas das faixas granulométricas C e B de projeto da especificação de serviço ES 031 (DNIT, 2006b), com as quatro condições de inclusões de interface (SGeo, Geo1, Geo2 e Geo3). Mantiveram-se constantes as espessuras e características mecânicas das camadas de base, reforço do subleito e subleito (coeficiente de Poisson e módulo de resiliência) e variaram-se as características mecânicas das camadas asfálticas.

Foram observados os valores de tensões e deslocamentos nos pontos críticos das camadas asfálticas, tais como: (i) deslocamento vertical na superfície da capa asfáltica, (ii) tensão de tração na fibra inferior da capa asfáltica, correspondente à condição de interface (SGeo, Geo1, Geo2 e Geo3) e (iii) tensão de tração na fibra inferior da camada da faixa granulométrica B (binder). Esses critérios buscam averiguar o desempenho do revestimento asfáltico em relação à vida de serviço do pavimento.

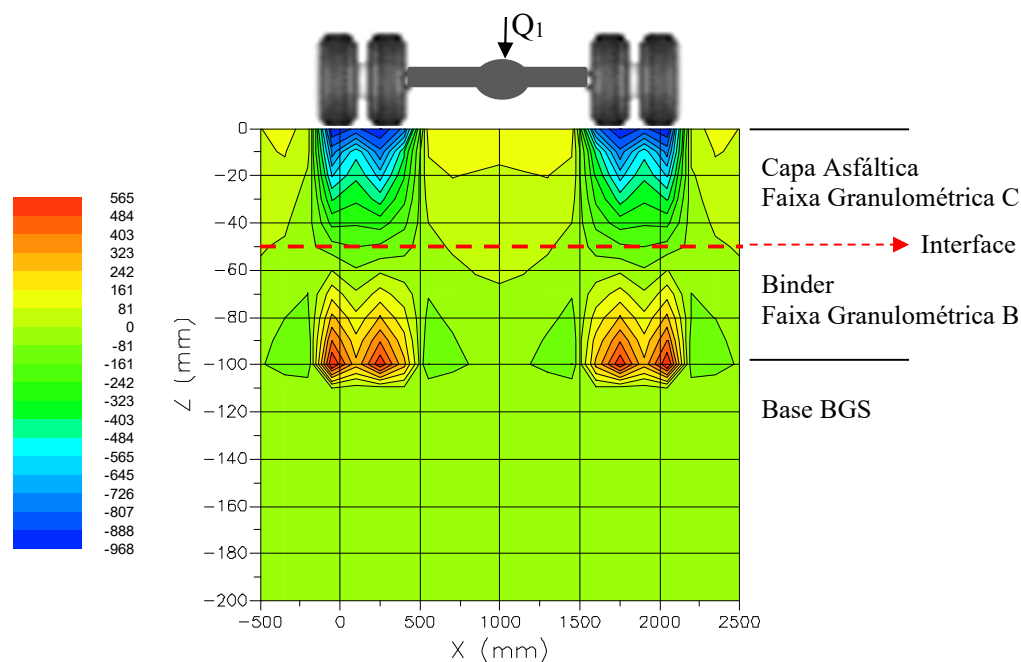
As análises foram realizadas nas posições de maiores tensões e deformações na estrutura do pavimento tipo. Observa-se na Figura 11 que as maiores tensões horizontais (σ_h) estão sob os pontos de aplicação de carga. Portanto as análises foram realizadas considerando os deslocamentos e tensões na posição x igual a 0 e y igual a 0.

Na Figura 11 são apresentadas as tensões horizontais (σ_h), que atuam na estrutura do pavimento asfáltico adotado para a condição de interface SGeo, para o carregamento de 80 kN por eixo e pressão de enchimento dos pneus de 563 kPa, obtido com o software *me-PADS*.

Observa-se que as maiores tensões horizontais de tração (σ_h) estão na fibra inferior da camada de binder, a posição $x=0\text{mm}$ e $x=2000\text{mm}$ corresponde às maiores tensões

horizontais de compressão (σ_h) na capa asfáltica, que estão concentradas sob os pontos de aplicação de carga (pontos sob os pneus). Assim, as análises estruturais do pavimento flexível analisado foram realizadas considerando as tensões e deslocamentos nestes pontos.

Figura 11 – Tensão horizontal (σ_h) na camada asfáltica dosada pelo método Marshall, para a condição de interface SGeo e carga por eixo de 80 kN e pressão de enchimento dos pneus de 563 kPa (software *me-PADS*).



Fonte: Os Autores (2019).

Na Tabela 6, são apresentadas as maiores tensões horizontais ($\sigma_h = \sigma_x$) e verticais ($\sigma_v = \sigma_z$), na fibra inferior das camadas asfálticas em função da variação do carregamento dos eixos e das condições de interface estudadas.

Ao analisar as tensões horizontais (σ_h) que ocorrem na fibra inferior da capa asfáltica, obtidas pelo software *me-PADS*, 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 (σ_h) 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 todos os carregamentos analisados apresentam valores inferiores aos encontrados para a resistência à tração por compressão diametral para os corpos de prova das misturas asfálticas com as respectivas condições de interface.

Para as tensões verticais (σ_v) que atuam na fibra inferior da capa asfáltica e de binder, obtidas pelo software *me-PADS*, verificou-se que estas são de compressão (sinal negativo), uma vez que as solicitações do tráfego são de compressão na estrutura do pavimento.

Tabela 6 – Tensão horizontal (σ_h) e vertical (σ_v) na posição $x=0\text{mm}$, atuantes na fibra inferior das camadas asfálticas em função dos níveis de carregamento adotados para as condições de interface estudadas.

Condição de Interface	Carga por eixo (kN)	Pressão de enchimento (kPa)	Capa Asfáltica (5,0cm da superfície)		Camada de Binder (10,0cm da superfície)	
			$\sigma_h^{(1)}$ (MPa)	$\sigma_v^{(2)}$ (MPa)	$\sigma_h^{(3)}$ (MPa)	$\sigma_v^{(4)}$ (MPa)
SGeo	80	563	-0,169	-0,411	0,643	-0,192
	98	633	-0,204	-0,466	0,744	-0,229
	118	703	-0,241	-0,522	0,848	-0,268
Geo1	80	563	-0,170	-0,412	0,632	-0,194
	98	633	-0,204	-0,467	0,731	-0,231
	118	703	-0,241	-0,524	0,832	-0,271
Geo2	80	563	-0,168	-0,408	0,664	-0,189
	98	633	-0,202	-0,463	0,770	-0,225
	118	703	-0,239	-0,519	0,878	-0,263
Geo3	80	563	-0,170	-0,413	0,621	-0,196
	98	633	-0,204	-0,469	0,718	-0,234
	118	703	-0,242	-0,525	0,817	-0,273

⁽¹⁾ σ_h na fibra inferior a 5,0cm da superfície do revestimento (compressão)

⁽²⁾ σ_v na fibra inferior a 5,0cm da superfície do revestimento (compressão)

⁽³⁾ σ_h na fibra inferior a 10,0cm da superfície do revestimento (tração)

⁽⁴⁾ σ_v na fibra inferior a 10,0cm da superfície do revestimento (compressão)

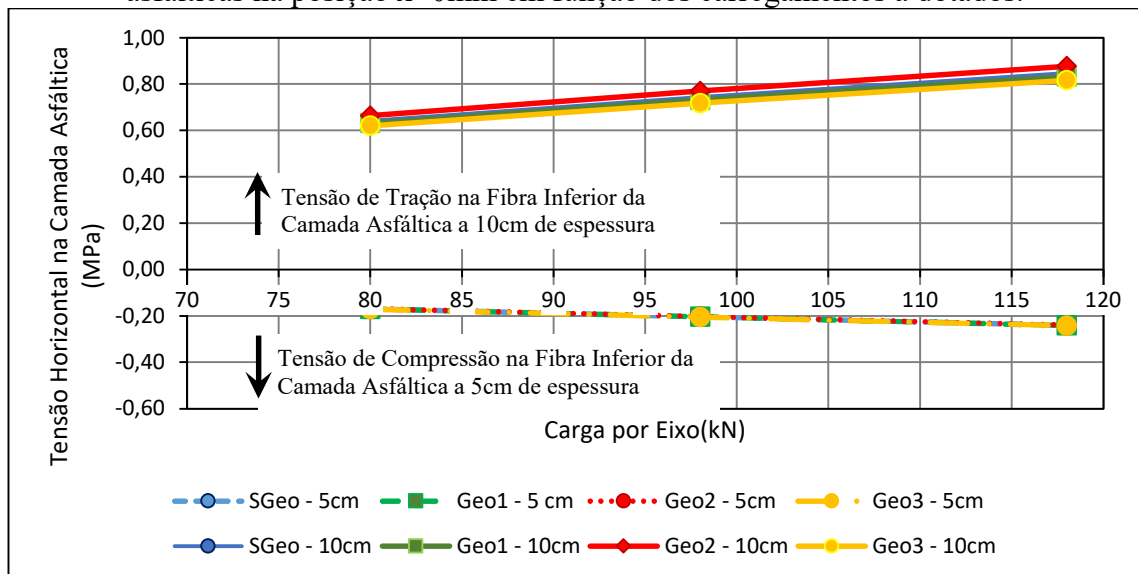
Fonte: Os Autores (2019).

A Figura 12 apresenta uma representação gráfica da variação das tensões horizontais (σ_h) (apresentadas na Tabela 6) atuantes nas fibras inferiores das camadas asfálticas do pavimento flexível analisado, em função dos carregamentos e das condições de interface adotados.

A Figura 12 apresenta a variação das tensões horizontais (σ_h) atuantes na fibra inferior das camadas asfálticas do pavimento asfáltico adotado, em função dos níveis de carregamentos estudados. Observa-se nesta figura que em cada um dos quatro tipos de pavimentos asfálticos analisados, as tensões horizontais (σ_h) em cada camada asfáltica variaram com a condições de interface e o nível de carregamento. As tensões atuantes na camada asfáltica da faixa granulométrica C (tensão de compressão), foram analisadas estatisticamente através do programa R (*R Development Core Team 2008*), onde as retas de regressão não diferenciaram estatisticamente ao nível de 5% de significância, apesar da condição de interface estudada, sem geogrelha (SGeo) e com geogrelha (Geo1, Geo2

e Geo3). Para as tensões de tração (faixa granulométrica B) apesar da variação entre os seus valores serem pequenas, estatisticamente estes valores não diferem ao nível de 5% de significância calculado pelo programa R.

Figura 12 – Tensões horizontais (σ_h) atuantes na fibra inferior das camadas asfálticas na posição $x=0\text{mm}$ em função dos carregamentos adotados.



Fonte: Os Autores (2019).

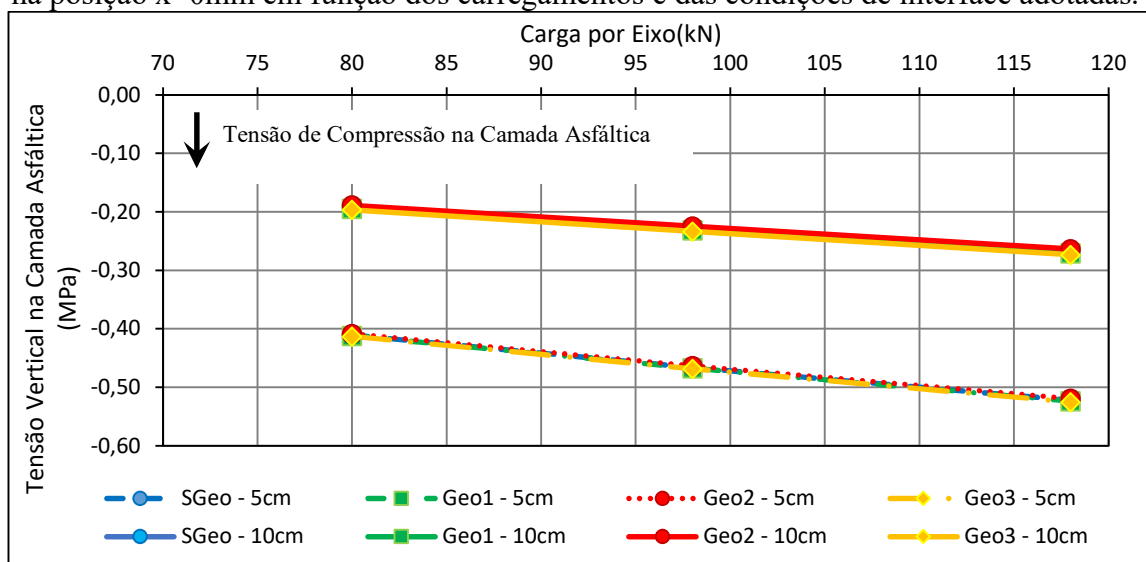
Analisando-se ainda a Figura 12, verifica-se que, para um mesmo nível de carregamento, a maior variação das tensões horizontais (σ_h) foi encontrada entre a condição de interface Geo2 e Geo3, cuja variação foi entorno de 7%. Isto ocorre em todos os níveis de carregamento e pode ser justificado pelo fato que a mistura asfáltica Geo3 apresentaram menor valor de modulo de resiliência e a Geo2 o maior valor. Ou seja, como as misturas asfálticas Geo3 apresentam menores valores de modulo de resiliência, estas se mostram mais flexíveis quando comparadas com as misturas asfáltica Geo2. De forma que, este decréscimo de tensões horizontais está relacionado com o fato de que misturas asfálticas mais flexíveis redistribuem e absorvem mais tensões horizontais, o que explica a redução observada tanto nas tensões de tração como de compressão.

A Figura 13 apresenta a variação das tensões verticais (σ_v) atuantes na fibra inferior das camadas asfálticas do pavimento asfáltico adotado, em função dos carregamentos e das condições de interface adotadas.

Observa-se na Figura 13 que em cada um dos quatro tipos de pavimentos asfálticos analisados, as tensões verticais (σ_v) em cada camada asfáltica variaram com a condições de interface e o nível de carregamento adotado. Analisando-se estatisticamente os resultados das tensões verticais (σ_v) atuantes nas camadas asfálticas das faixas

granulométrica C (revestimento) e B (binder) com o programa R, verifica-se que as retas de regressão não diferem estatisticamente ao nível de 5% de significância, independente da condição de interface estudada, sem geogrelha (SGeo) e com geogrelha (Geo1, Geo2 e Geo3). Além disso, estas tensões são de compressão.

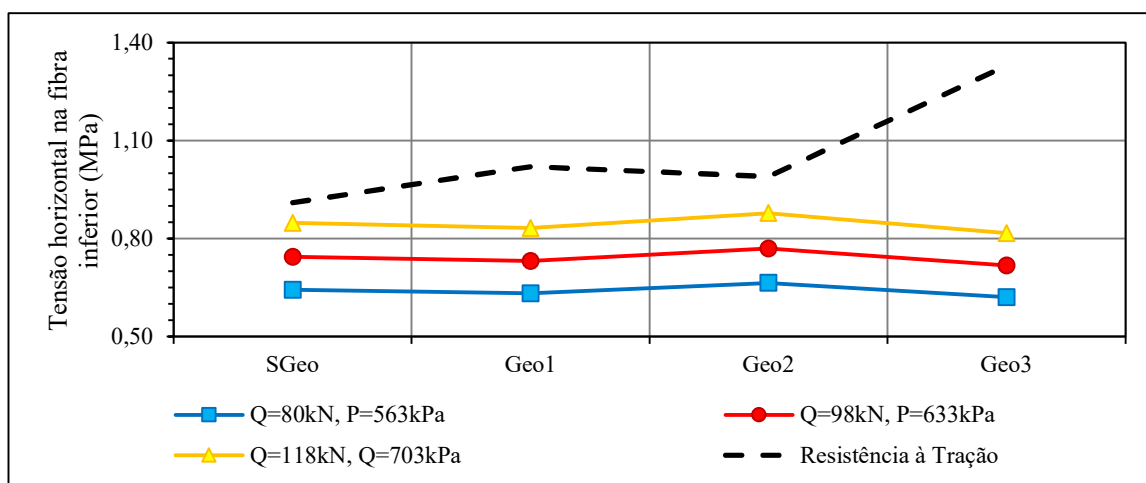
Figura 13 – Tensões verticais (σ_v) atuantes na fibra inferior das camadas asfálticas, na posição $x=0\text{mm}$ em função dos carregamentos e das condições de interface adotadas.



Fonte: Os Autores (2019).

Dada a constatação experimental de que as tensões de tração críticas se desenvolvem no bordo inferior da camada de binder (faixa granulométrica B), a Figura 14 apresenta, para esse bordo, as respectivas curvas de variação das tensões de tração em função da condição de interface e da condição de carregamento. Também é representada a curvas de resistência à tração por compressão diametral das misturas asfálticas analisadas.

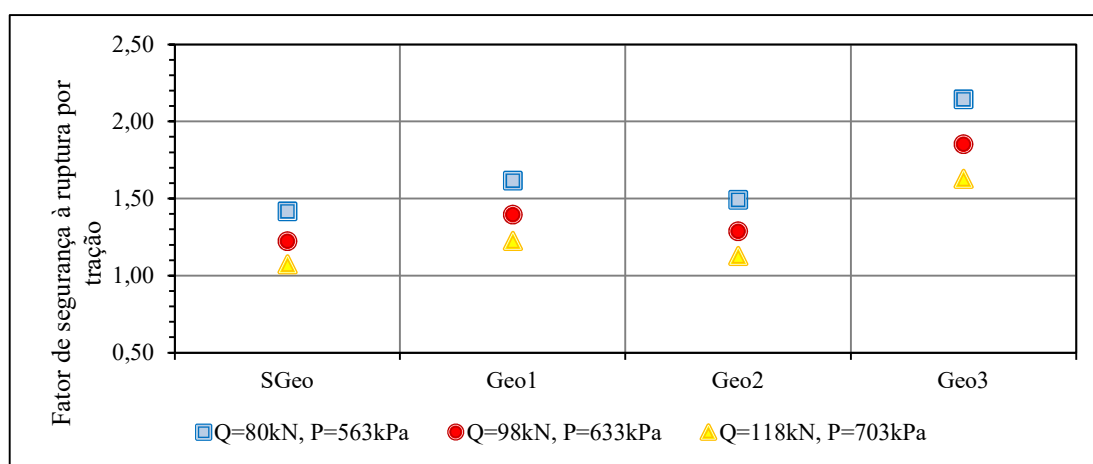
Figura 14 – Tensões de tração atuantes no bordo inferior da camada de binder do pavimento adotado em função da condição de interface, na posição $x=0\text{mm}$



Fonte: Os Autores (2019).

Com base no exposto na Figura 14 verifica-se que, apesar das diferenças de comportamento das tensões horizontais das misturas asfálticas com cada uma das condições de interface, verifica-se ainda que as tensões de tração calculadas pelo programa computacional *me-PADS* são inferiores à resistência de tração das misturas asfálticas estudadas, como pode ser visto na Figura 14. Neste contexto, a Figura 15 apresenta os respectivos fatores de segurança à ruptura por tração (relação entre a resistência à tração por compressão diametral e a tensão de tração no bordo inferior da camada de binder) para todos os cenários investigados e representados na Figura 15.

Figura 15 – Fator de segurança à ruptura da camada de Binder em função da condição de interface.



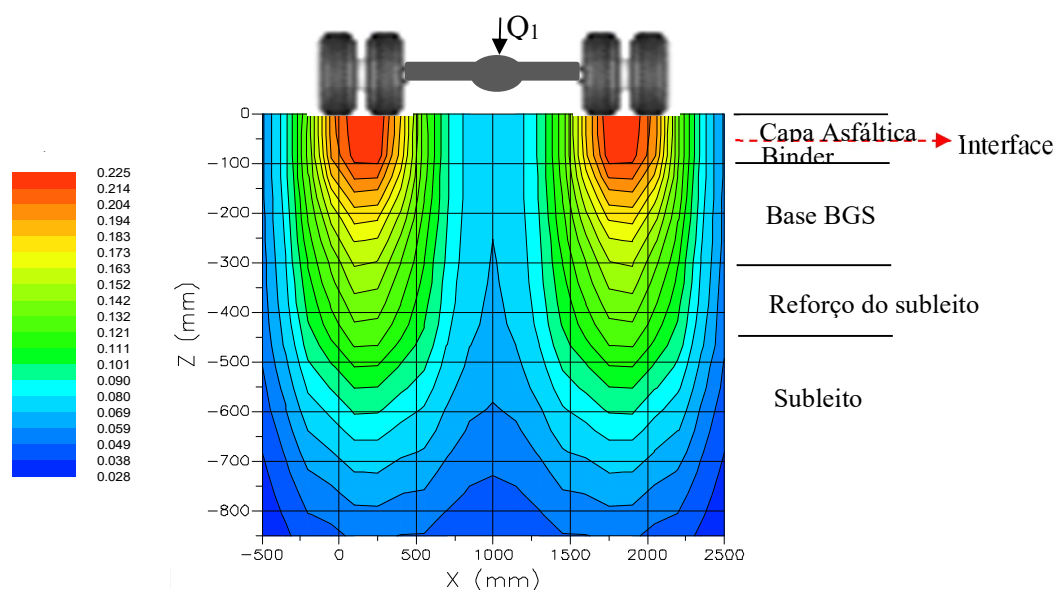
Fonte: Os Autores (2019).

Na Figura 15, pode-se observar que, para cada uma das misturas asfálticas analisadas, a relação entre a resistência à tração e a tensão horizontal atuante é maior do que 1,0. Apenas no caso SGeo, obteve-se o fator de segurança igual a 1,07 para o nível de carregamento de 118kN, o que representa um dos extremos da faixa analisada nesta pesquisa.

É importante ressaltar que a variação na condição de interface das misturas asfálticas apresenta efeito significativo sobre o comportamento estrutural dos pavimentos adotados, no entanto não constitui risco de ruptura para as camadas asfálticas sem (SGeo) e com a inclusão das geogrelhas (Geo1, Geo2 e Geo3).

Na Figura 16 são apresentados os valores das deflexões verticais (δz) recuperáveis previstas na estrutura do pavimento adotado, com a condição de interface SGeo, para o carregamento de 80 kN por eixo e pressão de enchimento dos pneus de 563 kPa.

Figura 16 – Deflexões verticais (δz) na estrutura do pavimento adotado, na condição de interface SGeo, analisado para o carregamento de 80kN por eixo.



Fonte: Os Autores (2019).

É possível verificar na Figura 16 que as maiores deflexões verticais recuperáveis ocorrem nas camadas asfálticas (capa asfáltica e binder) de maneira similar este efeito também ocorreu para as condições de interface Geo1, Geo2 e Geo3. As deflexões verticais recuperáveis máximas no topo da camada asfáltica dos pavimentos adotados para cada um dos carregamentos adotados estão apresentadas na Tabela 7.

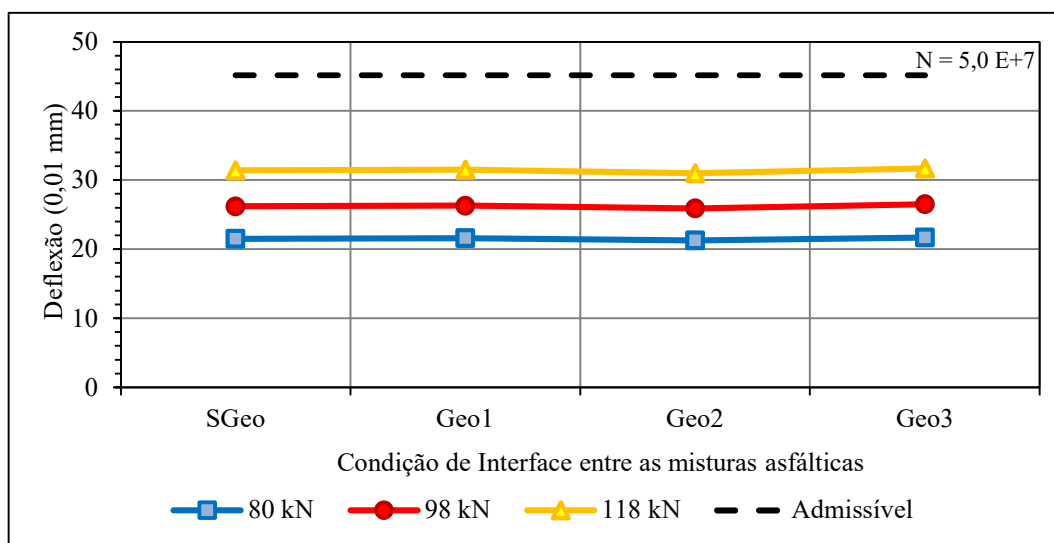
Tabela 7 – Deflexões verticais (δz) recuperáveis máximas no topo da camada asfáltica, na posição $x=0$ mm, dos pavimentos adotados em função da condição de interface e dos níveis de carregamento sobre as rodas.

Condição de Interface	Geogrelha	Carga por eixo Q_{eixo} (kN)	Pressão de enchimento P_{pneus} (kPa)	Deflexões Máxima (0,01 mm)
SGeo	-	80	563	21,50
		98	633	26,20
		118	703	31,40
Geo1	PVA	80	563	21,60
		98	633	26,30
		118	703	31,50
Geo2	FV	80	563	21,30
		98	633	25,90
		118	703	31,00
Geo3	PET	80	563	21,70
		98	633	26,50
		118	703	31,70

Fonte: Os Autores (2019).

Para fins de avaliação dos valores de deflexões máximas apresentadas na Tabela 7, foi calculada a deflexão admissível, segundo o procedimento PRO 011 (DNER, 1979), para um tráfego pesado ($N=5 \times 10^7$), conforme a classificação da rodovia segundo o Manual de Pavimentação (DNIT, 2006a). A deflexão admissível calculada para este nível de tráfego é $45,18 \times 0,01 \text{ mm}$ e representada pela linha tracejada na Figura 17.

Figura 17 – Deflexões verticais máximas na estrutura do pavimento adotado, na posição $x=0 \text{ mm}$, em função da condição de interface e do carregamento por eixo.



Fonte: Os Autores (2019).

Analisando-se os valores de deflexões expostos na Tabela 7 e representados na Figura 17, é possível observar que a condição de interface das misturas asfálticas não apresentou variação significativa no comportamento das estruturas analisadas, apesar do módulo de resiliência apresentar variações na ordem de 9%.

Conhecidos os níveis de tensões atuantes no pavimento tipo, através das simulações realizadas com o software *me-PADS*, para cada nível de carregamento imposto pelo tráfego, verificou-se a vida de fadiga das misturas asfálticas para as condições de interface: (i) SGeo; (ii) Geo1; (iii) Geo2; e (iv) Geo3 (Tabela 8).

As respostas estruturais consideradas evidenciam que, para iguais cargas por eixo, as misturas asfálticas da condição de interface Geo3 apresentam vida de fadiga superior à das outras condições de interface (Figura 18).

Tabela 8 – Variação dos valores da vida de fadiga das misturas asfálticas para as cargas de eixo simuladas no software *me-PADS*.

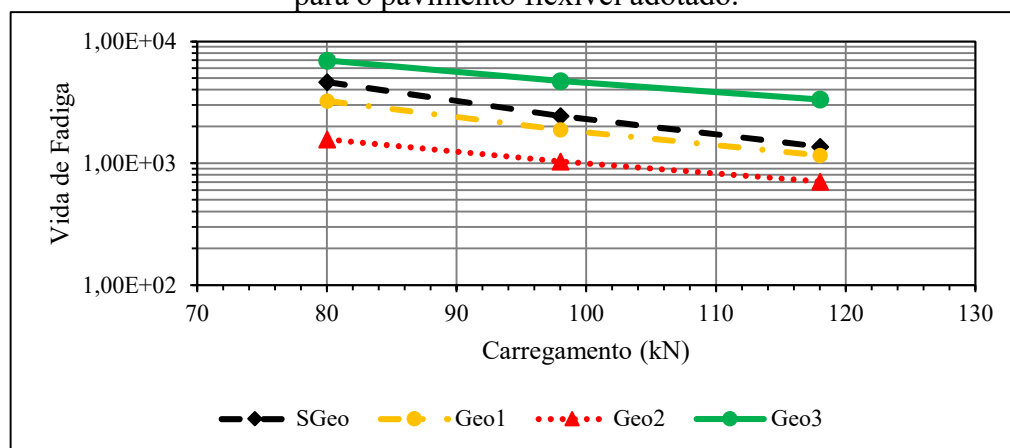
Condição de Interface	Geogrelha	Carga por eixo (kN)	Análise a 5,0cm		Análise a 10,0cm	
			$\Delta\sigma^{(1)}$ (MPa)	Vida de Fadiga	$\Delta\sigma^{(1)}$ (MPa)	Vida de Fadiga
SGeo	-	80	0,2414	8,66E+05	0,8351	4,64E+03
		98	0,2624	6,09E+05	0,9731	2,44E+03
		118	0,2817	4,52E+05	1,1158	1,37E+03
Geo1	PVA	80	0,2421	2,54E+05	0,8262	3,24E+03
		98	0,2633	1,89E+05	0,9623	1,88E+03
		118	0,2827	1,47E+05	1,1031	1,16E+03
Geo2	FV	80	0,2402	5,01E+04	0,8529	1,57E+03
		98	0,2610	3,99E+04	0,9944	1,03E+03
		118	0,2801	3,29E+04	1,1411	7,08E+02
Geo3	PET	80	0,2428	1,53E+05	0,8171	6,97E+03
		98	0,2640	1,24E+05	0,9514	4,73E+03
		118	0,2836	1,03E+05	1,0902	3,34E+03

⁽¹⁾ $\Delta\sigma$ = diferença de tensões

Fonte: Os Autores (2019).

Analisando-se a Figura 18, pode-se concluir que, para os níveis de carregamento estudados, o pavimento flexível simulado com os parâmetros da mistura com a condição de interface Geo3 apresentou maiores valores de vida de Fadiga do que o pavimento flexível simulado com os parâmetros das misturas asfálticas com as outras condições de interface. De fato, considerando o carregamento padrão de 80 kN, a vida de fadiga do pavimento flexível obtido com a condição de interface Geo3 foi 4,4 vezes maior ($6,97 \times 10^3$), ao passo que o pavimento flexível obtido com a condição Geo2 apresenta $VF=1,57 \times 10^3$. Já com relação a condição SGeo e Geo1, o valor de Geo3 foi 1,5 e 2,0 vezes, respectivamente maior.

Figura 18 - Vida de fadiga das misturas asfálticas dosadas pelos métodos Marshall para o pavimento flexível adotado.



Fonte: Os Autores (2019).

Os resultados encontrados na literatura (KHODAI et al., 2009, SARIDE; KUMAR, 2017) apresentam comparações entre misturas asfálticas não reforçadas (SGeo) e misturas asfálticas reforçadas com geogrelhas de fibra de vidro (Geo2) e poliéster (Geo3), que estão consistentes com os resultados obtidos nesta pesquisa para as mesmas condições Sgeo, Geo2 e Geo3.

4.4 CONCLUSÕES

Nesta pesquisa possibilitaram concluir:

- O procedimento desenvolvido para compactação dos corpos de prova se mostrou bastante eficiente, pois não foram observados problemas de aderência entre as duas partes dos corpos de prova;
- O maior valor de MR foi determinado para a mistura Geo2. Por outro lado, o menor valor encontrado foi para a Geo3. Entretanto, o maior valor de RT encontrado foi para a mistura Geo3 e o menor foi para o Geo2;
- Analisando-se a relação MR/RT, a mistura SGeo foi o que apresentou maior valor para esta relação, entretanto o menor valor da relação MR/RT foi para o Geo3.
- As curvas de fadiga tiveram bons coeficientes de determinação (R^2). Foi observado uma tendência de maior vida de fadiga para a mistura Geo3. Esta tendência foi confirmada através de análises com a utilização do software *me-PADS*, em um pavimento flexível adotado, a qual foi possível verificar que o desempenho desta mistura foi superior, independente do carregamento aplicado.
- Com relação ao ensaio de creep estático, deformação permanente, observa-se que as misturas Geo1 e Geo2 foram as que apresentaram maiores deformações totais. A mistura que apresentou maior I_{curva} foi a Geo3, o que indica que a velocidade de deformação desta configuração é maior e tem potencial de acumular maiores deformações. Entretanto, a Geo3 apresentou um dos maiores módulos de fluência (M_f), o que indica uma maior resistência à deformação permanente.

Com base nos resultados apresentados é possível concluir que os corpos de prova com a condição de interface Geo3 foi a que teve melhor desempenho entre as inclusões pesquisadas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDESSEMED, M.; KENAI, S.; BALI, A. Experimental and numerical analysis of the behavior of an airport pavement reinforced by geogrids. **Construction and Building Materials**. n. 94, p. 547–554. 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D6926-16**, Standard Practice for Preparation of Asphalt Mixture Specimens Using Marshall Apparatus, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.

BASTOS, G. A.; CASAGRANDE, M.D.T.; MOTTA, L.M.G.; FOLLE, D. Ensaio de tração em discos circulares em misturas asfálticas reforçadas com geogrelha. **Revista de Engenharia Civil IMED**. v.2, n. 2, p. 27-36. 2015. DOI: 10.18256/2358-6508/rec-imed. v2, n2, p.27-36

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.

CORREIA, N.S.; ZORNBERG, J.G. Strain distribution along geogrid-reinforced asphalt overlays under traffic loading. **Geotextiles and Geomembranes**. vol. 46. p. 111-120. 2018.

DE BONDT, A.H. **Anti-Reflective Cracking Design of (Reinforcement) Asphaltic Overlays**. Ph.D. Thesis, Delft University of Technology. 1999. 365 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **PRO 011**: Avaliação estrutural dos pavimentos flexíveis. Procedimento de ensaio. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Rio de Janeiro. 1979. 16 p.

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, 2018. 19p.

DHAKAL, N.; ELSEIFI, M.A.; ZHANG, Z. Mitigation strategies for reflection cracking in rehabilitated pavements – A synthesis. **International Journal of Pavement Research and Technology**. n. 9, p. 228-239. 2016.

ELSING, A.; LEITE-GEMBUS, F. Parameter to Ensure a Durable Grid-Reinforced Asphalt Pavement. **7th International Conference Bituminous Mixtures and Pavements**. Anais. Thessaloniki, Greece. 2019.

FALLAH, S.; KHODAIL, A. Reinforcing overlay to reduce reflection cracking; an experimental investigation. **Geotextiles and Geomembranes**. n. 43, p. 216-227. 2015.

FERROTTI, G.; CANESTRARI, F.; PASQUINI, E.; VIRGILI, A. A strategic laboratory approach for the performance investigation of geogrids in flexible pavements. **Construction and Building Materials**. vol. 25. p. 2343-2348. 2011.

FERROTTI, G.; CANESTRARI, F.; PASQUINI, E.; VIRGILI, A. Experimental evaluation of the influence of surface coating on fiberglass geogrid performance in asphalt pavements. **Geotextiles and Geomembranes**. vol. 34. p. 11-18. 2012.

FRITZEN, M. A.; MOTTA, L. M. G. Comportamento da geogrelha aplicada em pavimentos submetido a tráfego acelerado com uso do HVS na rodovia Rio - Teresópolis e balanço de trechos de uso de geotêxtil como reforço de pavimentos asfálticos. In: **XIII COBRAMSEG / III CLBG / IV SBMR: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos**, 2006, Curitiba. Comportamento da geogrelha aplicada em pavimentos submetido a tráfego acelerado com uso do HVS na rodovia Rio - Teresópolis, 2006

KHODAIL A., FALLAH, S.; NEJAD, F. M. Effects of geosynthetics on reduction of reflection cracking in asphalt overlays. **Geotextiles and Geomembranes**. vol. 27. p. 1-8. 2009.

LEE, J.; KIM, Y. R.; LEE, J. Rutting performance evaluation of asphalt mix with different types of geosynthetics using MMLS3. **International Journal of Pavement Engineering**. vol. 16. n. 10, p. 894-905. 2015.

LEITE, L.F.M.; MOTTA, L.M.G.; BERNUCCI, L.B. e 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. 2000. Pp. 309-318.

LITTLE, D.N.; BUTTON, J.W.; YOUSSEF, H. Development of Criteria To Evaluate Uniaxial Creep Data and Asphalt Concrete Permanent Deformation Potential. **Transportation Research Record**, v. 1417, p. 49-57. 1993.

LYTTON, R.L.; TSAI, F.L.; LEE, S.I.; LUO, R.; HU, S.; ZHOU, F. Models for Predicting Reflection Cracking of Hot-Mix Asphalt Overlays. NCHRP Report 669. **Transportation Research Board**. Transportation Institute of Texas A&M University, College Station, TX.

MOUNES, S.M., KARIM, M.R., KHODAIL, A.; ALMASI, M.H. Evaluation of performance deformation of geogrid reinforced asphalt concrete using dynamic creep test. **Geotextiles and Geomembranes**. vol. 44. p. 109-116. 2016.

NEJAD, F.M.; ASADI, S.; FALLAH, S.; VADOOD, M. Statistical-experimental study of geosynthetics performance on reflection cracking phenomenon. **Geotextiles and Geomembranes**. n. 44, p. 178-187. 2016.

NORAMBUENA-CONTRERAS, J.; GONZALEZ-TORRE, I. Influence of geosynthetics type on retarding cracking in asphalt pavements. **Construction and Building Materials**. vol. 78. p. 421-429. 2015.

PINHEIRO, J.H.M., SOARES, J.B. e 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. 2003. p 116-129.

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, 2014, p. 85-94.

SARIDE, S.; KUMAR, V.V. Influence of geosynthetics-interlayers on the performance of asphalt overlays on pre-cracked pavement. **Geotextiles and Geomembranes**. v. 45. p. 184-196. 2017.

SIRIWARDANE, H. GONDLE, R. e BORA, K. Analysis of Flexible Pavements Reinforced with Geogrids. **Geotechnical and Geological Engineering**. vol, 28, p. 287-297. 2010.

WALUBITA, L.F.; FARUK, A.N.M.; ZHANG, J.; HU, X. Characterizing the cracking and fracture properties of geosynthetic interlayer reinforced HMA samples using the Overlay Tester (OT). **Construction and Building Materials**. n. 93, p. 695–702. 2015.

5 AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS ASFÁLTICAS COMPOSTAS DOSADAS PELO MÉTODO SUPERPAVE REFORÇADAS COM GEOGRELHA.

RESUMO

O objetivo principal desta pesquisa foi avaliar a influência de diferentes tipos de geogrelhas para reforço de misturas asfálticas dosadas pelo método Superpave. Para tanto, o programa experimental desenvolvido, quanto aos materiais, foi composto por um ligante asfáltico CAP 50/70 e uma composição de agregados minerais de origem gnáissica e três tipos de geogrelhas (poliálcool vinílico, fibra de vidro e poliéster). Os resultados das dosagens Superpave indicaram teores de projeto de ligante asfáltico de 4,6% e 4,85% para as misturas asfálticas correspondentes às faixas granulométricas C e B da especificação de serviço ES 031 do DNIT para concreto asfáltico, respectivamente. Utilizaram-se corpos de provas moldados no compactador giratório (sendo metade do corpo de prova na faixa granulométrica C e a outra metade na faixa granulométrica B) para a realização dos ensaios mecânicos de módulo de resiliência (MR), resistência à tração por compressão diametral (RT), fadiga e deformação permanente (creep). Os parâmetros das misturas asfálticas resultantes foram aplicados na estrutura do pavimento flexível analisado pelo software *Mechanistic Empirical Pavement Analysis and Design Software (me-PADS v1.1)*, visando à obtenção das respostas estruturais referentes às deformações na superfície desse pavimento e às tensões nas fibras inferiores das camadas asfálticas. Dos resultados obtidos, conclui-se que as misturas asfálticas com a inclusão da geogrelha de poliéster (Geo3) apresentaram melhor desempenho quanto à fadiga e à deformação permanente quando comparadas às demais misturas analisadas.

Palavras-chaves: Misturas asfálticas densas. Ensaios mecânicos. Método Superpave. Geogrelhas.

EVALUATION OF THE MECHANICAL BEHAVIOR OF ASPHALT MIXTURES DOSED BY THE SUPERPAVE METHOD REINFORCED WITH GEOGRID.

ABSTRACT

The main objective of this research was to evaluate the influence of different types of geogrids for reinforcement of asphalt mixtures dosed by the Superpave method. To this end, the experimental program developed for the materials was composed of an asphalt binder CAP 50/70 and a composition of mineral aggregates of gneissic origin and three types of geogrids (polyvinyl alcohol, fiberglass and polyester). The results of the Superpave dosages indicated asphalt binder design contents of 4.6% and 4.85% for asphalt mixtures representative of the C and B particle size ranges of DNIT service specification ES 031 for asphalt concrete, respectively. Moulded specimens were used in the rotary compactor (being half of the specimen in the particle size range C and the other half in the particle size range B) to perform the mechanical tests of resilience module (MR), tensile strength by diametrical compression (RT), fatigue and permanent deformation (creep). The parameters of the resulting asphalt mixtures were applied to the flexible pavement structure analyzed by the Mechanistic Empirical Pavement Analysis and Design Software (me-PADS v1.1), aiming at obtaining the structural responses related to the deformations on the pavement surface and the stresses in the lower fibers of the asphalt layers. From the results obtained, it can be concluded that the asphalt mixtures with the inclusion of polyester geogrid (Geo3) showed better performance regarding fatigue and permanent deformation when compared to other mixtures analyzed.

Keywords: Dense asphalt mixtures. Mechanical tests. Superpave method. Geogrids.

5.1 INTRODUÇÃO

5.1.1 Considerações Iniciais

As estruturas dos pavimentos são constituídas por múltiplas camadas de espessuras finitas, que se integram entre si, constituídas por materiais de natureza e comportamentos diversos, destinados a resistir aos esforços provenientes do tráfego e das intempéries, além de proporcionar aos usuários conforto, segurança e economia.

A ação combinada do tráfego e do clima provocam na estrutura do pavimento efeitos de degradação, que irão resultar na queda de desempenho funcional e de serventia. A queda destes fatores está condicionada ao surgimento de dois dos principais defeitos, que são o trincamento por fadiga e a deformação permanente. Assim, intervenções de reabilitação e restauração de pavimentos devem ser promovidas.

O uso de geogrelhas na interface das camadas de asfalto é atualmente adotado para melhorar o desempenho do pavimento em termos de deformação permanente, fadiga e propagação de trincas. Vários métodos de ensaio foram propostos para simular o comportamento mecânico complexo de pavimentos reforçados.

Para tanto, Canestrari; Belogi; Ferrotti; e Graziani (2015) desenvolveram uma pesquisa em parceria com o RILEM (*International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures*) para analisar o desempenho de diferentes tipos de geogrelhas. Os ensaios foram realizados em duas etapas: a primeira constituída pela análise de vigas prismáticas moldadas em laboratórios, ensaiadas em três pontos; e a segunda pela análise do desempenho em campo destas geogrelhas. As geogrelhas utilizadas foram as de fibra de vidro e as de fibra de carbono. Os resultados mostraram que o reforço da geogrelha não influencia visivelmente a rigidez e resistência à flexão na fase de pré-trinca, enquanto a velocidade de propagação da trinca pode ser significativamente reduzida. Estes resultados laboratoriais foram confirmados pela observação visual periódica do desempenho em campo em termos da evolução do craqueamento reflexivo.

Sobhan; Genduso; Tandon (2005) realizaram ensaios estáticos e cíclicos em corpos de prova prismáticos moldados com misturas asfálticas, dosadas pelo método Superpave, reforçados com geogrelhas de polipropileno (PP), com o objetivo de verificar os efeitos da geogrelha quanto à mitigação da propagação de trincas e deformação permanente. Estes autores concluíram, com base nos dados coletados na pesquisa, que a inclusão da geogrelha nas amostras de concreto asfáltico leva a um aumento significativo no desempenho da mistura asfáltica. Por exemplo, as amostras

com geogrelhas apresentaram uma resistência à deformação permanente até 40% maior que as amostras sem geogrelha, e quanto à propagação de trincas as amostras com geogrelha apresentaram uma eficiência de duas vezes em relação às sem geogrelhas (SOBHAN; GENDUSO; TANDON, 2005).

Safavizadeh; Wargo; Guddati (2015) realizaram ensaios de flexão em quatro pontos em vigotas prismáticas reforçadas com geogrelhas de fibra de vidro (FV). Foram utilizadas para a confecção das vigotas misturas asfálticas Superpave e dois tipos de geogrelhas de fibra de vidro, com e sem revestimento de aderência. De uma forma geral, os autores concluíram que as vigotas reforçadas com geogrelha tiveram um comportamento superior às amostras não reforçadas. Verificaram ainda que o revestimento de aderência da geogrelha aumenta ainda mais a vida de fadiga da mistura asfáltica.

Gonzalez-Torre; Calzada-Perez; Vega-Zamanillo; e Castro-Fresno (2015) avaliaram o desempenho de seis tipos de geossintéticos [(i) geotêxtil não tecidos de polipropileno (PP), (ii) geotêxtil não tecido de PP com fibra de vidro (FV), (iii) geogrelha de poliéster (PET), (iv) geocomposto (geogrelha + geotêxtil) de polipropileno (PP), (v) geogrelha de fibra de vidro (FV) e (vi) geogrelha de fibra de carbono], utilizados para o reforço de camada asfáltica. Os ensaios laboratoriais foram realizados em vigas prismáticas, combinando duas cargas cíclicas com diferentes frequências. Os autores concluíram que todos os geossintéticos analisados diminuíram a abertura das trincas, porém os geotêxteis (i, ii) e o geocomposto (iv) provocaram uma descontinuidade entre as camadas asfálticas, reduzindo a abertura da trinca em 20% e 30%, respectivamente. Os autores ainda afirmam que, para as geogrelhas (iii, v, vi), foram observadas as maiores reduções de abertura de trinca, atingindo 40% (de redução no final do ensaio).

Phillips (2017) construiu uma pista experimental reforçada com geogrelhas de poliéster (PET) e de polivinil álcool (PVA). Cada trecho com 150 m e instrumentado com seis *strain gages* posicionados sobre as trincas pré-existentes. O posicionamento dos extensômetros foi determinado com o objetivo de se obter informações quanto às solicitações de abertura das trincas e às deformações do pavimento. As leituras nos extensômetros foram realizadas para três solicitações: (i) veículos de passeio, (ii) veículos comerciais e (iii) ensaio com FWD (*Falling Weight Deflectometer*). O autor conclui que a camada asfáltica reforçada com as geogrelhas de PET e PVA forneceram resistência à tração adicional à camada asfáltica, resultando em menores deformações à

tração e, conseqüentemente, em maior vida útil à fadiga. Além disso, as geogrelhas fizeram com que a camada asfáltica se comportasse como um sistema de tensões relativamente uniformes, distribuindo-os por uma área comparativamente maior. Isso levou à redução dos valores de pico de deformação, o que pode levar a deformações permanentes reduzidas.

De uma forma geral, os trabalhos apresentados na literatura envolvendo o reforço de camadas asfálticas revelam que há poucas informações disponíveis para avaliar o impacto das geogrelhas na melhoria da capacidade estrutural da mistura asfáltica. Em particular, faltam informações sobre os possíveis mecanismos que poderiam levar a um comportamento aprimorado a longo prazo das camadas de asfalto reforçadas com geogrelhas. Portanto, este trabalho tem por objetivo avaliar a influência de diferentes tipos de geogrelhas para reforço de misturas asfálticas dosadas pelo método Superpave. O estudo quantifica e avalia os parâmetros mecânicos das misturas asfálticas com e sem a inclusão das geogrelhas e faz uma análise estrutural de um pavimento flexível. Estas informações facilitam a compreensão da resposta estrutural do pavimento asfáltico e espera-se que leve ao desenvolvimento de uma metodologia para prever a resposta dos pavimentos asfálticos reforçados com geogrelhas.

5.2 MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais empregados para a composição das misturas asfálticas à quente foram: agregados minerais (brita 1, brita 0 e pó de pedra) de formação gnáissica, ligante asfáltico convencional CAP 50/70 e as geogrelhas poliméricas. Esses materiais estão caracterizados no Capítulo 2.

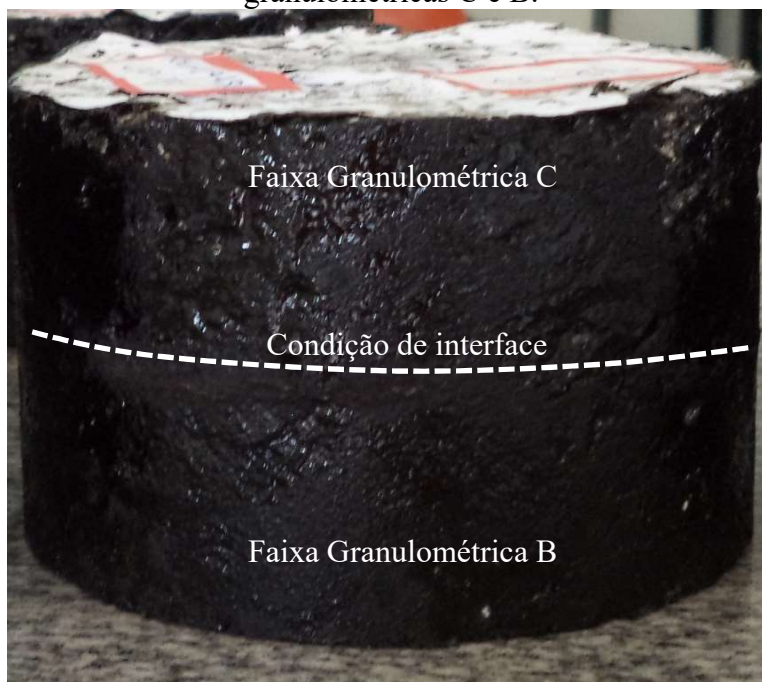
As misturas asfálticas foram dosadas pelo método Superpave, conforme os métodos de ensaio AS-95-003 (FHWA, 1994), A-407 (SHRP, 1994) e R 35-14 (AASHTO, 2014), e inserem-se nas faixas granulométricas C e B da especificação de serviço ES 031 (DNIT, 2006).

Após a moldagem dos corpos de prova compostos, foram realizados os ensaios mecânicos: (i) módulo de resiliência (MR), (ii) resistência à tração por compressão diametral (RT), (iii) fadiga por compressão diametral e (iv) creep estático. Estes ensaios estão descritos no Capítulo 2.

5.2.1 Moldagem dos Corpos de Prova Compostos

Os corpos de prova das misturas asfálticas dosadas pelo método Superpave (Nível 1) foram moldados segundo os procedimentos de ensaio R 35-14 (AASHTO, 2014), utilizando-se 100 giros para compactar os corpos de prova no compactador giratório, com algumas alterações, uma vez que os corpos de prova foram moldados com as duas faixas granulométricas (C e B), no mesmo corpo de prova, de modo que as composições granulométricas atendem ao critério estabelecido nas normas técnicas supracitadas quanto ao tamanho nominal máximo (TNM) de 19,0mm. Verifica-se na Figura 1, que a geogrelha foi colocada na interface entre as duas misturas.

Figura 1 – Corpo de prova moldado no compactador giratório Superpave nas faixas granulométricas C e B.



Fonte: Os Autores (2019).

A moldagem dos corpos de prova no compactador giratório Superpave seguiu o procedimento descrito abaixo:

- a. Pesagem dos agregados minerais e do ligante asfáltico para cada metade do corpo de prova, em recipientes separados, nas quantidades de 50% das frações obtidas nas dosagens de cada faixa granulométrica (C e B) e os teores de projeto definidos;
- b. Aquecimento dos agregados minerais e do ligante asfáltico em estufa separadas de acordo com os procedimentos PRO 178 (DNIT, 2018);

- c. Os agregados minerais da faixa granulométrica C foram homogeneizados com o ligante asfáltico no teor de projeto (4,6%) determinado pelo método Superpave;
- d. Após a homogeneização dos agregados minerais da faixa granulométrica C com o ligante asfáltico, a mistura asfáltica retornava para a estufa por um intervalo de 2 horas em temperatura de compactação para o envelhecimento de curto prazo;
- e. Os agregados minerais da faixa granulométrica B foram homogeneizados com o ligante asfáltico no teor de projeto (4,85%) determinado pelo método Superpave.
- f. Após a homogeneização dos agregados minerais da faixa granulométrica B com o ligante asfáltico, a mistura asfáltica retornava para a estufa por um intervalo de 2 horas em temperatura de compactação para o envelhecimento de curto prazo;
- g. Colocou-se o papel filtro no fundo do molde e em seguida colocou-se a mistura asfáltica da faixa granulométrica B no molde do compactador giratório Superpave e aplicaram-se 2 golpes com um soquete de madeira de 1,0 kg, com a finalidade de fazer um nivelamento da primeira mistura asfáltica colocada no suporte.
- h. Colocou-se a geogrelha nos corpos de prova. Para os corpos de prova sem a geogrelha esta etapa é suprimida.
- i. Coloca-se a mistura asfáltica homogeneizada da faixa granulométrica C sobre a geogrelha, coloca-se o papel filtro no topo do corpo de prova e inicia-se a compactação com 100 giros.
- j. extração do corpo de prova do molde após a compactação.

5.2.2 Análise Estrutural do Pavimento Flexível Adotado

A análise estrutural do pavimento flexível adotado nessa pesquisa foi realizada sobre uma estrutura pré-dimensionada. 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 as diferentes combinações de misturas asfálticas com e sem a inclusão das geogrelhas. Com o auxílio do software *me-PADS*, 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 (espessura, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson); localização; e

magnitude das cargas e as coordenadas dos pontos para a determinação das respostas estruturais esperadas do pavimento flexível analisado.

Para os dados de entrada referentes às camadas do pavimento asfáltico analisado, 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, já para as camadas de reforço (A-2-4) e subleito (A-7-5) foram adotados $\nu=0,40$, conforme Carmo et al. (2019).

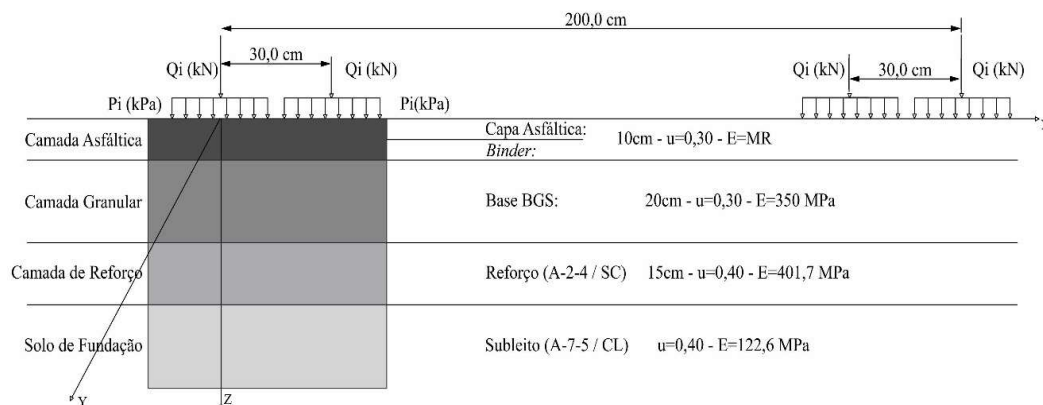
A escolha dos níveis de carregamento teve por base as seguintes considerações:

- 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 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 uma representação do pavimento flexível adotado para a análise das tensões e deformações em alguns pontos de sua camada e o carregamento com duas rodas aplicado na sua superfície. As características dos materiais utilizados no subleito, reforço do subleito e base foram extraídos do estudo de Carmo et al. (2019).

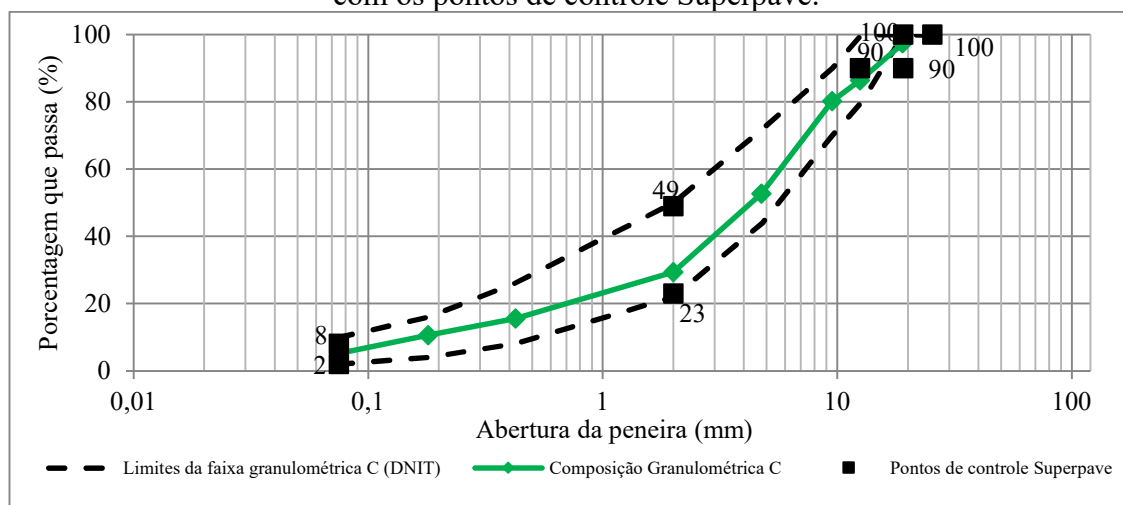
Figura 2 – Pavimento-tipo adotado nas análises estruturais.

Fonte: Os Autores (2019).

5.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.3.1 Análise Granulométrica das Misturas Asfálticas

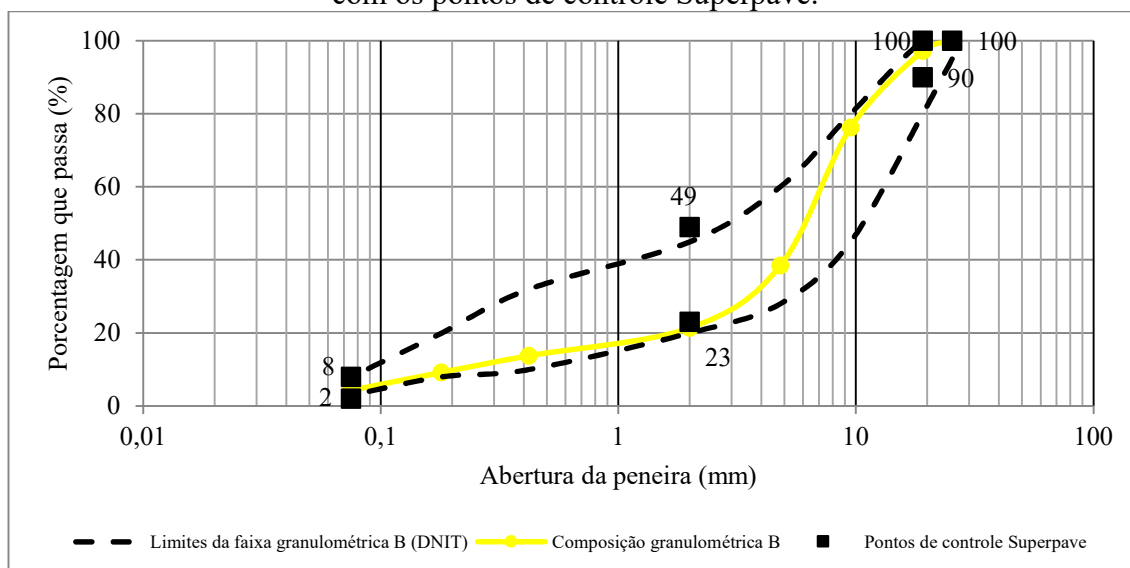
Na Figura 3, é apresentada a distribuição granulométrica da mistura asfáltica enquadrada na faixa C da especificação de serviço do ES 031 (DNIT, 2006b).

Figura 3 – Distribuição granulométrica da mistura asfáltica da faixa granulométrica C, com os pontos de controle Superpave.

Fonte: Os Autores (2019).

Na Figura 4, é apresentada a distribuição granulométrica da mistura asfáltica enquadrada na faixa B da especificação de serviço do ES 031 (DNIT, 2006).

Figura 4 – Distribuição granulométrica da mistura asfáltica da faixa granulométrica B, com os pontos de controle Superpave.



Fonte: Os Autores (2019).

5.3.2 Parâmetros Volumétricos das Misturas Asfálticas

Na Tabela 1, são apresentados os parâmetros volumétricos das misturas asfálticas estudadas e seus respectivos dados mecânicos de estabilidade e fluência.

Tabela 1 – Parâmetros volumétricos e mecânicos dos corpos de prova moldados sem e com geogrelha.

		SGeo	Geo1	Geo2	Geo3
Condição de Interface		sem geogrelha	com geogrelha 1	com geogrelha 2	com geogrelha 3
Matéria prima da geogrelha		NA	Poliálcool vinílico (PVA)	Fibra de vidro (FV)	Poliéster (PET)
Faixa granulométrica		C e B			
Teor de projeto (%)	C ^(*)	4,60			
	B ^(**)	4,85			
Vv (%)	CP ^(***)	3,97	4,67	4,50	4,77
RBV (%)	CP ^(***)	74,40	71,06	71,85	70,60
VAM (%)	CP ^(***)	15,52	16,13	15,98	16,22
Estabilidade (kgf)		1039,32	1011,98	873,81	1170,51
Fluência (mm)		5,19	4,92	5,60	5,63
Massa específica aparente (g/cm ³)		2,468	2,451	2,455	2,448
Gmm (g/cm ³) – C ^(*)		2,588			
Gmm (g/cm ³) – B ^(**)		2,569			
^(*) Parte superior do CP		^(**) Parte inferior do CP		^(***) Corpo de prova composto	

Fonte: Os Autores (2019).

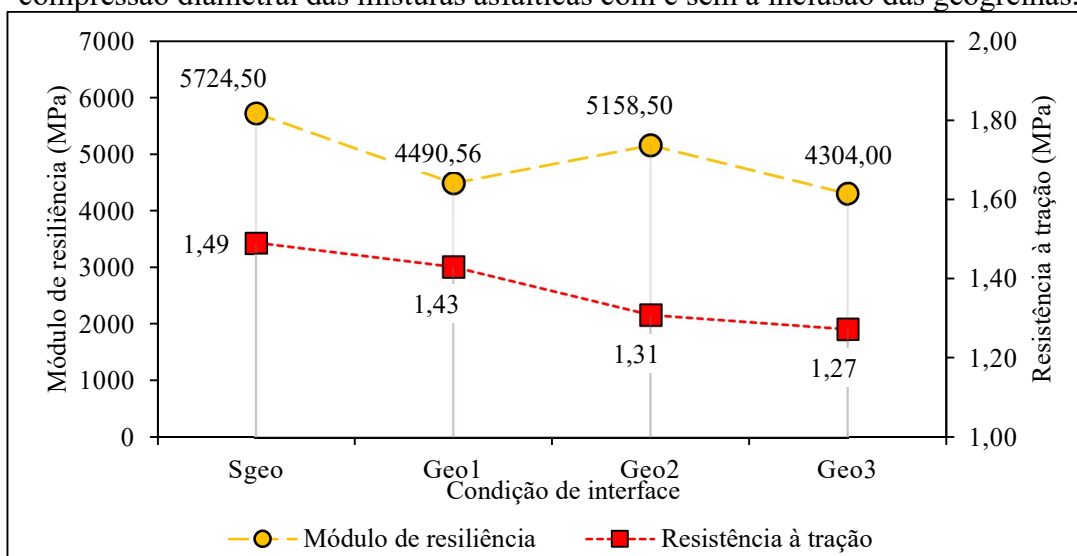
Observa-se, que apesar dos corpos de prova serem compactados com misturas asfálticas com duas faixas granulométricas (faixa C e B), conforme a Tabela 1, os volumes de vazios ficaram dentro das especificações de serviço ES 031 (DNIT, 2006).

Através da análise dos valores dos parâmetros de estabilidade e fluência Marshall apresentados na Tabela 1, percebeu-se que a incorporação da geogrelha promoveu uma redução na estabilidade para a condição de interface Geo2, se comparado com a mistura asfáltica sem geogrelha. Outro fator a se observar é que quanto maior a rigidez da geogrelha menor foi o valor destes parâmetros.

5.3.3 Ensaio de Módulo de Resiliência e Resistência à Tração por Compressão Diametral

Na Figura 5, são apresentados os valores médios do módulo de resiliência e resistência à tração por compressão diametral obtidos de três corpos de prova, determinados para as amostras ensaiadas com e sem a inclusão dos três tipos de geogrelhas estudadas.

Figura 5 – Valores médios de módulo de resiliência e resistência à tração por compressão diametral das misturas asfálticas com e sem a inclusão das geogrelhas.



Fonte: Os Autores (2019).

Observa-se que, apesar dos corpos de prova serem compactados com as mesmas configurações de misturas asfálticas, a variação entre os valores de módulo de resiliência foram da ordem de 33%, na qual a média dos valores da mistura asfáltica compactada sem a utilização da geogrelha SGeo apresentaram maiores módulos de resiliência, e a configuração com a Geo3 o menor valor.

Com relação à resistência à tração por compressão diametral, a variação entre o maior valor e o menor encontrado foi da ordem de 17,3%, que a condição do corpo de prova sem a inclusão da geogrelha tipo SGeo foi a que apresentou maior resistência à tração. Por outro lado, a que apresentou menor resistência à tração foi a do corpo de prova com a inclusão da geogrelha Geo3.

Na Tabela 2, são apresentados os valores médios dos módulos de resiliência (MR), resistência à tração por compressão diametral (RT) determinados para as misturas asfálticas investigadas e as respectivas relações MR/RT. 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.

Tabela 2 – Valores do módulo de resiliência e resistência à tração por compressão diametral para os corpos de prova com e sem a inclusão das geogrelhas.

Condição de interface	Geogrelha	Módulo de Resiliência (MPa)	Resistência à Tração (MPa)	Relação MR / RT
Sem Geogrelha SGeo	-	5.724,50	1,49	3.844,38
Com Geogrelha Geo1	PVA	4.490,56	1,43	3.144,20
Com Geogrelha Geo2	FV	5.158,50	1,31	3.943,83
Com Geogrelha Geo3	PET	4.304,00	1,27	3.383,28

Fonte: Os Autores (2019).

Nesta pesquisa, a relação MR/RT mais próxima da sugerida pelos autores acima citados foi a condição de interface Geo1. A condição de interface SGeo resultou no maior valor de módulo de resiliência, enrijecendo a mistura asfáltica e podendo levar ao trincamento, fato este que será verificado nos ensaios de vida de fadiga.

5.3.4 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, referente às misturas estudadas.

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

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

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.

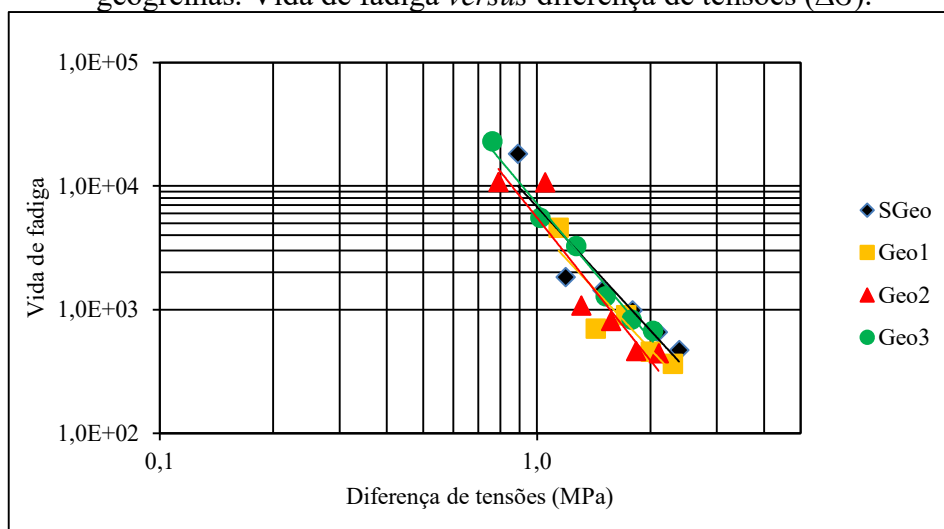
Tabela 3 – Parâmetros das curvas de fadiga das misturas asfálticas estudada com e sem a inclusão das geogrelhas.

Condição de Interface	Geogrelha	Fadiga		R ²
		k ₁	k ₂	
Sem Geogrelha SGeo	-	6803,4	-3,328	0,8814
Com Geogrelha Geo1	PVA	4627,7	-3,276	0,8156
Com Geogrelha Geo2	FV	5557,7	-3,845	0,8823
Com Geogrelha Geo3	PET	7219,3	-3,637	0,9825

Fonte: Os Autores (2019).

A Figura 6 apresenta os resultados das curvas de fadiga, expressas em número de repetições de carga, para as misturas asfálticas dosadas pelo método Superpave nas quatro condições de interface.

Figura 6 – Curvas de fadiga das misturas asfálticas com e sem a inclusão das geogrelhas. Vida de fadiga *versus* diferença de tensões ($\Delta\sigma$).



Fonte: Os Autores (2019).

5.3.5 Ensaio de Creep Estático

Na Tabela 4, são apresentadas as médias dos valores obtidos de deslocamentos e deformações de três corpos de prova durante o ensaio de creep estático, para cada configuração de mistura asfáltica com e sem a inclusão das geogrelhas de reforço. Na Figura 7, têm-se as curvas do ensaio de deformação permanente para cada uma destas misturas estudadas.

Tabela 4 – Valores médios de deslocamentos e deformações dos corpos de prova do ensaio de creep estático das misturas asfálticas estudadas com e sem a inclusão das geogrelhas.

Condição de interface	Condição de Interface			
	SGeo	Geo1	Geo2	Geo3
Geogrelha	-	PVA	FV	PET
Teor de asfalto (%) – faixa granulométrica C	4,60			
Teor de asfalto (%) – faixa granulométrica B	4,85			
Tempo do ensaio (segundo)	4500			
Deslocamento plástico máximo (mm)	0,0483	0,0730	0,1783	0,0740
Deformação plástica específica máxima (mm/mm)	0,0010	0,0016	0,0039	0,0016
Deslocamento plástico final (mm)	0,0280	0,0503	0,1357	0,0553
Deformação plástica específica final (mm/mm)	0,0008	0,0011	0,0030	0,0012
Deformação recuperável (%)	74,58	69,05	75,05	74,70
Deformação permanente (%)	25,42	30,95	24,95	25,30

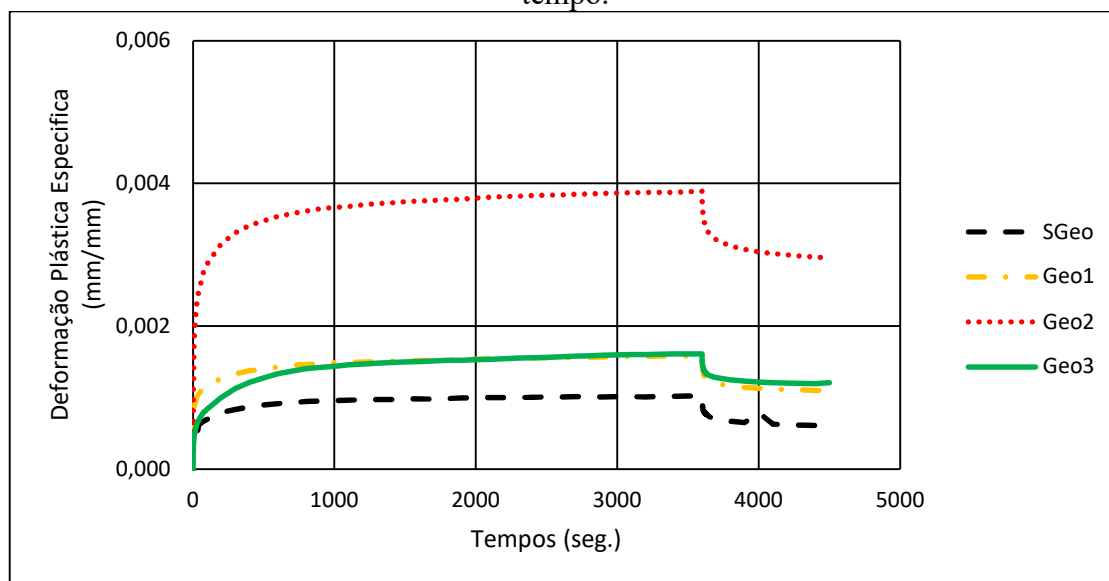
Fonte: Os Autores (2019).

Observa-se na Tabela 4 que os valores de deformação plástica obtido para a condição de interface SGeo é menor do que os obtidos para as condições de interface com geogrelha (Geo1, Geo2 e Geo3). Além disso, verifica-se que, ao serem comparados os resultados das condições de interface com geogrelha, o valor médio de deformação plástica obtido para o corpo de prova Geo2 é o maior, já o menor valor foi obtido para a condição de interface Geo1.

Observa-se, na Figura 7, que a mistura que apresentou maior deformação total (Dt) foi a Geo2; as misturas asfálticas Geo1 e Geo3 apresentaram a mesma deformação total (0,0016mm/mm). A mistura asfáltica Geo2 apresentou deformação plástica específica, igual a 3,6 vezes o valor obtido para a mistura asfáltica sem a inclusão da geogrelha (SGeo). Em termos de valores absolutos, a mistura asfáltica Geo2 apresentou o maior valor de deformação permanente e a melhor recuperação desta.

Em termos de recuperação elástica, a Tabela 4 apresenta os valores médios de cada uma das misturas estudadas. Os corpos de prova SGeo e Geo3 apresentaram valores de recuperação elástica dentro da mesma magnitude, evidenciando uma melhor recuperação elástica para os corpos de prova Geo2.

Figura 7 – Resultado do ensaio de creep estático das misturas dosadas pelos métodos Superpave com e sem a inclusão das geogrelhas. Deformação plástica específica *versus* tempo.



Fonte: Os Autores (2019).

A partir dos resultados dos ensaios de creep estático e das Equações 3, 4 e 5, obtêm-se os indicadores que permitem analisar a sensibilidade dos corpos de prova de cada composição asfáltica à deformação permanente: deformação total (D_t) média durante todo o ensaio (4500 segundos); o módulo de fluência (M_f) após o período de recuperação do corpo de prova da mistura asfáltica (4500 segundos); e a inclinação do estágio secundário da curva (I_{curva}) de deformação *versus* tempo de carregamento. Os valores destes parâmetros estão apresentados na Tabela 5.

$$D_t = \frac{\Delta h_{4500}}{h_0} \quad (3)$$

$$M_f = \frac{\sigma}{D_t} \quad (4)$$

$$I_{curva} = \frac{\log(\epsilon_{3600}) - \log(\epsilon_{1000})}{\log(3600) - \log(1000)} \quad (5)$$

Em que:

D_t : deformação total (mm/mm);

Δh_{4500} : variação da altura do corpo de prova, após o período de recuperação (4500s);

Δh_0 : medida inicial da altura do corpo de prova (mm);

M_f : módulo de fluência após o período de recuperação;

σ : nível de tensão do ensaio (MPa);

ϵ_{3600} : deformação para 3600 segundos de ensaio (mm);

ϵ_{1000} : deformação para 1000 segundos de ensaio (mm).

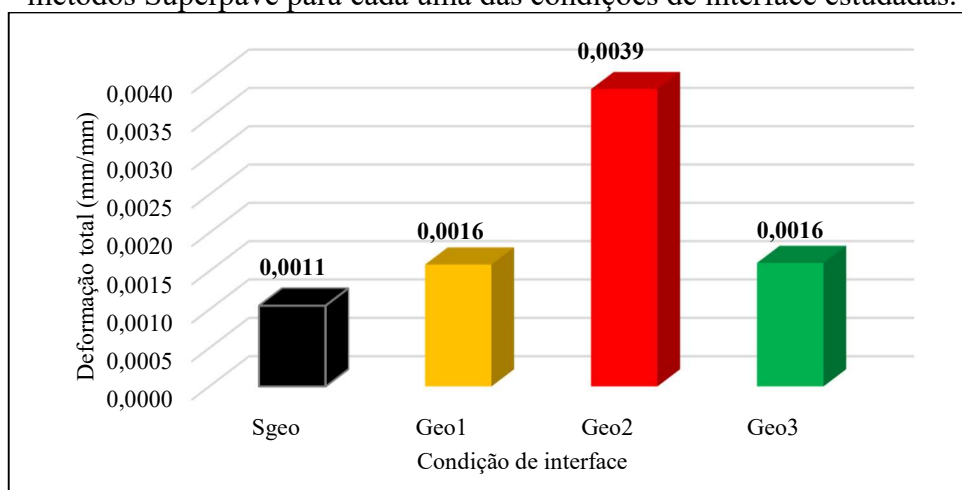
Tabela 5 – Valores médios para os parâmetros D_t (Deformação total), M_f (módulo de fluência), e I_{curva} (inclinação da curva) para os corpos de prova das misturas asfálticas analisadas.

Condição de Interface	Geogrelha	D_t (mm/mm)	M_f (4500s) (MPa)	I_{curva}
Sem Geogrelha SGeo	-	0,0011	100,07	0,039
Com Geogrelha Geo1	PVA	0,0016	62,20	0,052
Com Geogrelha Geo2	FV	0,0039	25,75	0,049
Com Geogrelha Geo3	PET	0,0016	60,95	0,090

Fonte: Os Autores (2019).

A Figura 8 apresenta os valores de deformação total (D_t) obtidos dos ensaios de creep estático realizado a 0,1 MPa à temperatura de 40°C. Nesta figura, pode-se verificar que a condição de interface Geo2 apresentou maior deformação total (D_t), por outro lado a condição de interface SGeo foi a que apresentou menor deformação total.

Figura 8 – Deformação total (D_t) do ensaio de creep estático das misturas dosadas pelos métodos Superpave para cada uma das condições de interface estudadas.



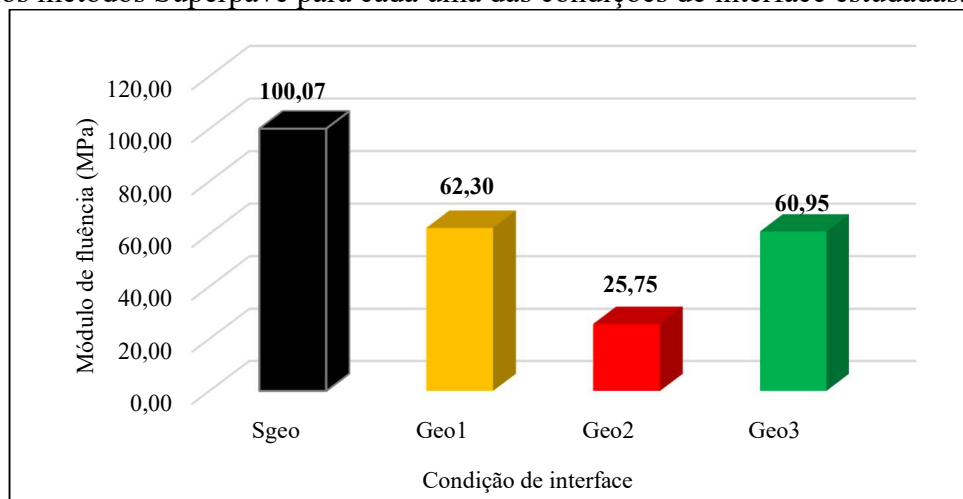
Fonte: Os Autores (2019).

O comportamento dos corpos de prova estudados em relação à deformação total (D_t) indica que a condição de interface Geo2 apresentou maior deformação total (D_t),

pelo menos 3,6 vezes o valor da deformação medida para a condição de interface SGeo, que apresentou menor deformação total.

A Figura 9 apresenta os valores do módulo de fluência (M_f) das misturas asfálticas estudadas após o período de recuperação do material ($t=4500$ segundos). Este parâmetro é usado para determinar a capacidade da mistura asfáltica de resistir à deformação em determinado nível de tensão. Como o módulo de fluência está relacionado ao nível de tensão aplicado sobre o corpo de prova e com a deformação total após o término do ensaio ($t=4500$ segundos), observa-se que quanto maior o valor para M_f maior é a capacidade dessa mistura asfáltica de resistir a deformações permanentes.

Figura 9 – Módulo de fluência (M_f) do ensaio de creep estático das misturas dosadas pelos métodos Superpave para cada uma das condições de interface estudadas.



Fonte: Os Autores (2019).

A partir da análise da Figura 9, nota-se que a mistura asfáltica com a condição de interface SGeo apresentou o maior módulo de fluência, portanto esta condição de interface tem maior capacidade de resistir a deformação permanente se comparada com a Geo2.

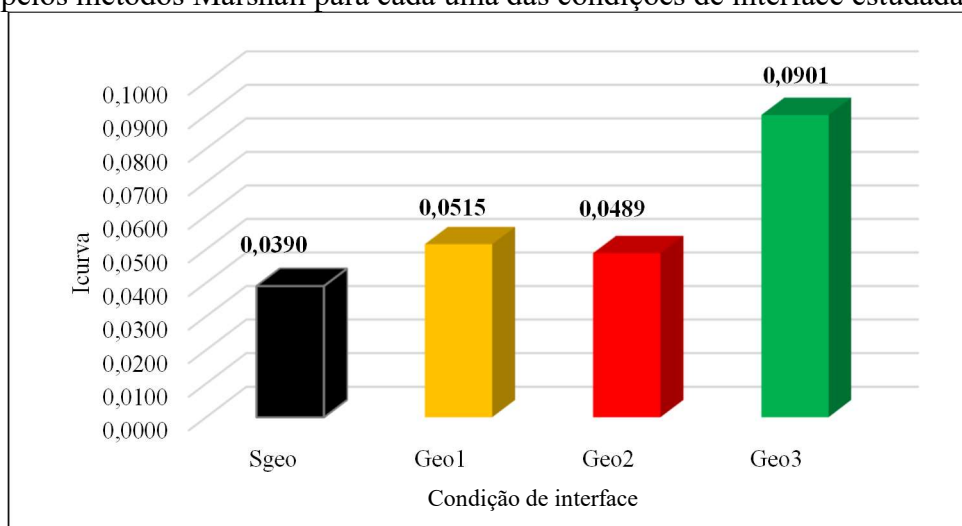
No entanto, Kronfuss et al. (1984) apud Little; Button; Youssef (1993) sugerem um critério para análise das misturas asfálticas através do resultado do módulo de fluência, no qual a mistura asfáltica com a condição de interface Geo1 se enquadra no nível de tráfego moderado. Já a mistura asfáltica com Geo2, se enquadra no nível baixo de tráfego e a mistura asfáltica com Geo3, no nível de tráfego alto. A mistura asfáltica com interface SGeo apresentou valor de módulo de fluência acima do limite superior estabelecido pelos autores acima citados. Para estes, módulos acima de 46,5 MPa a uma temperatura de 40°C, e carregamento de 0,1 MPa eram considerados muito altos e

sujeitos ao trincamento por fadiga induzido pelo carregamento ou efeitos térmicos. Contudo, este limite superior foi estabelecido para climas europeus mais frios, onde os efeitos de trincamento por baixas temperaturas devem ser considerados como tendo um significado diferente do que em países com climas tropicais.

Observa-se que os parâmetros D_t e M_f mostram uma relação inversa, isto é, à medida que o M_f cresce, os valores de D_t das misturas estudadas diminuem.

Na Figura 10, apresenta-se a variação dos valores da I_{curva} da mistura asfáltica para cada uma das condições de interface estudada. A inclinação média da curva de fluência, mostra a velocidade com que a fluência ocorre, ou seja, o comportamento de uma mistura asfáltica é melhor quanto menor a inclinação. Portanto, quanto maior o valor deste parâmetro maior a suscetibilidade da mistura asfáltica a uma velocidade de deformação mais elevada.

Figura 10 – Inclinação da curva (I_{curva}) do ensaio de creep estático das misturas dosadas pelos métodos Marshall para cada uma das condições de interface estudadas.



Fonte: Os Autores (2019).

A inclinação da curva para a mistura asfáltica com a condição de interface Geo3 indica um aumento na velocidade de deformação. Por outro lado a mistura asfáltica com a condição de interface SGeo apresentou a menor velocidade de deformação por fluência.

Em suma, os resultados do ensaio de creep estático apresentaram a mistura asfáltica com a condição de interface Geo2, que apresentou maiores valores de deformação total, menor módulo de fluência e menor deformação por fluência. Esta mistura asfáltica apresenta maior valor de deformação inicial, porém entre os instantes 1000 e 3600 segundos, os valores de deformação aumentaram apenas 6%. Já a mistura

asfáltica com a condição de interface Geo3 apresenta valor de deformação inicial da ordem de 2,6 vezes menor que a deformação inicial da Geo2, mas no intervalo de 1000 a 3600 segundos esta cresce 11%.

5.3.6 Análise Estrutural do Pavimento Flexível Adotado

Empregando-se os resultados dos ensaios mecânicos realizados na mistura asfáltica com e sem a inclusão das geogrelhas, foram realizadas doze análises empírico-mecanísticas para a estrutura do pavimento-tipo adotado (Figura 2), considerando-se os três níveis de carregamento e de pressões de enchimento.

Nas análises empírico-mecanísticas realizadas foram consideradas as combinações das misturas das faixas granulométricas C e B de projeto da especificação de serviço ES 031 (DNIT, 2006b), com as quatro condições de inclusões de interface (SGeo, Geo1, Geo2 e Geo3). Mantiveram-se constantes as espessuras e características mecânicas das camadas de base, reforço do subleito e subleito (coeficiente de Poisson e módulo de resiliência) e variaram-se as características mecânicas das camadas asfálticas.

Foram observados os valores de tensões e deslocamentos nos pontos críticos das camadas asfálticas, tais como: (i) deslocamento vertical na superfície da capa asfáltica, (ii) tensão de tração na fibra inferior da capa asfáltica, correspondente à condição de interface (SGeo, Geo1, Geo2 e Geo3) e (iii) tensão de tração na fibra inferior da camada da faixa granulométrica B (binder). Esses critérios buscam averiguar o desempenho do revestimento asfáltico em relação à vida de serviço do pavimento.

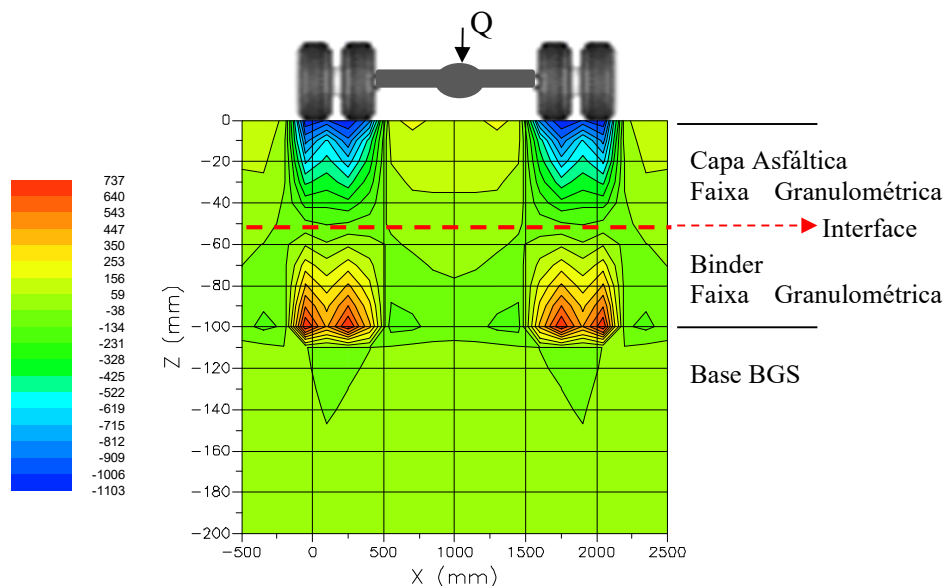
As análises foram realizadas nas posições de maiores tensões e deformações na estrutura do pavimento tipo. Observa-se na Figura 11 que as maiores tensões horizontais (σ_h) estão sob os pontos de aplicação de carga. Portanto as análises foram realizadas considerando os deslocamentos e tensões na posição x igual a 0 e y igual a 0.

Na Figura 11, são apresentadas as tensões horizontais (σ_h) que atuam na estrutura do pavimento asfáltico adotado para a condição de interface SGeo, para o carregamento de 80 kN por eixo e pressão de enchimento dos pneus de 563 kPa, obtido com o software *me-PADS*.

Observa-se que as maiores tensões horizontais de tração (σ_h) estão na fibra inferior da camada de binder, a posição $x=0\text{mm}$ e $x=200\text{mm}$ corresponde às maiores tensões horizontais de compressão (σ_h) na capa asfáltica, que estão concentradas sob os pontos de aplicação de carga (pontos sob os pneus). Assim, as análises estruturais do

pavimento flexível analisado foram realizadas considerando as tensões e deslocamentos nestes pontos.

Figura 11 – Tensão horizontal (σ_h) na camada asfáltica dosada pelo método Superpave, para a condição de interface SGeo e carga por eixo de 80 kN e pressão de enchimento dos pneus de 563 kPa (software *me-PADS*)



Fonte: Os Autores (2019).

Ao analisar as tensões horizontais (σ_h) que ocorrem na fibra inferior da capa asfáltica, obtidas pelo software *me-PADS*, 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 (σ_h) 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 todos os carregamentos analisados apresentam valores inferiores aos encontrados para a resistência à tração por compressão diametral para os corpos de prova das misturas asfálticas com as respectivas condições de interface.

Para as tensões verticais (σ_v) que atuam na fibra inferior da capa asfáltica e de binder, obtidas pelo software *me-PADS*, verificou-se que estas são de compressão (sinal negativo), uma vez que as solicitações do tráfego são de compressão na estrutura do pavimento.

Na Tabela 6, são apresentadas as maiores tensões horizontais ($\sigma_h = \sigma_x$) e verticais ($\sigma_v = \sigma_z$), na fibra inferior das camadas asfálticas em função da variação do carregamento dos eixos e das condições de interface estudadas.

Tabela 6 – Tensão horizontal (σ_h) e vertical (σ_v) na posição $x=0\text{mm}$, atuantes na fibra inferior das camadas asfálticas em função dos níveis de carregamento adotados para as condições de interface estudadas.

Condição de Interface	Carga por eixo (kN)	Pressão de enchimento (kPa)	Capa Asfáltica (5,0cm da superfície)		Camada de Binder (10,0cm da superfície)	
			$\sigma_h^{(1)}$ (MPa)	$\sigma_v^{(2)}$ (MPa)	$\sigma_h^{(3)}$ (MPa)	$\sigma_v^{(4)}$ (MPa)
SGeo	80	563	-0,151	-0,395	0,828	-0,167
	98	633	-0,179	-0,447	0,957	-0,197
	118	703	-0,212	-0,500	1,101	-0,232
Geo1	80	563	-0,155	-0,405	0,716	-0,185
	98	633	-0,184	-0,458	0,825	-0,217
	118	703	-0,218	-0,514	0,944	-0,256
Geo2	80	563	-0,153	-0,388	0,779	-0,175
	98	633	-0,181	-0,452	0,899	-0,205
	118	703	-0,215	-0,506	1,033	-0,242
Geo3	80	563	-0,156	-0,407	0,697	-0,188
	98	633	-0,185	-0,460	0,803	-0,221
	118	703	-0,219	-0,516	0,918	-0,260

⁽¹⁾ σ_h na fibra inferior a 5,0cm da superfície do revestimento (compressão)

⁽²⁾ σ_v na fibra inferior a 5,0cm da superfície do revestimento (compressão)

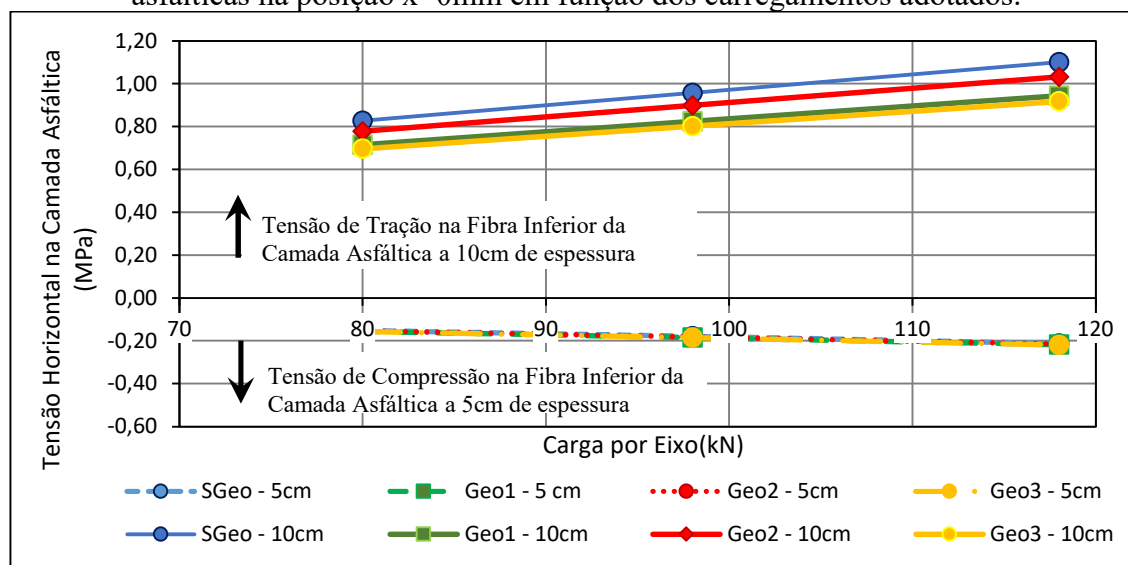
⁽³⁾ σ_h na fibra inferior a 10,0cm da superfície do revestimento (tração)

⁽⁴⁾ σ_v na fibra inferior a 10,0cm da superfície do revestimento (compressão)

Fonte: Os Autores (2019).

A Figura 12 apresenta uma representação gráfica da variação das tensões horizontais (σ_h) (apresentadas na Tabela 6) atuantes nas fibras inferiores das camadas asfálticas do pavimento flexível analisado, em função dos carregamentos e das condições de interface adotados.

Figura 12 – Tensões horizontais (σ_h) atuantes na fibra inferior das camadas asfálticas na posição $x=0\text{mm}$ em função dos carregamentos adotados.



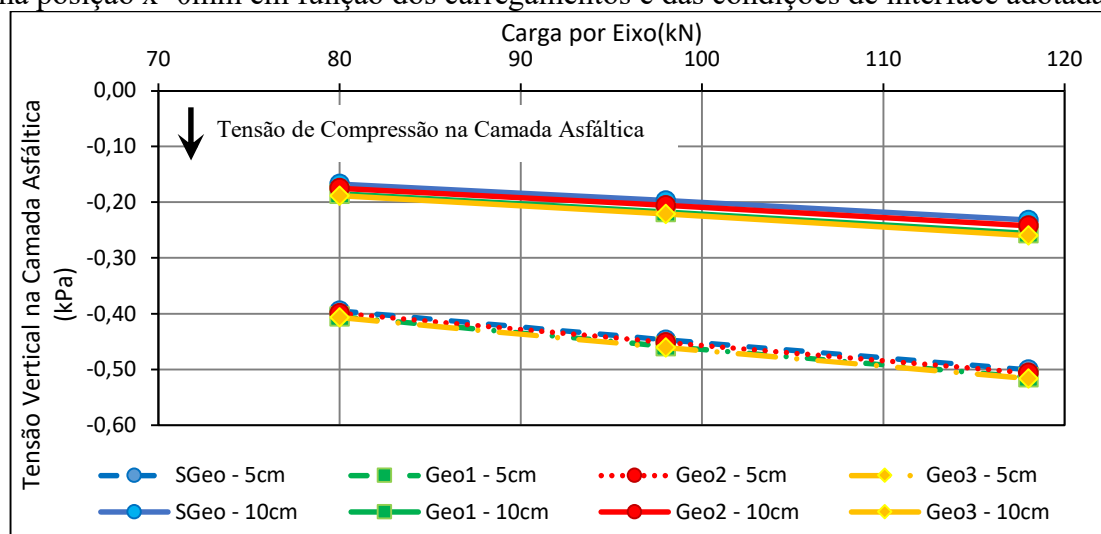
Fonte: Os Autores (2019)

Observa-se nesta figura que, em cada um dos quatro pavimentos asfálticos analisados, as tensões horizontais (σ_h) em cada camada asfáltica variaram com as condições de interface e o nível de carregamento. As tensões atuantes na camada asfáltica da faixa granulométrica C (tensão de compressão), foram analisadas estatisticamente através do programa R (*R Development Core Team 2008*), onde as retas de regressão não diferenciaram estatisticamente ao nível de 5% de significância, apesar da condição de interface estudada, sem geogrelha (SGeo) e com geogrelha (Geo1, Geo2 e Geo3).

Analisando-se ainda a Figura 12, verifica-se que, para um mesmo nível de carregamento, a maior variação das tensões horizontais (σ_h) de tração (faixa granulométrica B) foi encontrada entre a condição de interface SGeo e Geo3, cuja variação foi em torno de 19%. Isto ocorre em todos os níveis de carregamento e pode ser justificado pelo fato de que a mistura asfáltica Geo3 apresenta o menor valor de módulo de resiliência e a SGeo o maior valor. Ou seja, como as misturas asfálticas Geo3 apresentam menores valores de módulo de resiliência, estas se mostram mais flexíveis quando comparadas com as misturas asfálticas Geo2. De forma que, este decréscimo de tensões horizontais está relacionado com o fato de que misturas asfálticas mais flexíveis redistribuem e absorvem mais tensões horizontais, o que explica a redução observada tanto nas tensões de tração como de compressão.

A Figura 13 apresenta a variação das tensões verticais (σ_v) atuantes na fibra inferior das camadas asfálticas do pavimento asfáltico adotado, em função dos carregamentos e das condições de interface adotadas.

Figura 13 – Tensões verticais (σ_v) atuantes na fibra inferior das camadas asfálticas, na posição $x=0\text{mm}$ em função dos carregamentos e das condições de interface adotadas.

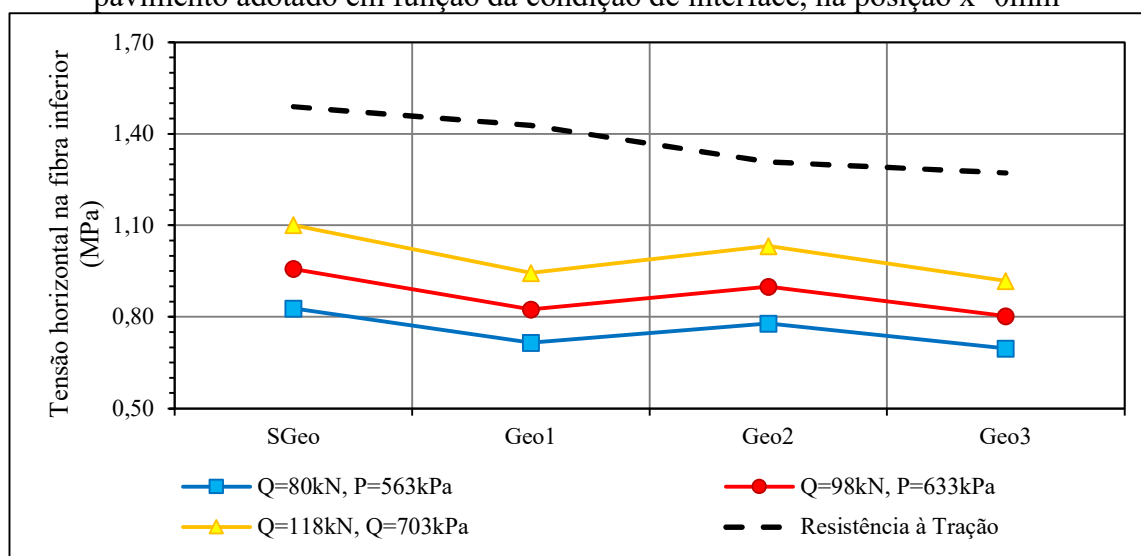


Fonte: Os Autores (2019).

Observa-se na Figura 13 que em cada um dos quatro pavimentos asfálticos analisados, as tensões verticais (σ_v) em cada camada asfáltica variaram com as condições de interface e o nível de carregamento adotado. Estas tensões verticais atuantes em ambas as camadas asfálticas da faixa granulométrica C (revestimento) e faixa granulométrica B (binder) não apresentam variações significativas na sua magnitude apesar da condição de interface estudada, sem geogrelha (SGeo) e com geogrelha (Geo1, Geo2 e Geo3). Além disso estas tensões são de compressão.

Dada a constatação experimental de que as tensões de tração críticas se desenvolvem no bordo inferior da camada de binder (faixa granulométrica B), a Figura 14 apresenta, para esse bordo, as respectivas curvas de variação das tensões de tração em função da condição de interface e da condição de carregamento. Também é representada a curva de resistência à tração por compressão diametral das misturas asfálticas analisadas.

Figura 14 – Tensões de tração atuantes no bordo inferior da camada de binder do pavimento adotado em função da condição de interface, na posição $x=0\text{mm}$

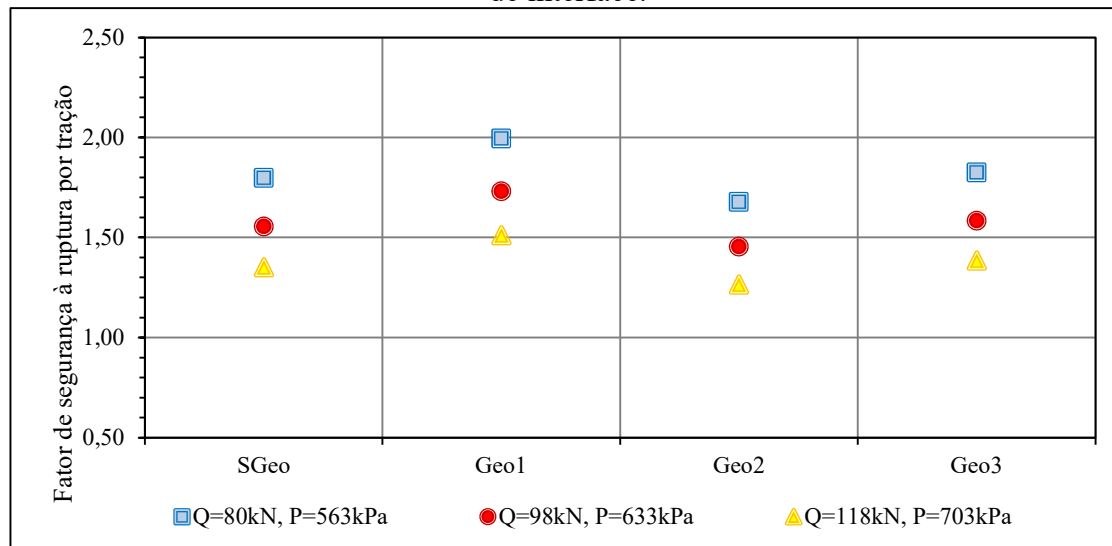


Fonte: Os Autores (2019).

Com base no exposto na Figura 14 verifica-se que, apesar das diferenças de comportamento das tensões horizontais das misturas asfálticas com cada uma das condições de interface, verifica-se ainda que as tensões de tração calculadas pelo programa computacional *me-PADS* são inferiores à resistência de tração das misturas asfálticas estudadas, como pode ser visto na Figura 14. Neste contexto, a Figura 15 apresenta os respectivos fatores de segurança à ruptura por tração (relação entre a

resistência à tração por compressão diametral e a tensão de tração no bordo inferior da camada de binder) para todos os cenários investigados e representados na Figura 15.

Figura 15 – Fator de segurança à ruptura da camada de Binder em função da condição de interface.



Fonte: Os Autores (2019).

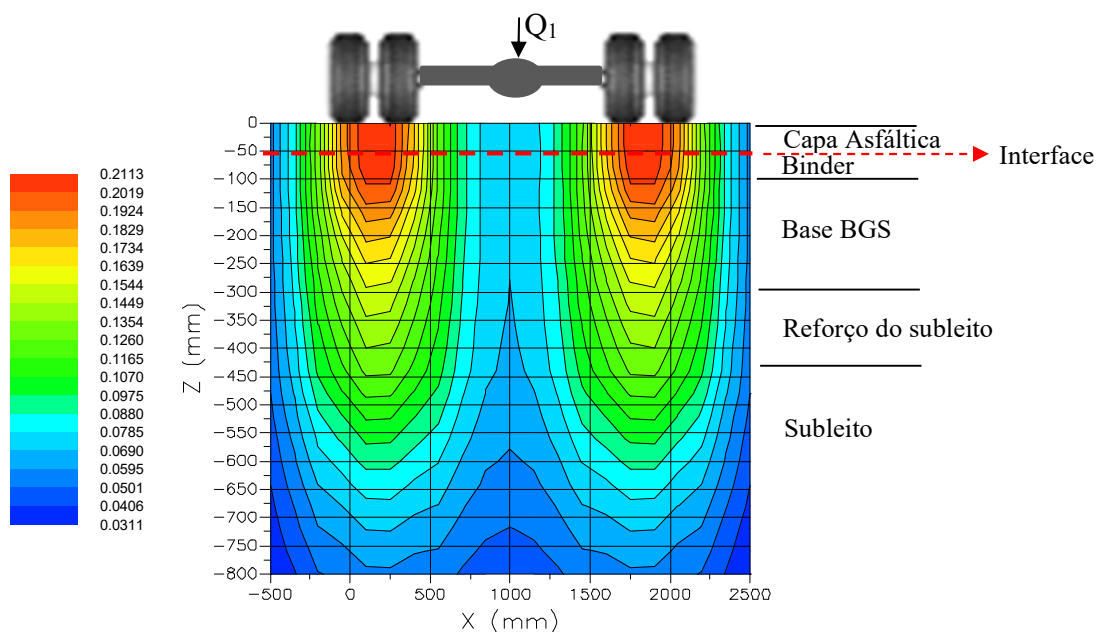
Na Figura 15, pode-se observar que, para cada uma das misturas asfálticas analisadas, a relação entre a resistência à tração e a tensão horizontal atuante é maior do que 1,0. O menor valor encontrado foi para o caso Geo2, onde se obteve o fator de segurança igual a 1,27 para o nível de carregamento de 118kN, o que representa um dos extremos da faixa analisada nesta pesquisa.

É importante ressaltar que a variação na condição de interface das misturas asfálticas apresenta efeito significativo sobre o comportamento estrutural dos pavimentos adotados. No entanto, não constitui risco de ruptura para as camadas asfálticas sem (SGeo) e com a inclusão das geogrelhas (Geo1, Geo2 e Geo3).

Na Figura 16 são apresentados os valores das deflexões verticais (δz) recuperáveis previstas na estrutura do pavimento adotado, com a condição de interface SGeo, para o carregamento de 80 kN por eixo e pressão de enchimento dos pneus de 563 kPa.

É possível verificar na Figura 16 que as maiores deflexões verticais recuperáveis ocorrem nas camadas asfálticas (capa asfáltica e binder). De maneira similar este efeito também ocorreu para as condições de interface Geo1, Geo2 e Geo3. As deflexões verticais recuperáveis máximas no topo da camada asfáltica dos pavimentos adotados, para cada um dos carregamentos adotados, estão apresentadas na Tabela 7.

Figura 16 – Deflexões verticais (δz) na estrutura do pavimento adotado, na condição de interface SGeo, analisado para o carregamento de 80kN por eixo.



Fonte: Os Autores (2019).

Na Tabela 7 são apresentadas de deflexões verticais recuperáveis máximas para cada condição de interface e de carregamento.

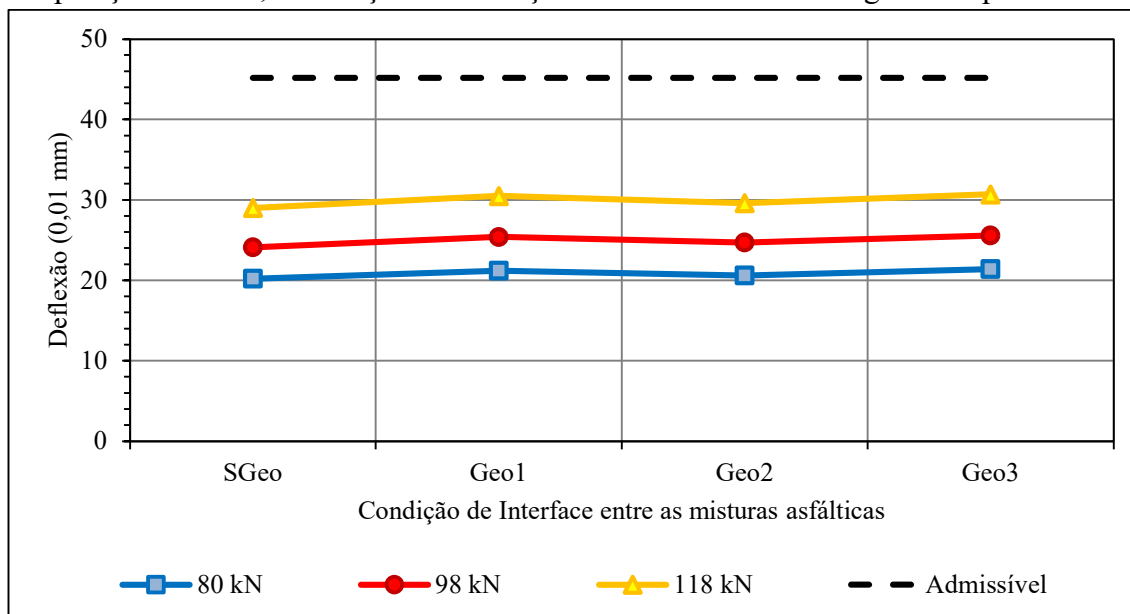
Tabela 7 – Deflexões verticais (δz) recuperáveis máximas no topo da camada asfáltica, na posição $x=0\text{mm}$, dos pavimentos adotados em função da condição de interface e dos níveis de carregamento.

Condição de Interface	Geogrelha	Carga por eixo Q_{eixo} (kN)	Pressão de enchimento P_{pneus} (kPa)	Deflexões Máxima (0,01 mm)
SGeo	-	80	563	20,2
		98	633	24,1
		118	703	29,0
Geo1	PVA	80	563	21,2
		98	633	25,4
		118	703	30,5
Geo2	FV	80	563	20,6
		98	633	24,7
		118	703	29,6
Geo3	PET	80	563	21,4
		98	633	25,6
		118	703	30,7

Fonte: Os Autores (2019).

Para fins de avaliação dos valores de deflexões máximas apresentadas na Tabela 7, foi calculada a deflexão admissível, segundo o procedimento PRO 011 (DNER, 1979), para um tráfego pesado ($N=5 \times 10^7$), conforme a classificação da rodovia segundo o Manual de Pavimentação (DNIT, 2006a). A deflexão admissível calculada para este nível de tráfego é $45,18 \times 0,01$ mm e representada pela linha tracejada na Figura 17.

Figura 17 – Deflexões verticais máximas na estrutura do pavimento adotado, na posição $x=0$ mm, em função da condição de interface e do carregamento por eixo.



Fonte: Os Autores (2019).

Analisando-se os valores de deflexões expostos na Tabela 7 e representados na Figura 17, é possível observar que a condição de interface das misturas asfálticas não apresentou variação significativa no comportamento das estruturas analisadas, apesar do módulo de resiliência apresentar variações na ordem de 25%.

Conhecidos os níveis de tensões atuantes no pavimento tipo, através das simulações realizadas com o software *me-PADS*, para cada nível de carregamento imposto pelo tráfego, verificou-se a vida de fadiga das misturas asfálticas para as condições de interface: (i) SGeo; (ii) Geo1; (iii) Geo2; e (iv) Geo3 (Tabela 8).

As respostas estruturais consideradas evidenciam que, para iguais cargas por eixo, as misturas asfálticas da condição de interface Geo3 apresentam vida de fadiga superior à das outras condições de interface (Figura 18).

Tabela 8 – Variação dos valores da vida de fadiga das misturas asfálticas para as cargas de eixo simuladas no software *me-PADS*.

Condição de Interface	Geogrelha	Carga por eixo (kN)	Análise a 5,0cm		Análise a 10,0cm	
			$\Delta\sigma^{(1)}$ (MPa)	Vida de Fadiga	$\Delta\sigma^{(1)}$ (MPa)	Vida de Fadiga
SGeo	-	80	0,243	7,49E+05	0,995	6,92E+03
		98	0,268	5,47E+05	1,154	4,22E+03
		118	0,288	4,27E+05	1,333	2,61E+03
Geo1	PVA	80	0,249	4,37E+05	0,900	6,53E+03
		98	0,274	3,20E+05	1,042	4,04E+03
		118	0,296	2,50E+05	1,200	2,55E+03
Geo2	FV	80	0,246	1,22E+06	0,953	6,68E+03
		98	0,270	8,48E+05	1,105	3,79E+03
		118	0,291	6,36E+05	1,275	2,19E+03
Geo3	PET	80	0,251	1,11E+06	0,885	1,13E+04
		98	0,276	7,82E+05	1,024	6,63E+03
		118	0,297	5,94E+05	1,178	3,98E+03

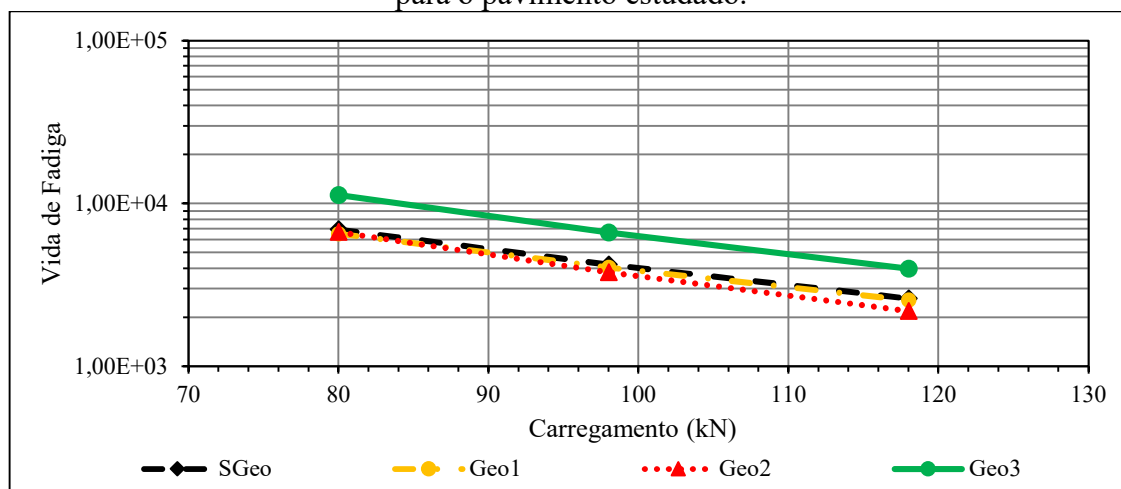
⁽¹⁾ $\Delta\sigma$ = diferença de tensões

Fonte: Os Autores (2019).

Analisando-se a Figura 18, pode-se concluir que, para os níveis de carregamento estudados, o pavimento flexível simulado com os parâmetros da mistura com a condição de interface Geo3 apresentou maiores valores de vida de Fadiga do que o pavimento flexível simulado com os parâmetros das misturas asfálticas com as outras condições de interface. De fato, considerando o carregamento padrão de 80 kN, a Vida de Fadiga do pavimento flexível obtido com a condição de interface Geo3 foi 1,7 vezes maior ($1,13 \times 10^3$), ao passo que o pavimento flexível obtido com a condição Geo1 apresenta $VF=6,53 \times 10^3$. Já com relação a condição SGeo e Geo2, o valor de Geo3 foi 1,6 e 1,7 vezes, respectivamente maior. Observa-se ainda que as condições de interface SGeo, Geo1 e Geo2, apresentaram vida de fadiga dentro da mesma magnitude, ou seja a vida de fadiga destas condições de interface não diferem estatisticamente ao nível de 5% de significância, calculado através do programa R.

Os resultados encontrados na literatura (GONZALEZ-TORRE; CALZADA-PEREZ; VEGA-ZAMANILLO; CASTRO-FRESNO, 2015, e PHILLIPS, 2017) apresentam comparações entre misturas asfálticas não reforçadas (SGeo) e misturas asfálticas reforçadas com geogrelhas de poliálcool vinílico (Geo1), fibra de vidro (Geo2) e poliéster (Geo3), que estão consistentes com os resultados obtidos nesta pesquisa para as mesmas condições Sgeo, Geo1, Geo2 e Geo3.

Figura 18 - Vida de fadiga das misturas asfálticas dosadas pelos métodos Marshall para o pavimento estudado.



Fonte: Os Autores (2019).

5.4 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos durante esta pesquisa experimental, visando estudar o desempenho de geogrelhas de PVA, FV e PET para aplicações rodoviárias, permitem que várias observações conclusivas possam ser feitas relativas ao desempenho mecânico de misturas asfálticas reforçadas com as geogrelhas. Dentre as conclusões da pesquisa, podem-se destacar:

- O procedimento desenvolvido para compactação dos corpos de prova no compactador giratório Superpave se mostrou eficiente, pois não foi observado problema de aderência entre as duas partes do corpo de prova;
- O maior valor de MR foi determinado para a condição de interface SGeo, por outro lado o menor valor encontrado foi para a Geo3. Entretanto, o maior valor de RT encontrado foi para a condição de interface SGeo e o menor foi para o Geo3;
- Analisando-se a relação MR/RT, as misturas Geo2 e Geo1 apresentaram respectivamente maior e menor valor para esta relação.
- As curvas de fadiga tiveram bons coeficientes de determinação (R^2). Foi observada uma tendência de maior vida de fadiga para a mistura Geo3, que foi confirmada através de uma análise com a utilização do software *me-PADS*, em um pavimento-tipo, independente do carregamento aplicado.
- Com relação aos ensaios de creep estático, deformação permanente, observou-se que a mistura Geo2 foi a que apresentou maior deformação total. A mistura que

apresentou maior Icurva foi a Geo3, o que indica que a velocidade de deformação desta configuração é maior e tem potencial de acumular maiores deformações.

Com base na pesquisa apresentada é possível concluir que os corpos de prova com a condição de interface Geo3 tiveram melhor desempenho entre as inclusões pesquisadas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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.

BASTOS, G. A.; CASAGRANDE, M.D.T.; MOTTA, L.M.G.; FOLLE, D. Ensaio de tração em discos circulares em misturas asfálticas reforçadas com geogrelha. **Revista de Engenharia Civil IMED**. v.2, n. 2, p. 27-36. 2015. DOI: 10.18256/2358-6508/rec-imed.v2n2p27-36

CANESTRARI, F.; BELOGI, L.; FERROTTI, G.; GRAZIANI, A. Shear and flexural characterization of grid-reinforced asphalt pavements and relation with field distress Evolution. **Materials and Structures**. v. 48. p.959–975. 2015

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.

ELSING, A.; LEITE-GEMBUS, F. Parameter to Ensure a Durable Grid-Reinforced Asphalt Pavement. **7th International Conference Bituminous Mixtures and Pavements**. Anais. Thessaloniki, Greece. 2019.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **PRO 011**: Avaliação estrutural dos pavimentos flexíveis. Procedimento de ensaio. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Rio de Janeiro. 1979. 16 p.

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 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, 2018. 19p.

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

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. Background of SUPERPAVE asphalt mixture design and analysis. **FHWA-SA-95-003**. 1995. 160 p.

GONZALEZ-TORRE, I; CALZADA-PEREZ, M.A.; VEGA-ZAMANILLO, A.; CASTRO-FRESNO, D. Experimental study of the behaviour of different geosynthetics as anti-reflective cracking systems using a combined-load fatigue test. **Geotextiles and Geomembranes**. v. 43. p. 345-350. 2015

LITTLE, D.N.; BUTTON, J.W.; YOUSSEF, H. Development of Criteria to Evaluate Uniaxial Creep Data and Asphalt Concrete Permanent Deformation Potential. **Transportation Research Record**, v. 1417, p. 49-57. 1993.

LEITE, L.F.M.; MOTTA, L.M.G.; BERNUCCI, L.B. e 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. 2000. Pp. 309-318.

PHILLIPS, R., Field evaluation of reinforced asphalt overlays using strain measurements. University of Texas at Austin. Master of Science in Engineering. 87 p. 2017.

PINHEIRO, J.H.M., SOARES, J.B. e 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. 2003. p 116-129.

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, 2014, p. 85-94.

SAFAVIZADEH, S.A.; WARGO, A.; GUDDATI, M. Investigation of Reflective Cracking Mechanisms in Grid-Reinforced Asphalt Specimens Using Four-Point Bending Notched Beam Fatigue Tests and Digital Image Correlation. **Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board** v. 2507 p. 29-38. 2015

SOBHAN, K.; GENDUSO, M.; TANDON, V. Effects of Geosynthetic Reinforcement on the Propagation of Reflection Cracking and Accumulation of Permanent Deformation in Asphalt Overlays. Third LACCEI International Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology (LACCET 2005). **Advances in Engineering and Technology :A Global Perspective**. p. 8-10. 2005.

STRATEGIC HIGHWAY RESEARCH PROGRAM. The Superpave Mix Design Manual for New Construction and Overlays. **SHRP-A-407**. Washington, DC. National Research Council. 1994. 172 p.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1 CONCLUSÕES GERAIS

As conclusões gerais sobre o tema proposto, fundamentadas em literatura e ensaios laboratoriais realizados nas misturas asfálticas adotadas, são:

- a) O processo de compactação dos métodos de dosagem analisados teve efeito sobre a determinação do teor de projeto de ligante asfáltico, principalmente para as misturas da faixa granulométrica B, uma vez que o teor de ligante asfáltico encontrado para o método Superpave foi maior que o obtido pelo método Marshall. Já para as misturas asfálticas da faixa granulométrica C a diferença entre os teores de projeto de ligante asfáltico foram de 0,1%.
- b) O procedimento adotado para a compactação dos corpos de prova compostos se mostrou eficientes, tanto no método Marshall como no método Superpave.
- c) Para mistura asfáltica composta dosada pelo método Marshall, a condição de interface Geo2 foi a que apresentou maior módulo de resiliência e o menor valor encontrado foi para a Geo3. Já para as misturas asfálticas dosada pelo método Superpave a condição de interface SGeo foi a que apresentou maior valor e a Geo3 o menor valor.
- d) A resistência à tração por compressão diametral, da Geo3 para a dosagem Marshall foi a que indicou o maior valor e a SGeo o menor valor. Para as misturas asfálticas dosadas pelo método Superpave esta relação foi ao contrário, onde SGeo apresentou maior valor e a Geo3 o menor valor de resistência á tração.
- e) Foi verificado uma tendência de maior vida de fadiga para a condição de interface Geo3 e menor para a Geo2, isto para dos dois métodos de dosagem Marshall e Superpave.
- f) A vida de fadiga das misturas asfálticas, analisadas, mostraram-se dependente dos níveis de solicitações aplicadas, constatando-se que, para níveis de tensões mais baixos ($\Delta\sigma < 1\text{MPa}$), os corpos de prova com a geogrelha Geo3 indicaram melhor

desempenho, comparativamente a outros corpos de prova com (Geo1 e Geo2) e sem geogrelhas (SGeo). Este fato ocorreu para os corpos de prova dosados em ambos os métodos (Marshall e Superpave). Para o cenário com os níveis de tensão maiores ($\Delta\sigma > 1\text{MPa}$), o corpo de prova dosado pelo método Marshall com a geogrelha Geo3 indicou melhor desempenho, comparativamente aos outros corpos de prova com (Geo1 e Geo2) e sem geogrelhas (SGeo). Já para os corpos dosados pelo método Superpave, a condição sem geogrelha (SGeo) indicou o melhor desempenho, dentre os corpos de prova com geogrelha (Geo1, Geo2 e Geo3) o que indicou melhor desempenho foi o que estava reforçado com a geogrelha Geo3.

- g) Em termos de deformação permanente, creep estático, os corpos de prova reforçados com a geogrelha Geo2 foram o que apresentaram maiores valores de deformação plástica se comparado aos outros corpos de prova com (Geo1 e Geo2) e sem as geogrelhas (SGeo). Este fato foi observado nos corpos de prova dosados nos dois métodos de dosagem utilizados.

Na Figura 1 é apresentada uma síntese dos resultados dos ensaios mecânicos para cada uma das condições de interface e método de dosagem. Verifica-se que a escala adotada varia de I para os menores valores da propriedade mecânica da mistura asfáltica analisada a IV para os maiores valores encontrados.

Figura 1 – Síntese dos resultados das propriedades mecânicas das misturas asfálticas compostas *versus* condição de interface.

Método de Dosagem	Condição de Interface	Geogrelha	MR	RT	Fadiga	Deformação Permanente
Marshall	SGeo	-	III	I	III	IV
	Geo1	PVA	II	III	II	II
	Geo2	FV	IV	II	I	I
	Geo3	PET	I	IV	IV	III
Superpave	SGeo	-	IV	IV	III	IV
	Geo1	PVA	III	III	III	III
	Geo2	FV	II	II	I	I
	Geo3	PET	I	I	IV	III

Em que: MR: módulo de resiliência.

RT: resistência à tração por compressão diametral.

Escala variando de I (menores valores) a IV (maiores valores) para cada método de dosagem e cada propriedade analisada.

Fonte: Os autores (2019).

Com relação às análises estruturais com o software *me-PADS*, os revestimentos asfálticos reforçados com geogrelhas apresentaram menores níveis de tração nas fibras

inferiores para ambos os métodos de dosagem. No que se refere à vida de fadiga das camadas asfálticas da estrutura do pavimento flexível analisado, verifica-se que para ambos os métodos de dosagem Marshall e Superpave o comportamento foi similar, onde o reforço com geogrelha Geo3 indicou melhor desempenho, se comparado às outras condições com (Geo1 e Geo2) e sem as geogrelhas (SGeo).

6.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Muitas das questões motivadoras desse trabalho foram respondidas. Contudo, muitas outras surgiram. Como sugestões e recomendações para trabalhos futuros tem-se como ponto principal a demanda por estudos do efeito dos diferentes tipos de geogrelhas como reforço de camada asfáltica produzidas com diferentes ligantes asfálticos. Portanto sugerem-se os seguintes tópicos:

- i. Novas pesquisas envolvendo um universo maior de agregados de diferentes formações geológicas deverão ser conduzidas com o objetivo de validar as relações obtidas nesta pesquisa;
- ii. Desenvolver pesquisas com diferentes ligantes asfálticos (CAP 30/45, asfaltos modificados com polímeros e asfalto borracha), com objetivo de verificar o desempenho das diferentes geogrelhas com estes ligantes asfálticos;
- iii. Avaliar o desempenho destas misturas asfálticas reforçadas com geogrelhas no ensaio de flexão em viga quatro pontos, normalizada pelas normas AASHTO T-321 e BS EN 12697:24.
- iv. Para os ensaios de resistência à tração por compressão diametral e vida de fadiga, investigar o desempenho das misturas com geogrelha, considerando-se a posição da geogrelha paralelamente ao plano diametralmente horizontal.
- v. Como as maiores resistências à tração ocorreram na fase inferior da camada asfáltica de binder, posicionar a geogrelha mais na parte inferior do conjunto capa e binder.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **DESIGNATION: T-321**. Standard Method of Test for Determining the Fatigue Life of Compacted Asphalt Mixtures Subjected to Repeated Flexural Bending. Washington, D.C., 2017.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS EN 12697-24**. Bituminous Mixtures. Test Methods. Resistance to Fatigue. British-Adopted European Standard. 2018.

APÊNDICE A - INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DO TEOR DE LIGANTE DE PROJETO E DO MÉTODO DE DOSAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS NA SENSIBILIDADE ESTRUTURAL DE UM PAVIMENTO ASFÁLTICO.

RESUMO

Esta pesquisa teve por objetivo principal realizar uma análise da sensibilidade estrutural de um pavimento-tipo adotado, cujo revestimento asfáltico sofreu variações em função dos teores de ligante asfáltico e dos métodos de dosagem Marshall e Superpave. Estes revestimentos asfálticos se enquadram nas exigências técnicas correspondentes às faixas granulométricas C (capa asfáltica) e B (binder) da especificação de serviço do DNIT para os concretos betuminosos usinados a quente. O programa experimental desenvolvido combinou um ligante asfáltico (CAP 50/70), uma composição de agregados minerais de origem gnáissica e dois métodos de dosagem (Marshall e Superpave). Os resultados das dosagens Marshall indicaram teores de projeto de ligante asfáltico de 4,7% e 4,2%, para as misturas asfálticas da faixas granulométricas C e B, respectivamente. Já para a dosagem Superpave, os teores de projeto de ligante asfáltico foram de 4,6% e 4,85%, respectivamente para as mesmas faixas granulométrica mencionadas anteriormente. Uma variação de $\pm 0,5\%$ nesses teores de projeto de ligante asfáltico foi admitida e os valores de módulo de resiliência (MR) e resistência à tração por compressão diametral (RT) das misturas asfálticas resultantes foram aplicados na estrutura do pavimento asfáltico analisado pelo software *Mechanistic Empirical Pavement Analysis and Design Software* (me-PADS v1.1), visando à obtenção das respostas estruturais referentes às deformações na superfície desse pavimento e as tensões nas fibras inferiores das camadas asfálticas. As análises foram realizadas para três níveis de carregamento (80 kN, 98 kN e 118 kN) e três níveis de pressão de enchimento dos pneumáticos (563 kPa, 633 kPa e 703 kPa). Das análises dos resultados conclui-se que a variação do teor das misturas asfálticas afeta significativamente suas propriedades mecânicas e correspondentes respostas estruturais dos pavimentos.

Palavras-chave: Misturas asfálticas densas. Métodos de dosagem. Teores de projeto de ligante asfáltico. Sensibilidade estrutural.

INFLUENCE OF THE VARIATION OF THE PROJECT BINDING CONTENT AND THE ASPHALT MIXTURE DOSING METHOD IN THE STRUCTURAL SENSITIVITY OF AN ASFALIC PAVEMENT

ABSTRACT

The main objective of this research was to perform an analysis of the structural sensitivity of an adopted pavement, whose asphalt coating varied as a function of the asphalt binder contents and the Marshall and Superpave dosing methods. These asphalt coatings meet the technical requirements corresponding to the grain size ranges C (asphalt layer) and B (binder) of the DNIT service specification for hot-bituminous concretes. The experimental program developed combined an asphalt binder (CAP 50/70), a composition of mineral aggregates of gaseous origin and two dosing methods (Marshall and Superpave). The results of the Marshall dosages indicated 4.7% and 4.2% asphalt binder design for the asphalt mixtures of the granulometric bands C and B, respectively. As for the Superpave dosage, the asphalt binder design contents were 4.6% and 4.85%, respectively, for the same granulometric ranges mentioned previously. A variation of $\pm 0.5\%$ in these asphalt binder design was allowed and the values of resilience modulus (MR) and tensile strength by diametral compression (RT) of the resulting asphalt mixtures were applied to the asphalt pavement structure analyzed by (me-PADS v1.1), aiming to obtain the structural responses regarding the deformations in the surface of this pavement and the tensions in the lower fibers of the asphalt layers. The analyzes were performed for three loading levels (80 kN, 98 kN and 118 kN) and three tire inflation pressure levels (563 kPa, 633 kPa and 703 kPa). From the analysis of the results it is concluded that the variation of the content of the asphalt mixtures significantly affects its mechanical properties and corresponding structural responses of the pavements.

Keywords: Dense asphalt mixtures. Dosage methods. Asphalt binder design contents. Structural sensitivity.

A.1 INTRODUÇÃO

A mistura asfáltica a quente é um dos tipos de revestimentos mais comumente utilizados nos pavimentos asfálticos em diferentes países do mundo (FRITZEN; MOTA, 2016). A determinação correta do teor de projeto de asfalto do revestimento asfáltico auxilia na seleção da mistura asfáltica que melhor apresenta características volumétricas, de rigidez e de flexibilidade, a fim de resistir aos carregamentos do tráfego sem o surgimento de fissuras por fadiga e deformações plásticas precoces, além de fornecer conforto e segurança ao rolamento ao longo de sua vida de serviço. Conforme Furlan et al. (2010), ocorre uma variação significativa no comportamento das misturas asfálticas em função de sua exposição aos procedimentos de mistura e temperatura de usinagem. Há vários métodos para se projetarem as misturas asfálticas, como, por exemplo, os métodos Marshall, Hveem 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. Ainda de acordo com Ahmad et al. (2012), o método Marshall é o mais utilizado nos países de clima tropical para o projeto de misturas asfálticas (ASI, 2007; GOUVEIA; FERNANDES JR; SOARES, 2007; KHEDR; SAUDY, 2016; ALMEIDA JR, 2018).

O método Superpave foi desenvolvido no ano de 1993 pelo *Strategic Highway Research Program* (SHRP). Esse método, segundo Liu et al. (2018), consiste em três etapas principais, a saber: (1) grau de desempenho do asfalto, que depende de uma gama de graus de temperatura e ajuste de acordo com as características do tráfego; (2) critérios de graduação do agregado, com mais restrições que o método Marshall; (3) procedimento da mistura asfáltica, através do qual simulam-se as condições de campo e desempenho, conseqüentemente considerando as condições climáticas e de tráfego.

A principal diferença entre as misturas asfálticas dosadas pelos métodos Marshall e Superpave é a graduação dos agregados, uma vez que a matriz de agregado mineral é o principal componente dentro de uma mistura asfáltica, pois representa entre 92% e 96% em peso (AL-HUMEIDAWI, 2016). Para esse autor, a graduação dos agregados é o principal fator que afeta o desempenho da mistura asfáltica.

Outros fatores que também afetam o desempenho das misturas asfálticas são o processo de compactação e o teor de ligante asfáltico. Com relação à compactação, Wu, Liu e Sun (2018) destacam que os equipamentos utilizados para a dosagem de misturas

asfálticas pelo método Marshall são mais baratos que os utilizados para a dosagem pelo método Superpave. Estudos mostram que a compactação por impacto (Marshall) não é realista em comparação com a compactação giratória do procedimento Superpave, que simula de forma mais adequada as condições de compactação no campo (PÉREZ-JIMÉNEZ et al., 2014; AL-MISTAREHI, 2014).

Já com relação ao teor de ligante asfáltico, pesquisas realizadas por Karini; Golias; Schwartz (2012), Jitsangiam; Chindaprasirt; Nikraz (2013), Han; Wei; Zhang (2016) mostram que o método de dosagem Superpave produz misturas asfálticas com menores teores de ligante asfáltico em relação àquelas dosadas pelo método Marshall, porém essas últimas atingiram mais dificilmente a densidade de projeto na compactação em campo, o que pode gerar problemas de durabilidade, como o trincamento prematuro.

Para levar em consideração possíveis variações no teor de ligante, a especificação de serviço ES-031 (DNIT, 2006b) define a adoção de uma tolerância de serviço de $\pm 0,3\%$ do valor de projeto. Na literatura técnica há vários estudos que empregam a variação de $\pm 0,5\%$ no teor de projeto de misturas asfálticas para avaliação em laboratório do efeito desta variação sobre o desempenho estrutural das misturas asfálticas (SARSAM; HUSAIN, 2017; NETTO; REIS, 2015; MARQUES, 2004; VASCONCELOS; SOARES; LEITE, 2003).

Nesta pesquisa, também são adotadas variações de $\pm 0,5\%$ em torno do teor de projeto de asfalto de modo que foram quantificados os efeitos mensuráveis desta variação sobre as propriedades mecânicas das misturas asfálticas e correspondentes respostas estruturais dos pavimentos tipos em que estas foram aplicadas.

A despeito da relevância dos aspectos previamente mencionados, é importante destacar que há uma carência na literatura técnico-científica quanto à avaliação do eventual efeito da variação do teor de ligante de misturas asfálticas, visto que esta pode promover alterações nas propriedades mecânicas de engenharia da camada de revestimento asfáltico resultante e, conseqüentemente, em seu desempenho estrutural comparativamente ao inicialmente previsto. Nesse contexto, o objetivo principal desta pesquisa é avaliar a sensibilidade estrutural de um pavimento flexível considerando-se a eventual influência da variação do teor de ligante de projeto da mistura asfáltica sobre suas propriedades mecânicas (Módulo de Resiliência e Resistência à Tração por Compressão Diametral) e correspondentes respostas estruturais do pavimento, sob condições específicas de carregamento. Adicionalmente, mas em caráter secundário, será

avaliada a influência dos métodos de dosagem das misturas asfálticas de projeto (Marshall e Superpave) sobre a sensibilidade estrutural do pavimento flexível analisado.

A.2 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-tipo 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.

A.2.1 Parâmetros Volumétricos 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. Observa-se que o teor de ligante asfáltico da mistura asfáltica da faixa granulométrica C obtidos 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).

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

	Valores de referência ES-031 (DNIT, 2006b)		Mistura asfáltica 1	Mistura asfáltica 2	Mistura asfáltica 3	Mistura asfáltica 4
	C	B	C	B	C	B
Método de compactação	-		Marshall		Superpave	
Faixa granulométrica	C	B	C	B	C	B
Teor de projeto (%)	-		4,70	4,20	4,60	4,85
Vv (%)	3 a 5	4 a 6	4,19	4,49	4,28	4,75
RBV (%)	75 a 82	65 a 72	75,99	70,39	75,14	71,43
VAM (%)	-		15,23	14,71	15,55	16,48
Estabilidade (kgf)	>500		524,45	535,34	867,68	854,93
Fluência (mm)	-		3,50	1,20	4,81	4,70
Massa específica aparente (g/cm ³)	-		2,478	2,480	2,473	2,458
DMT (g/cm ³)	-		2,572	2,593	-	-
Gmm (g/cm ³)	-		-	-	2,588	2,569

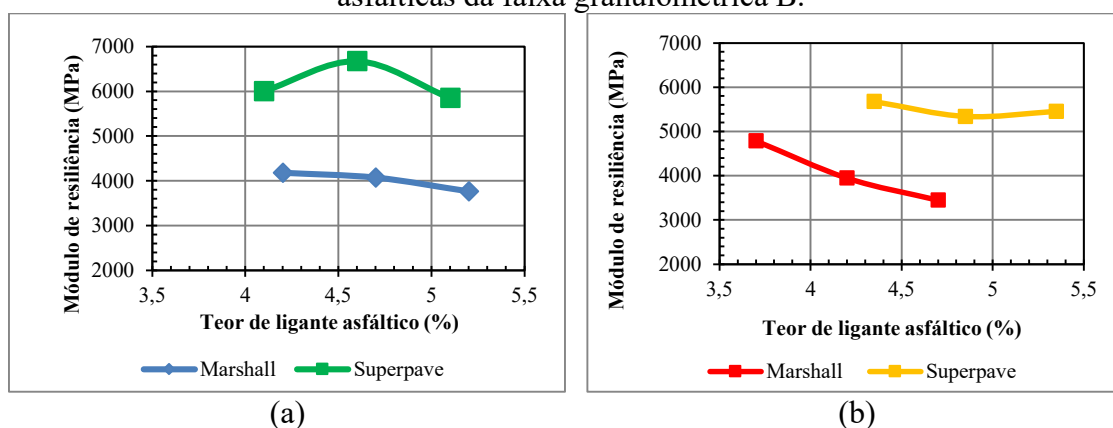
Fonte: Os Autores (2019).

A.2.2 Ensaios de Módulo de Resiliência

Na Figura 1 e Tabela 2, são apresentados os valores médios dos módulos de resiliência (MR) determinados para as amostras ensaiadas em função do teor de ligante asfáltico de projeto e variações de $\pm 0,5\%$ em torno desse teor. 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.

- Além disso, é possível perceber que para as misturas asfálticas dosadas pelo método Marshall, o aumento do teor de ligante asfáltico promoveu uma redução do valor do módulo de resiliência. Já nas misturas asfálticas dosadas pelo método Superpave o comportamento decrescente não foi observado, principalmente, para a faixa granulométrica B que apresentou aumento no módulo de resiliência quando o teor de ligante asfáltico foi acrescido de 0,5% no teor de projeto; enquanto para a faixa granulométrica C, o valor do módulo de resiliência decresceu com a variação de $\pm 0,5\%$ no teor de ligante de projeto.

Figura 1 – Valores médios de módulo de resiliência em função do teor de ligante asfáltico, (a) para as misturas asfálticas da faixa granulométrica C e (b) para as misturas asfálticas da faixa granulométrica B.



Fonte: Os Autores (2019)

Tabela 2 – Valores de Módulo de Resiliência em função do teor de ligante asfáltico.

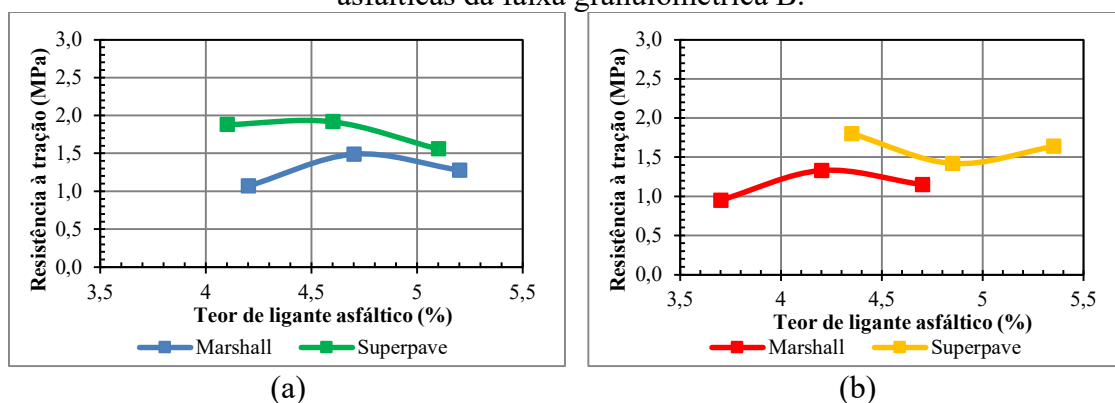
Método de Compactação	Mistura Asfáltica	Faixa Granulométrica	Teor de Asfalto (%)	Módulo de Resiliência (MPa)
Marshall	1	C	4,2	4181,00
			4,7	4.073,00
			5,2	3.768,00
	2	B	3,7	4.788,00
			4,2	3.947,00
			4,7	3.448,00
Superpave	3	C	4,1	6.004,67
			4,6	6.672,89
			5,1	5.852,00
	4	B	4,35	5.677,89
			4,85	5.340,22
			5,35	5.455,89

Fonte: Os Autores (2019).

A.2.3 Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral

As médias dos valores obtidos de três corpos de prova nos ensaios de resistência à tração por compressão diametral para as misturas asfálticas analisadas são apresentadas na Figura 2 e Tabela 3. Observa-se que os maiores valores médios encontrados correspondem às misturas asfálticas dosadas pelo método Superpave, evidenciando que, para os propósitos da pesquisa, o produto final resultante da dosagem e compactação pelo método Superpave é mais resistente à tração que o resultante do protocolo do método Marshall, independente do teor de ligante asfáltico.

Figura 2 – Resistência à tração por compressão diametral em função do teor de ligante asfáltico: (a) para as misturas asfálticas da faixa granulométrica C e (b) para as misturas asfálticas da faixa granulométrica B.



Fonte: Os Autores (2019).

Tabela 3 – Valores de Resistência à Tração por Compressão Diametral em função do teor de ligante asfáltico.

Método de Compactação	Mistura Asfáltica	Faixa Granulométrica	Teor de Asfalto (%)	Resistência à Tração (MPa)
Marshall	1	C	4,2	1,07
			4,7	1,49
			5,2	1,28
	2	B	3,7	0,95
			4,2	1,33
			4,7	1,15
Superpave	3	C	4,1	1,88
			4,6	1,92
			5,1	1,56
	4	B	4,35	1,80
			4,85	1,42
			5,35	1,64

Fonte: Os Autores (2019).

Da Tabela 3, observa-se que, para os dois métodos de dosagem utilizados, os resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral demonstram sensibilidade à variação no teor de ligante asfáltico: para as misturas asfálticas dosadas pelo método Marshall constata-se que a variação de até 28,6% em relação ao teor de ligante de projeto; para as misturas asfálticas dosadas pelo método Superpave esta variação atinge 21,1%.

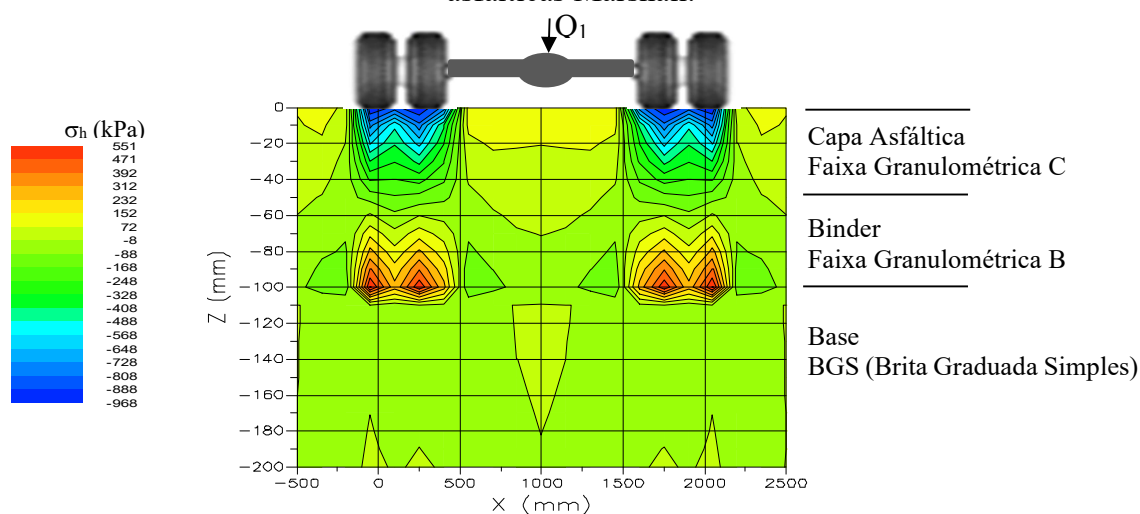
A.2.4 Análise Estrutural do Pavimento Flexível Adotado

Foram realizadas dezoito análises empírico-mecanísticas para o pavimento-tipo adotado, divididas em seis estruturas (três utilizando as misturas asfálticas dosadas pelo método Marshall e outras três 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. Para fins de atendimento ao propósito dessa pesquisa, serão apresentadas apenas as seções transversais representativas das tensões horizontais e deflexões recuperáveis do pavimento-tipo adotado e submetido à carga por eixo de 80 kN e pressão de enchimento de 563 kPa, para os revestimentos asfálticos (capa e binder) dosados e compactados pelos métodos Marshall e Superpave nos teores de ligante de projeto apresentados nas Figuras 3, 5 e 9. Para os demais cenários, os resultados foram apresentados considerando-se as magnitudes desses parâmetros nos pontos críticos da camada de revestimento, conforme apresentado nas Tabelas 4, 5 e 6.

Observa-se, nas Figuras 3 e 5, que as maiores tensões horizontais (σ_h) estão sob os pontos de aplicação de carga, razão pela qual as análises do pavimento asfáltico adotado foram realizadas considerando as tensões e deslocamentos nestes pontos.

Na Figura 3, são apresentadas as tensões horizontais (σ_h) que atuam na estrutura do pavimento asfáltico adotado, para as seguintes condições: misturas asfálticas dosadas no teor de ligante de projeto pelo método Marshall, carregamento de 80 kN por eixo e pressão de enchimento dos pneus de 563 kPa. Observa-se que as maiores tensões horizontais (σ_h) estão na fibra inferior da camada de binder.

Figura 3 – Tensões horizontais (σ_h) na estrutura do pavimento adotado para as misturas asfálticas Marshall.



Fonte: Os Autores (2019).

Na Tabela 4 e Figura 4, são apresentadas as maiores tensões horizontais (σ_h) nas fibras inferiores das camadas asfálticas em função da variação do carregamento e do teor de ligante asfáltico das misturas asfálticas dosadas pelo método Marshall.

Tabela 4 – Tensões horizontais (σ_h) atuantes nas fibras inferiores das camadas asfálticas em função dos níveis de carregamento adotados, para as misturas dosadas pelo método Marshall, na posição $x=0\text{mm}$.

Pav	Q_{eixo} (kN)	P_{pneus} (kPa)	Faixa Granulométrica	T_{Asf} (%)	σ_h (MPa)	Faixa Granulométrica	T_{Asf} (%)	σ_h (MPa)
1	80	563	C	4,2	-0,203	B	3,7	0,720
2				4,7	-0,160		4,2	0,628
3				5,2	-0,147		4,7	0,569
1	98	633		4,2	-0,240		3,7	0,833
2				4,7	-0,194		4,2	0,726
3				5,2	-0,179		4,7	0,657
1	118	703	BGS	4,2	-0,281	BGS	3,7	0,951
2				4,7	-0,229		4,2	0,827
3				5,2	-0,213		4,7	0,747

Observação: (-) compressão e (+) tração

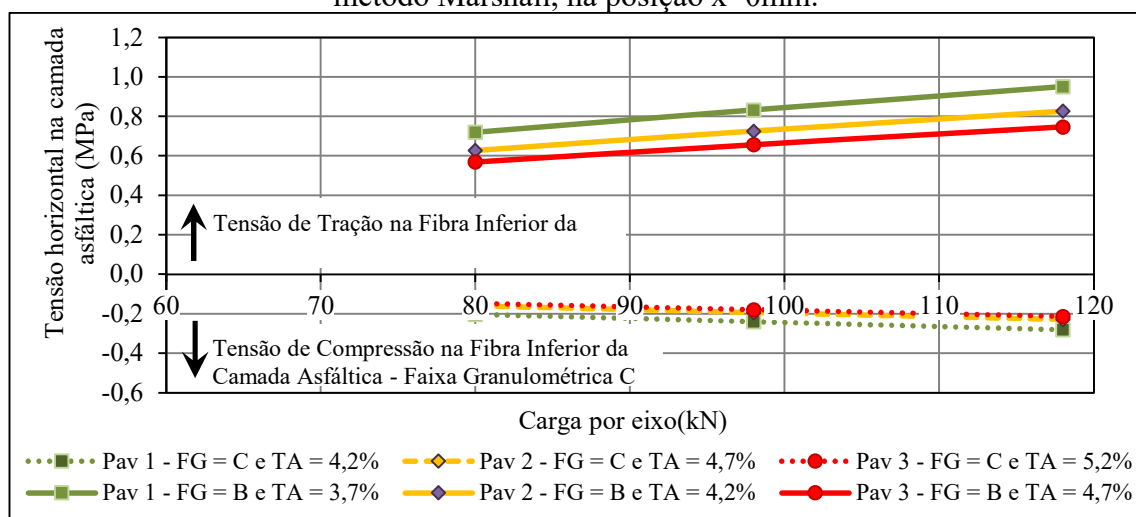
Pav: pavimento

T_{Asf} : Teor de asfalto

Fonte: Os Autores (2019).

A Figura 4 apresenta a variação das tensões horizontais (σ_h) atuantes na fibra inferior das camadas asfálticas do pavimento asfáltico adotado, dosadas pelo método Marshall, em função dos carregamentos estudados. Observa-se nesta figura que em cada um dos três pavimentos asfálticos analisados, as tensões horizontais (σ_h) em cada camada asfáltica (faixa granulométrica – FG) variaram com o teor de asfalto (TA) e o nível de carregamento. As tensões atuantes na camada asfáltica da faixa granulométrica C (tensão de compressão) não apresentaram variações significativas na sua magnitude apesar do teor de ligante asfáltico variar 0,5% do teor de ligante asfáltico de projeto. Já as tensões de tração (faixa granulométrica B) apresentaram uma pequena variação nos seus valores.

Figura 4 – 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 $x=0\text{mm}$.

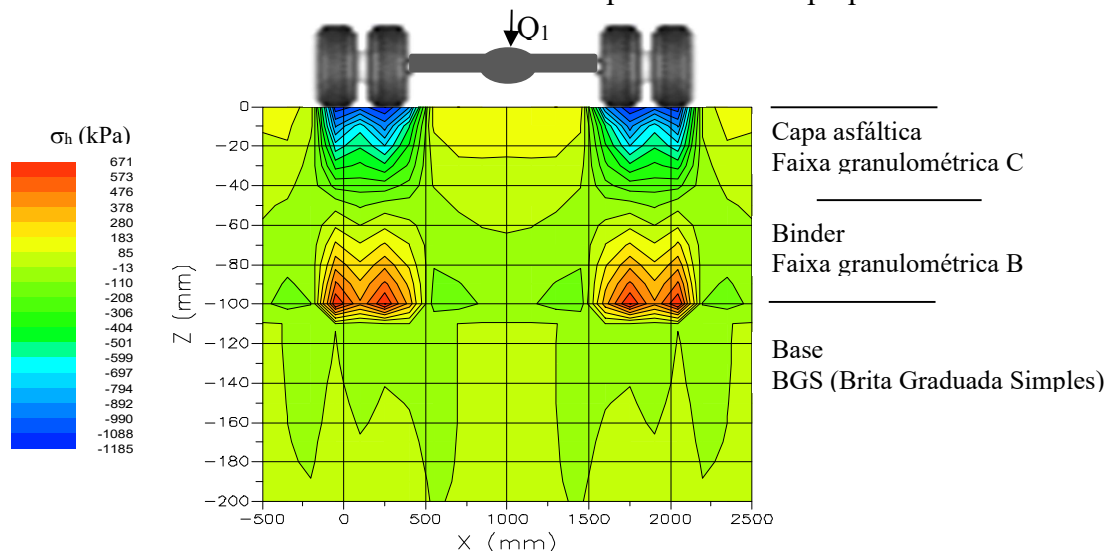


Fonte: Os Autores (2019).

Analisando ainda a Figura 4, verifica-se que, para um mesmo nível de carregamento, as tensões horizontais (σ_h) decrescem com o aumento do teor de ligante asfáltico na mistura asfáltica. Isso ocorre em todos os níveis de carregamento e pode ser justificado pelo fato de que o módulo de resiliência da mistura asfáltica diminui com o aumento do teor de ligante asfáltico. Ou seja, como as misturas asfálticas dosadas pelo método Marshall com maiores teores de ligante asfáltico apresentaram valores menores de módulo de resiliência, estas se mostram mais flexíveis quando comparadas com as misturas asfálticas de menor teor de ligante asfáltico. De forma que, este decréscimo de tensões horizontais está relacionado com o fato de que misturas asfálticas mais flexíveis redistribuem e absorvem mais tensões horizontais, o que explica a redução observada tanto nas tensões de tração como de compressão. Nas tensões de tração, esta variação atinge o valor máximo de 21%.

Na Figura 5, são apresentadas as tensões horizontais (σ_h) que atuam na estrutura do pavimento asfáltico adotado para as misturas asfálticas dosadas pelo método Superpave no teor de ligante asfáltico de projeto, para o carregamento de 80 kN por eixo e pressão de enchimento dos pneus de 563 kPa. Observa-se que as maiores tensões horizontais (σ_h) estão na fibra inferior da camada de binder.

Figura 5 – Tensões horizontais (σ_h) na estrutura do pavimento asfáltico analisado para as misturas asfálticas dosadas pelo método Superpave.



Fonte: Os Autores (2019).

Na Tabela 5, são apresentadas as maiores tensões horizontais (σ_h) na fibra inferior das camadas asfálticas em função da variação do carregamento e também do teor de ligante asfáltico das misturas asfálticas analisadas e dosadas pelo método Superpave.

Tabela 5 – 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 $x=0\text{mm}$.

Pav	Q _{eixo} (kN)	P _{pneus} (kPa)	Faixa Granulométrica	T _{Asf} (%)	σ_h (MPa)	Faixa Granulométrica	T _{Asf} (%)	σ_h (MPa)
4	80	563	C	4,1	-0,145	B	4,35	0,793
5				4,6	-0,085		4,85	0,755
6				5,1	-0,141		5,35	0,774
4	98	633		4,1	-0,176		4,35	0,925
5				4,6	-0,107		4,85	0,881
6				5,1	-0,171		5,35	0,902
4	118	703	4,1	-0,209	4,35	1,062		
5			4,6	-0,132	4,85	1,012		
6			5,1	-0,204	5,35	1,035		

Observação: (-) compressão e (+) tração

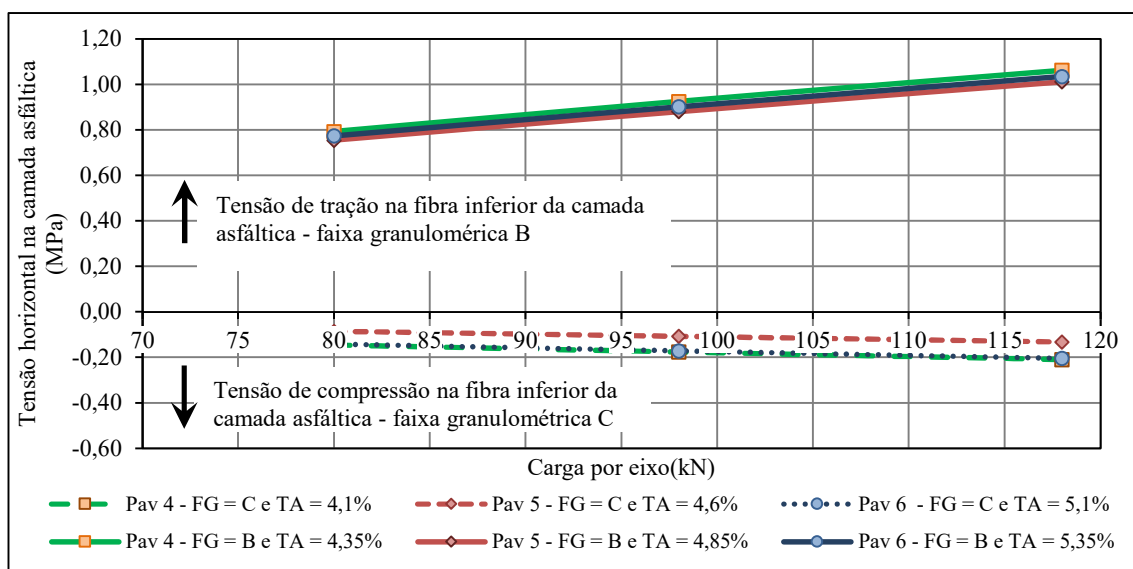
Pav: pavimento

T_{Asf}: Teor de asfalto

Fonte: Os Autores (2019)

A Figura 6 apresenta a 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 $x=0\text{mm}$.



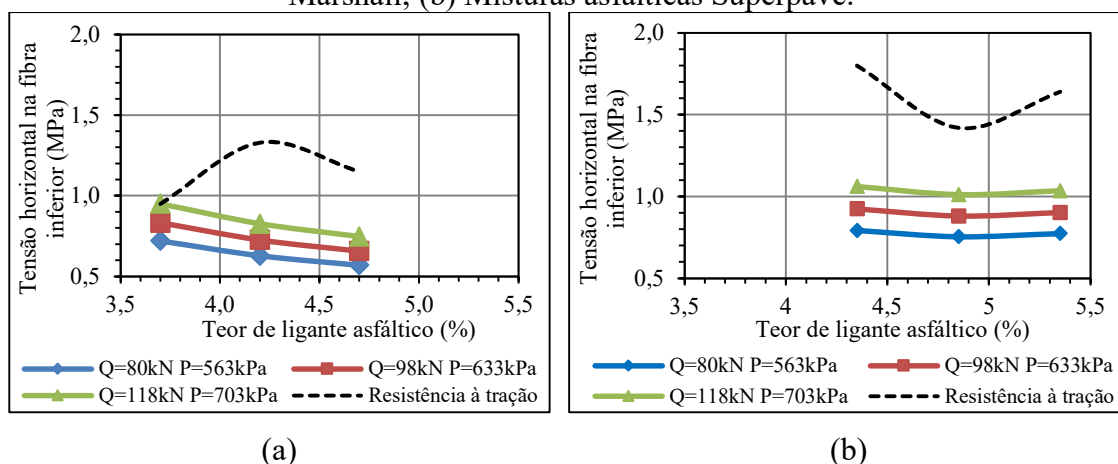
Fonte: Os Autores (2019).

Verifica-se na Figura 6 que as respostas estruturais das camadas asfálticas dosadas pelo método Superpave também apresentaram influências da variação do teor de ligante asfáltico. Para as camadas asfálticas dosadas pelo método Superpave, observa-se que para um mesmo nível de carregamento as tensões horizontais decrescem à medida que o teor de ligante asfáltico aumenta. No entanto, esta variação nas tensões horizontais atinge no máximo 5% para as tensões de tração, enquanto nas camadas asfálticas dosadas pelo método Marshall esta variação chega a 21% (ver Figura 4).

Portanto, comparativamente às misturas asfálticas moldadas pelo compactador Marshall, as tensões horizontais das misturas asfálticas moldadas no compactador giratório Superpave demonstraram menor influência na variação no teor de ligante asfáltico, principalmente, na camada de binder, o que pode ser observado na Figura 7.

Dada a constatação experimental de que as tensões de tração críticas se desenvolvem no bordo inferior da camada de binder (faixa granulométrica B), a Figura 7 apresenta, para esse bordo, as respectivas curvas de variação das tensões de tração em função do teor de ligante asfáltico, da condição de carregamento e dos métodos de dosagem e compactação das misturas asfálticas. Também são representadas as correspondentes curvas de resistência à tração por compressão diametral das misturas asfálticas analisadas.

Figura 7 – Tensões de tração atuantes no bordo inferior da camada de binder dos pavimentos adotado em função do teor de ligante asfáltico: (a) misturas asfálticas Marshall; (b) Misturas asfálticas Superpave.



Fonte: Os Autores (2019).

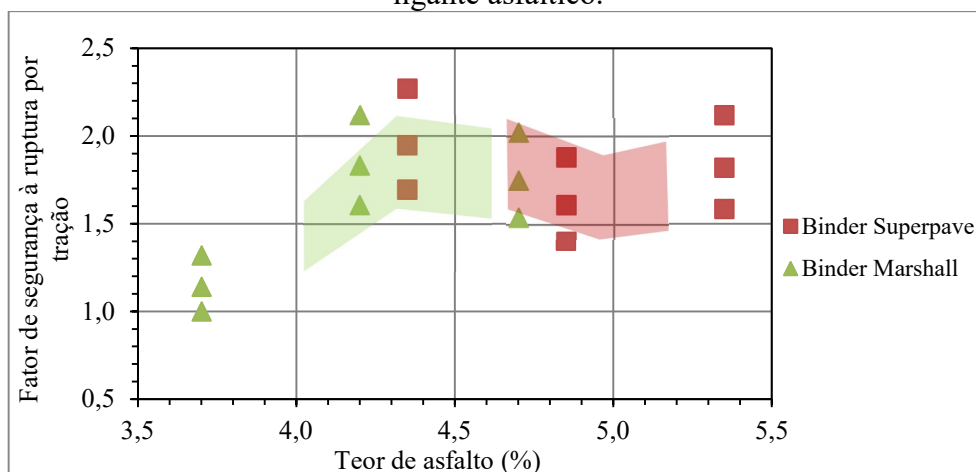
Com base no exposto na Figura 7, verifica-se que: para as misturas asfálticas dosadas pelo método Marshall, as tensões horizontais (σ_h) de tração diminuem com o aumento do teor de ligante asfáltico (variando até 21%). Já para as misturas asfálticas dosadas pelo método Superpave, as tensões horizontais (σ_h) de tração apresentam variações menores com o aumento do teor de ligante asfáltico (no máximo 5%).

Esta diferença na resposta da estrutura dos pavimentos adotados está relacionada ao fato de que: por apresentarem módulo de resiliência inferiores as misturas asfálticas dosadas pelo método Superpave, em todos os teores de ligante asfáltico, as misturas asfálticas dosadas pelo método Marshall se mostram mais flexíveis do que as dosadas pelo método Superpave, de modo que as tensões concentradas no bordo inferior da camada de binder dissipam-se numa pequena área em torno do ponto de concentração; enquanto as camadas correspondentes às misturas asfálticas dosadas pelo método Superpave, por apresentarem valores mais altos de módulo de resiliência, mostram-se mais rígidas mesmo com o aumento do teor de ligante asfáltico, o que faz com que as tensões horizontais de tração se distribuam numa área maior. Isso se deve à diferença entre os processos de compactação empregados nos dois métodos estudados – Marshall (compactação por impacto) e Superpave (compactação por amassamento). Conclui-se, portanto, que as camadas asfálticas modeladas a partir das misturas asfálticas obtidas com o método Marshall apresentam maior sensibilidade à variação no teor de ligante asfáltico.

Apesar das diferenças de comportamento das tensões horizontais para as misturas asfálticas dosadas pelos dois métodos analisados, verifica-se ainda que as tensões de tração calculadas pelo programa computacional *me-PADS* são inferiores à resistência de

tração das misturas asfálticas estudadas, como pode ser visto na Figura 8. Nesse contexto, a Figura 8 apresenta os respectivos fatores de segurança à ruptura por tração (relação entre a resistência à tração por compressão diametral e a tensão de tração no bordo inferior da camada de binder) para todos os cenários investigados e representados na Figura 7.

Figura 8 – Fator de segurança à ruptura da camada de Binder em função do teor de ligante asfáltico.



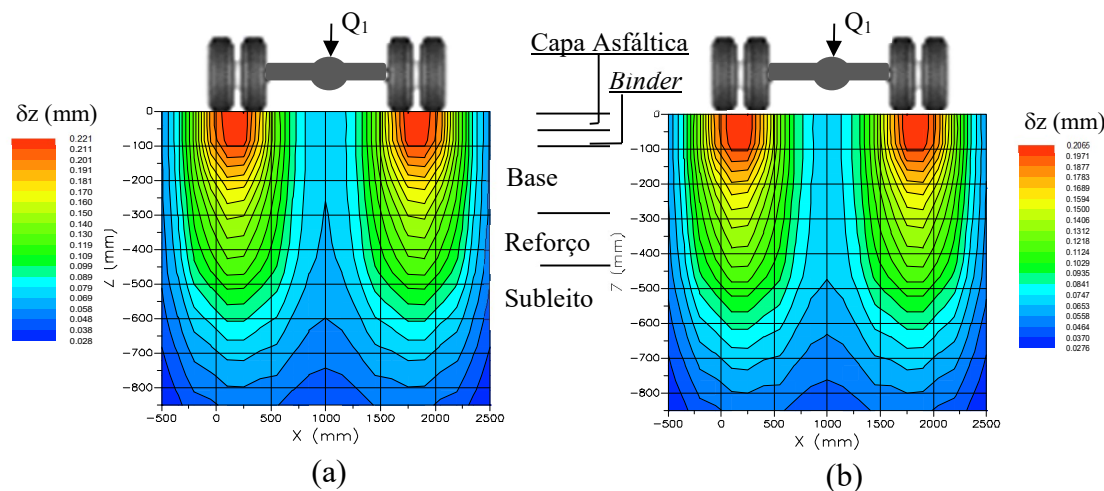
Fonte: Os Autores (2019).

Na Figura 8, pode-se observar que, para cada uma das misturas asfálticas analisadas, a relação entre a resistência à tração e a tensão horizontal atuante é maior do que 1,0. Apenas no caso do menor teor de ligante asfáltico da mistura Marshall (3,7%), obteve-se o fator de segurança igual a 1,0 para o nível de carregamento de 118kN, o que representa um dos extremos da faixa analisada nesta pesquisa. Entretanto, considerando a tolerância de 0,3%, conforme a especificação de serviço ES-031 (DNIT, 2006b) para a variação do teor de ligante asfáltico em torno do teor de ligante asfáltico de projeto (faixas sombreadas na Figura 8) para os dois métodos de dosagem analisados, observa-se que todos os fatores de segurança estão acima de 1,2.

É importante ressaltar que a variação no teor de ligante asfáltico das misturas asfálticas apresenta efeito significativo sobre o comportamento estrutural dos pavimentos adotados. No entanto, não constitui risco de ruptura para as camadas asfálticas dosadas dentro da faixa de tolerância especificada pela especificação de serviço supramencionada.

Na Figura 9, são apresentados os valores das deflexões verticais (δz) recuperáveis previstas na estrutura do pavimento adotado, para o carregamento de 80 kN por eixo e pressão de enchimento dos pneus de 563 kPa. A Figura 9a apresenta as deflexões verticais (δz) para as misturas asfálticas dosadas pelo método Marshall e a Figura 9b as deflexões verticais (δz) para as misturas asfálticas dosadas pelo método Superpave.

Figura 9 – Deflexões verticais (δz) na estrutura do pavimento adotado analisado para o carregamento de 80kN por eixo: (a) misturas asfálticas dosadas pelo método Marshall e (b) misturas asfálticas dosadas pelo método Superpave.



Fonte: Os Autores (2019)

É possível verificar na Figura 9 que as maiores deflexões verticais recuperáveis ocorrem nas camadas asfálticas (capa asfáltica e binder) de maneira similar para ambos os métodos de dosagem analisados, sendo as deflexões apresentadas na camada asfáltica dosada pelo método Marshall, para o carregamento representado, superiores às da camada asfáltica dosada pelo método Superpave em cerca de 10%, como pode ser observado na Tabela 6.

As deflexões verticais recuperáveis máximas no topo da camada asfáltica do pavimento adotado para cada um dos carregamentos adotados estão apresentadas na Tabela 6, em que as estruturas do pavimento de 1 a 3 representam as camadas asfálticas dosadas pelo método Marshall e as estruturas de 4 a 6 as camadas asfálticas dosadas pelo método Superpave.

Para fins de avaliação dos valores de deflexões máximas apresentados na Tabela 6, foram calculadas as deflexões admissíveis, segundo o procedimento PRO-011 (DNER, 1979), para um tráfego pesado ($N=5 \times 10^7$), conforme a classificação da rodovia segundo o Manual de Pavimentação (DNIT, 2006a). A deflexão admissível calculada para este nível de tráfego é 45,18x0,01mm e representada pela linha tracejada na Figura 10.

Tabela 6 – Deflexões verticais recuperáveis máximas no topo da camada asfáltica do pavimento adotado em função da variação dos valores de Módulos de Resiliência das misturas asfálticas analisadas e dos níveis de carregamento adotados.

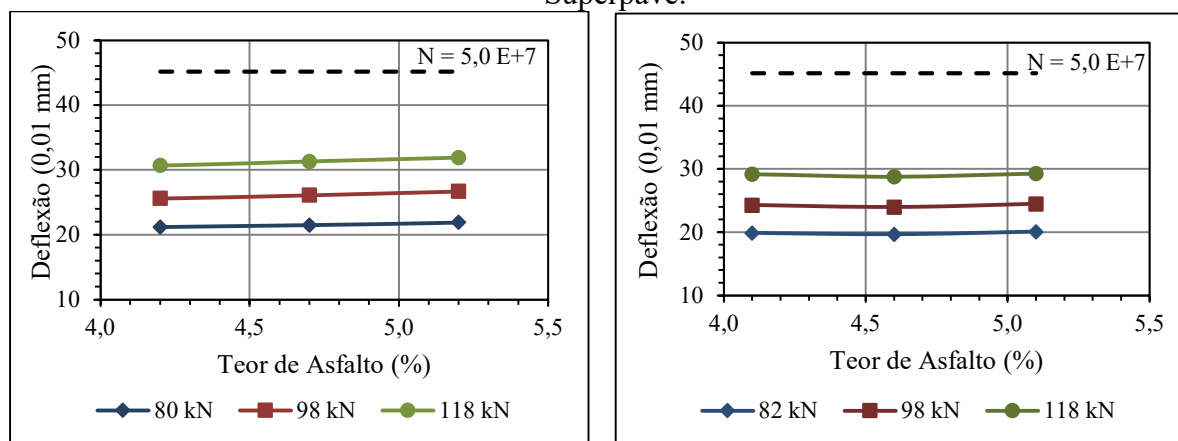
Pavimento	Método de Dosagem	T _{Asfalto} (%) (FG - C)	T _{Asfalto} (%) (FG - B)	Q _{eixo} (kN)	P _{pneus} (kPa)	Deflexões Máxima (0,01 mm)
1	Marshall	4,2	3,7	80	563	21.20
				98	633	25.60
				118	703	30.70
2		4,7	4,2	80	563	21.50
				98	633	26.10
				118	703	31.30
3		5,2	4,7	80	563	21.90
				98	633	26.70
				118	703	31.90
4	Superpave	4,1	4,35	80	563	19.90
				98	633	24.30
				118	703	29.20
5		4,6	4,85	80	563	19.70
				98	633	24.00
				118	703	28.80
6		5,1	5,35	80	563	20.10
				98	633	24.50
				118	703	29.30

Observação: FG = Faixa granulométrica

Fonte: Os Autores (2019).

Observa-se, na Figura 10, que as estruturas dos pavimentos analisadas, cujos valores de módulos de resiliência variaram com os teores de ligantes asfálticos, determinados pelos métodos de dosagem Marshall e Superpave, apresentaram deflexões máximas inferiores às admissíveis determinadas para o níveis de tráfego do Manual de Pavimentação (DNIT, 2006a).

Figura 10 – Deflexões verticais máximas na estrutura do pavimento adotado em função do teor de ligante asfáltico das misturas asfálticas: (a) método Marshall e (b) método Superpave.



(a)

(b)

Fonte: Os Autores (2019).

Analisando-se os valores de deflexões expostos na Tabela 6 e representados na Figura 10, é possível observar que os resultados das estruturas compostas pelas misturas asfálticas dosadas pelo método Marshall (1 a 3) evidenciam que o aumento do teor de ligante asfáltico produziu misturas asfálticas mais flexíveis que induziram um aumento das deflexões máximas, para os níveis de carregamento analisados.

No que se refere às estruturas de pavimento dosadas pelo método Superpave, estas apresentaram para um mesmo nível de carregamento deflexões máximas inferiores às das misturas asfálticas dosadas pelo método Marshall, o que constitui um reflexo do fato de as misturas asfálticas dosadas pelo método Superpave serem mais rígidas (maior valor de módulo de resiliência) comparativamente às misturas asfálticas dosadas pelo método Marshall.

A.3 CONCLUSÕES

Dos resultados obtidos nesta pesquisa conclui-se que a variação no teor de ligante asfáltico das misturas asfálticas tem influência significativa nas propriedades mecânicas e correspondentes respostas estruturais dos pavimentos adotados e analisados. Também, é importante ressaltar:

- a) O processo de compactação dos métodos de dosagem analisados teve efeito sobre a determinação do teor de projeto de ligante asfáltico, principalmente para as misturas asfálticas da faixa granulométrica B, uma vez que o teor de ligante asfáltico encontrado para o método de dosagem Marshall foi de 4,2% e para o Superpave 4,85%. Já para as misturas asfálticas da faixa granulométrica C a diferença entre os teores de projeto de ligante asfáltico encontrados foi menor (4,7% e 4,6%, respectivamente, métodos de dosagem Marshall e Superpave);
- b) As misturas asfálticas dosadas pelo método Superpave apresentaram maiores valores de módulo de resiliência, evidenciando que, para o propósito da pesquisa, o produto final resultante do método de dosagem e processo de compactação Superpave é mais rígido que o resultado obtido para as misturas dosadas pelo método Marshall, independentemente do teor de ligante asfáltico analisado.
- c) Para as misturas asfálticas dosadas pelo método Marshall, o aumento do teor de ligante asfáltico promoveu uma redução do valor do módulo de resiliência. Já nas misturas asfálticas dosadas pelo método Superpave não foi observado esse comportamento, principalmente, para a faixa granulométrica B que apresentou

aumento no valor do módulo de resiliência quando o teor de ligante asfáltico foi acrescido de 0,5% no teor de projeto de ligante asfáltico; enquanto para a faixa granulométrica C, o valor do módulo de resiliência decresceu com a variação de $\pm 0,5\%$ no teor de projeto de ligante asfáltico.

- d) Para os dois métodos de dosagem analisados, os resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral demonstraram sensibilidade à variação no teor de ligante asfáltico: para as camadas asfálticas dosadas pelo método Marshall constatou-se que a variação em relação ao teor de projeto de ligante asfáltico corresponde a até 28,6%; para as camadas asfálticas dosadas pelo método Superpave esta diferença diminui para até 21,1%.
- e) Todas as respostas estruturais das camadas asfálticas compactadas pelos métodos de dosagem Superpave e Marshall são influenciadas pela variação do teor de ligante asfáltico, evidenciando que para um mesmo nível de carregamento as tensões decrescem à medida que o teor de ligante asfáltico aumenta. No entanto, nas camadas asfálticas dosadas pelo método Superpave esta variação nas tensões horizontais atinge no máximo 5% para as tensões de tração, enquanto nas camadas asfálticas dosadas pelo método Marshall esta variação chega a 21%.
- f) A análise estrutural indicou que os pavimentos adotados com as camadas asfálticas dosadas pelo método Marshall apresentaram uma maior deflexão (10%) que os pavimentos com as misturas asfálticas dosadas pelo método Superpave, isto possivelmente foi devido às misturas asfálticas dosadas pelo método Marshall produzirem revestimentos mais flexíveis quando comparadas às misturas asfálticas dosadas pelo método Superpave, para os níveis de carregamento analisados.

Conclui-se, portanto que as camadas asfálticas modeladas a partir das misturas asfálticas obtidas com o método Marshall apresentam maior sensibilidade à variação no teor de ligante asfáltico.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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.

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.

ALMEIDA JR.; BOEIRA, F.D.; SPECHT, L.P.; CERVO, T.C.; PEREIRA, D.S.; CENTOFANTE, R.; BARBOSA JR, V; SILVA, C.C. Avaliação Laboratorial do Tipo e Teor de Ligante e da Granulometria na Deformação Permanente de Misturas Asfálticas. **TRANSPORTES**. v. 26. n. 2. 2018.

AL-MISTAREHI, B. Superpave System Versus Marshall Design Procedure for Asphalt Paving Mistures (Comparative Study). **Global Journal of Researches in Engineering (G)**, v. XIV, Issue V, Version I, p. 45-52, 2014.

ASI, I. M. Performance evaluation of SUPERPAVE and Marshall asphalt mix designs to suite Jordan climatic and traffic conditions. **Construction and Building Materials**. v. 21. P. 1732-1740. 2007.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **PRO-011**: Avaliação estrutural dos pavimentos flexíveis. Procedimento de ensaio. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Rio de Janeiro, 1979, 16 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.

FRITZEN, M.A.; MOTTA, L.M.G. Enfoque do desenvolvimento e validação da função de transferência para previsão do dano por fadiga de misturas asfálticas. **22º Encontro de Asfalto**. Rio de Janeiro. Brasil. 2016. 11 p.

FURLAN, A.P. et al. Influência do modo de preparo de misturas asfálticas densas em suas propriedades mecânicas e durabilidade. **20º Encontro de Asfalto**. Rio de Janeiro, Brasil. 2010.

GOUVEIA, L. T.; FERNANDES JR., J. L.; SOARES, J. B. Influência da energia de compactação no comportamento volumétrico e mecânico de misturas asfálticas. **TRANSPORTES**, v. XV, n. 1, p. 34-41, 2007.

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

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.

KARINI, S.S.; GOLIAS, 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.

KHEDR, S.; SAUDY, M.. Superpave versus Conventional Techniques for Designing Normal and Modified Asphalt Mixes. **Interaction between Theory and Practice in Civil Engineering and Construction**. Edited by Komurlu, R., Gurgun, A. P., Singh, A., and Yazdani, S.. p. 103-108. 2016.

LIU, S.; CAO, W.; LI, X.; LI, Z.; SUN, C. Principle Analysis of Mix Design and Performance Evaluation on Superpave Mixture Modified with Buton Rock Asphalt. **Construction and Building Materials**. v. 176 p. 549–555. 2018.

MARQUES, G. L. O. **Utilização do módulo de resiliência como critério de dosagem de mistura asfáltica, Efeito da compactação por impacto e giratório**. 2004. 461 p. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. COPPE/UFRJ. 2004.

NETTO, Q. M. P.; REIS, A. C. C. Análise do comportamento mecânico de misturas asfalto-borracha produzidas pelo processo úmido e seco. **XXIX Congresso Nacional de Pesquisa em Transporte da ANPET**. p. 25-36. 2015

PÉREZ-JIMÉNEZ, F.; MARTÍNEZ, A.H.; MIRÓ, R.; HERNÁNDEZ-BARRERA, D; ARAYA-ZAMORANO, L. Effect of compaction temperature and procedure on the design of asphalt mixtures using Marshall and gyratory compactors. **Construction and Building Materials**. n. 65, 2014, p. 264-269.

SARSAM, S. I.; HUSAIN, H. K. Influence of Healing Cycles and Asphalt Content on Resilient Modulus of Asphalt Concrete. **Trends in Transport Engineering and Applications (TTEA)**. STM Journals. v. 4. Issue 1. p. 23-30. 2017

VASCONCELOS, K. L.; SOARES, J. B.; LEITE, L. M. Efeito da densidade máxima teórica na dosagem e no comportamento mecânico de misturas asfáltica tipo CBUQ. **TRANSPORTES**. v. XI. p. 22-30. 2003.

WU, B.; LIU, L.; SUN L. Analysis of parameters affecting asphalt mixture performance and new perspectives on the design parameters. **Construction and Building Materials**. v. 174 p. 625–632. 2018.

APÊNDICE B - ANÁLISE MECÂNICA-EMPIRICA DE UM PAVIMENTO FLEXÍVEL EM FUNÇÃO DO FENÔMENO DE FADIGA.

RESUMO

Esta pesquisa teve por objetivo avaliar a vida de fadiga de quatro misturas asfálticas à quente nos seus respectivos teores de projeto de ligante asfáltico, sendo duas enquadradas na faixa granulométrica C (capa asfáltica) e duas na faixa granulométrica B (binder) da especificação de serviço do DNIT para concretos betuminosos usinados a quente. O programa experimental desenvolvido combinou um ligante asfáltico (CAP 50/70), uma composição de agregados minerais de origem gnáissica, dois métodos de dosagem (Marshall e Superpave) e os ensaios de estabilidade e fluência Marshall, módulo de resiliência (MR), resistência à tração por compressão diametral (RT) e fadiga por compressão diametral à tensão controlada. Os parâmetros das misturas asfálticas resultantes foram aplicadas na estrutura do pavimento flexível analisado pelo software *Mechanistic Empirical Pavement Analysis and Design Software* (me-PADS v1.1), visando à obtenção das respostas estruturais referentes às deformações na superfície desse pavimento e as tensões nas fibras inferiores das camadas asfálticas. Dos resultados obtidos, conclui-se que as misturas asfálticas dosadas pelo método Superpave apresentaram melhor desempenho em fadiga do que as misturas asfálticas dosadas pelo método Marshall, e que ao serem combinados os fatores: método de dosagem Superpave, adequados teores de projeto de ligante asfáltico e agregados de granulometria mais densa – obtêm-se misturas asfálticas com melhores resultados de vida em fadiga.

Palavras-chave: Misturas asfálticas. Ensaio mecânicos de laboratório. Análise mecanística-empírica. Vida de fadiga.

MECHANICAL-EMPIRICAL ANALYSIS OF A FLEXIBLE FLOORING AS A RESPECT OF THE FATIGUE PHENOMENON.

ABSTRACT

The objective of this research was to evaluate the fatigue life of four hot-mix asphalt in their respective asphalt binder design content, two being classified in the gradation range C (asphalt layer) and two in the gradation range B (binder) of the service specification of DNIT for hot-bituminous concretes. The experimental program developed combined an asphalt binder (CAP 50/70), a composition of mineral aggregates of gneiss formation, two dosing methods (Marshall and Superpave) and the Stability and Marshall Fluency, resilience modulus (MR), tensile strength testing by diametral compression (RT) and diametrical compression fatigue to the controlled tension. The parameters of the resulting asphalt mixtures were applied in the flexible pavement structure analyzed by the software Mechanistic Empirical Pavement Analysis and Design Software (me-PADS v1.1), aiming to obtain the structural responses concerning the deformations in the surface of that pavement and the tensions in the fibers asphaltic layers. From the results obtained, it was concluded that the asphalt mixtures dosed by the Superpave method presented better performance in fatigue than the asphalt mixtures dosed by the Marshall method, and that when the factors are combined: Superpave dosage method, suitable asphalt binder and denser aggregates - better fatigue life results are obtained.

Keywords: Asphaltic mixtures. Laboratory mechanical testing. Mechanistic-empirical analysis. Fatigue life.

B.1 INTRODUÇÃO

No Brasil, o trincamento por fadiga é um dos principais problemas observados nos revestimentos asfálticos de pavimentos flexíveis. De acordo com Fritzen e Motta (2016), esse fenômeno tem uma natureza complexa e pode estar relacionado a vários fatores, tais como: (i) escolha dos materiais, (ii) efeitos climáticos, e (iii) características do tráfego e da estrutura do pavimento. Segundo Mashaan et al. (2014), o projeto de misturas asfálticas deve envolver a seleção e dosagem de materiais para se obter as propriedades desejadas, fornecendo uma resposta estrutural condizente com as solicitações do tráfego e climáticas.

As solicitações do tráfego englobam: (i) magnitude do carregamento; (ii) tipo de carregamento; (iii) frequência, duração e intervalo de tempo entre aplicações sucessivas do carregamento; (iv) tipos de tensões e (v) forma do carregamento (AL-QADI; NASSAR, 2003). Já as solicitações climáticas referem-se a: (i) temperatura; e (ii) umidade. Segundo Modarres e Hamedi (2014), as trincas por fadiga ocorrem principalmente em temperaturas médias e baixas, pois a redução da temperatura aumenta a rigidez do ligante asfáltico e, nessas temperaturas, a mistura asfáltica tende a se comportar como um material frágil. No Brasil, os procedimentos de ensaio de fadiga propõem analisar as respostas à fadiga da mistura asfáltica a temperatura de 25°C (ME-135, DNIT, 2018).

Segundo Moghadas Nejad, Aflaki e Mohammadi (2010), o aumento da temperatura no ensaio de fadiga por tração indireta diminuirá o módulo de rigidez e conseqüentemente a vida de fadiga da mistura asfáltica. Estes autores afirmam que essa tendência é independente da granulometria do agregado e do teor de asfalto que compõem a mistura asfáltica. Moghaddam, Karim e Abdelaziz (2011) observaram que misturas asfálticas com granulometria aberta e maior teor de ligante asfáltico apresentaram menor vida de fadiga, embora a granulometria aberta seja um ponto positivo para o desempenho quanto à deformação permanente de misturas asfálticas a quente. Por outro lado misturas asfálticas de granulometrias densas têm melhor desempenho em fadiga, o efeito da granulometria na vida de fadiga é mais importante do que o teor de ligante da mistura asfáltica (MOGHADAS NEJAD; AFLAKI; MOHAMMADI, 2010).

Outro fator que também afeta o desempenho das misturas asfálticas é o processo de compactação. Wu, Liu e Sun (2018) destacam que os equipamentos utilizados para a dosagem de misturas asfálticas pelo método Marshall são mais baratos que os utilizados para a dosagem pelo método Superpave. Estudos mostram que a compactação por

impacto (Marshall) não é realista em comparação com a compactação giratória do procedimento Superpave, que simula de forma mais adequada as condições de compactação no campo (PÉREZ-JIMÉNEZ et al., 2014; AL-MISTAREHI, 2014).

Pesquisas realizadas por Karimi, Goulias e Schwartz (2012), Jitsangiam, Chindaprasirt e Nikraz (2013), Han, Wei e Zhang (2016) indicam que o método de dosagem Superpave produz misturas asfálticas com menores teores de ligante asfáltico em relação às aquelas dosadas pelo método Marshall, porém essas últimas atingiram mais facilmente a densidade de projeto na compactação em campo, o que pode gerar problemas de durabilidade, como o trincamento prematuro.

Para Melo e Trichês (2016), o ligante asfáltico e o agregado exercem papel fundamental no comportamento mecânico de misturas asfálticas: o ligante asfáltico, como resultado de sua consistência e reologia e o agregado em decorrência das forças de fricção interna entre suas partículas.

Por outro lado, Vasconcelos (2004) realizou ensaios para a determinação da vida de fadiga de misturas asfálticas com diferentes granulometrias e métodos de dosagem, nos quais se verificou uma tendência de maior vida de fadiga das misturas asfálticas dosadas pelo método Superpave com relação às misturas asfálticas dosadas pelo método Marshall, atribuindo este fato à distribuição granulométrica dos agregados e também ao processo de envelhecimento de curto prazo. Observou-se, ainda, que os teores de projeto de ligante asfáltico das misturas dosadas pelo método Superpave foram maiores que os das misturas asfálticas dosadas pelo método Marshall. A autora investigou os parâmetros que influenciaram estes resultados, atribuindo o aumento no teor de projeto de ligante asfáltico à forma como a Densidade Máxima Teórica (DMT) foi determinada, através da ponderação das densidades reais dos materiais constituintes (sendo influenciadas, principalmente, pela granulometria da mistura, quando comparadas misturas contínuas e descontínuas), bem como ao processo de compactação empregado.

De acordo com Mashaan et al. (2014), os ensaios de fadiga por compressão diametral em amostras asfálticas são realizados sob deformação controlada (DC) ou tensão controlada (TC). No ensaio à deformação controlada, o critério de fadiga não está condicionado à ruptura completa do corpo de prova, mas ao número de solicitações capaz de reduzir a carga necessária em 40 a 50% da carga inicial para manter a deformação constante ou reduzir a rigidez inicial da amostra a um valor determinado previamente. No ensaio de fadiga com tensão controlada (TC), o critério de fadiga está associado à ruptura do corpo de prova, onde a carga aplicada é mantida constante e as deformações aumentam

no decorrer do ensaio. Arabani e Mirabdolazimi (2011), Alatas et al. (2012) e Mashaan et al. (2014) ressaltaram a simplicidade e eficiência do ensaio de fadiga baseado no método de compressão diametral com tensão controlada.

O módulo de resiliência (MR) da mistura asfáltica está relacionado à rigidez da estrutura. As misturas asfálticas com módulos de resiliência elevados induzem a altos valores de resistência à tração (RT), devido à concentração de esforços no interior da mistura asfáltica. Segundo Bock et al. (2009) e Mendes e Marques (2012), a relação entre MR e RT indica a compatibilidade entre a rigidez e a resistência à tração da mistura asfáltica. Alguns pesquisadores acreditam que menores valores da relação MR/RT resultem em misturas com maior vida de fadiga. 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.

Diante do exposto, o objetivo dessa pesquisa foi avaliar a vida de fadiga de quatro misturas asfálticas a quente nos seus respectivos teores de projeto de ligante asfáltico, sendo duas enquadradas na faixa granulométrica C e duas na faixa granulométrica B da especificação de serviço ES-031 (DNIT, 2006). Para tanto, foram realizados ensaios de módulo de resiliência, resistência à tração por compressão diametral e fadiga por compressão diametral com tensão controlada (TC) em corpos de prova das quatro misturas asfálticas dosadas segundo os métodos Marshall e Superpave. A análise mecanística-empírica de um pavimento flexível adotado, sob condições específicas de carregamento, foi realizada através do software *me-PADS (Mechanistic Empirical Pavement Analysis and Design Software)*.

B.2 RESULTADOS E DISCUSSÕES

B.2.1 Parâmetros volumétricos das dosagens Marshall e Superpave

Na Tabela 1 são apresentados os parâmetros volumétricos das misturas asfálticas analisadas em seus respectivos teores de projeto de ligante asfáltico, além das propriedades mecânicas de estabilidade e fluência Marshall.

Observa-se que o teor de projeto de ligante asfáltico da mistura asfáltica da faixa granulométrica C obtido pela dosagem Marshall é maior do que o obtido pela dosagem Superpave. 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),

corroborando os achados de Vasconcelos (2004) que também obteve maiores valores de teores de projeto para as misturas dosadas pelo método Superpave.

Tabela 1 – Parâmetros volumétricos e propriedades mecânicas de corpos de prova moldados das misturas asfálticas analisadas.

	Valores de referência ES-031 (DNIT, 2006b)		Mistura asfáltica 1	Mistura asfáltica 2	Mistura asfáltica 3	Mistura asfáltica 4
Método de dosagem	-		Marshall		Superpave	
Faixa granulométrica	C	B	C	B	C	B
Teor de projeto de ligante asfáltico (%)	-		4,70	4,20	4,60	4,85
Vv (%)	3 a 5	4 a 6	4,19	4,49	4,28	4,75
RBV (%)	75 a 82	65 a 72	75,99	70,39	75,14	71,43
VAM (%)	-		15,23	14,71	15,55	16,48
Estabilidade (kgf)	>500		524,45	535,34	867,68	854,93
Fluência (mm)	-		3,50	1,20	4,81	4,70
Massa específica aparente (g/cm ³)	-		2,478	2,480	2,473	2,458
DMT (g/cm ³)	-		2,572	2,593	-	-
Gmm (g/cm ³)	-		-	-	2,588	2,569

Fonte: Os Autores (2019).

É consenso na literatura técnica que o método de dosagem e a energia de compactação influenciam o teor de projeto da mistura asfáltica. Neste estudo, esta assertiva também foi constatada. Porém, os resultados dos ensaios de caracterização volumétrica evidenciaram também que a distribuição granulométrica dos agregados influencia os valores de teor de projeto de ligante asfáltico, consoante com os resultados obtidos por Vasconcelos (2004) quando esta autora afirma que a forma como é determinada a DMT interfere no aumento do teor de projeto, principalmente quando são comparadas misturas contínuas e descontínuas.

Através da análise dos valores dos parâmetros de estabilidade e fluência Marshall apresentados na Tabela 1 percebeu-se uma indicação subjetiva da rigidez da mistura asfáltica, uma vez que valores elevados de estabilidade indicam misturas asfálticas com maiores resistência à deformação permanente. Verificou-se que as misturas asfálticas compactadas por amassamento apresentaram maiores valores de fluência e estabilidade Marshall, fato também observado por Gouveia, Fernandes JR e Soares (2007), que

afirmam que a estabilidade Marshall varia conforme a energia de compactação aplicada, ou seja, maiores energias de compactação foram responsáveis por maiores valores desses parâmetros.

B.2.2 Ensaio de Módulos de Resiliência e Resistências à Tração por Compressão Diametral.

Na Tabela 2, são apresentados os valores médios dos módulos de resiliência (MR) e resistência à tração por compressão diametral (RT) obtidos dos corpos de prova das misturas asfálticas analisadas em função dos teores de projeto de ligante asfáltico, e as respectivas relações MR/RT.

Tabela 2 – Valores médios de módulo de resiliência e resistência à tração por compressão diametral e a relação MR/RT para os corpos de prova das misturas asfálticas analisadas.

	Mistura asfáltica 1	Mistura asfáltica 2	Mistura asfáltica 3	Mistura asfáltica 4
Método de dosagem	Marshall		Superpave	
Faixa granulométrica	C	B	C	B
Teor de projeto de ligante asfáltico (%)	4,70	4,20	4,60	4,85
Módulo de resiliência (MPa)	4.073,00	3.947,00	6.672,89	5.340,22
Resistência à tração (MPa)	1,49	1,33	1,92	1,42
Relação MR / RT	2734	2968	3479	3760

Fonte: Os Autores (2019).

Observa-se na Tabela 2 que, a despeito do fato de as composições asfálticas 1 e 3 apresentarem distribuições granulométricas semelhantes entre si (faixa granulométrica C) e as composições asfálticas 2 e 4 também apresentarem distribuições granulométricas semelhantes entre si (faixa granulométrica B), as misturas asfálticas dosadas pelo método Superpave (composições asfálticas 3 e 4) apresentaram maiores valores de módulo de resiliência, evidenciando que, para as particularidades desta pesquisa, os corpos de prova resultantes da dosagem e compactação Superpave foram mais rígidos do que os corpos de prova dosados pelo método Marshall, para todos os valores do teor de projeto de ligante asfáltico.

Portanto, os valores de módulo de resiliência (MR) das misturas asfálticas avaliadas foram predominantemente influenciados pelo método de compactação, mesmo considerando-se distribuições granulométricas semelhantes. Sendo os resultados médios de MR dos corpos de prova moldados pelo compactador giratório Superpave superiores

(63,8% na faixa granulométrica C e 35,3% na faixa granulométrica B) em relação aos resultados obtidos para os corpos de prova moldados pelo compactador Marshall.

Com relação aos valores de resistência à tração por compressão diametral (RT) das misturas asfálticas analisadas, estas também foram influenciadas fortemente pelo método de compactação, mesmo considerando-se distribuições granulométricas semelhantes. Sendo os valores médios de RT dos corpos de prova moldados pelo compactador giratório Superpave superiores (29% na faixa granulométrica C e 7% na faixa granulométrica B) em relação aos resultados obtidos para os corpos de prova moldados pelo compactador Marshall. Assim, os valores médios de MR/RT dos corpos de prova moldados pelo compactador Superpave resultam 27% superiores (em ambas as faixas granulométricas C e B) em relação aos resultados obtidos para os corpos de prova moldados pelo compactador Marshall.

Como indica a compatibilidade entre rigidez e resistência à tração da mistura asfáltica, esta relação vem sendo usada como um indicador de vida de fadiga, sendo mais desejável um valor pequeno da razão (MR/RT), já que, com frequência, busca-se, baixa rigidez para evitar elevada absorção de tensões que levem ao trincamento prematuro do revestimento, e alta resistência à tração que é associada a uma maior resistência à fadiga.

B.2.3 Ensaios de Fadiga por Compressão Diametral à Tensão Controlada

Na Tabela 3, estão apresentadas as constantes “ k_1 e k_2 ” obtidas na regressão linear das curvas de fadiga para o modelo apresentado na Equação 1 referentes às misturas asfálticas analisadas.

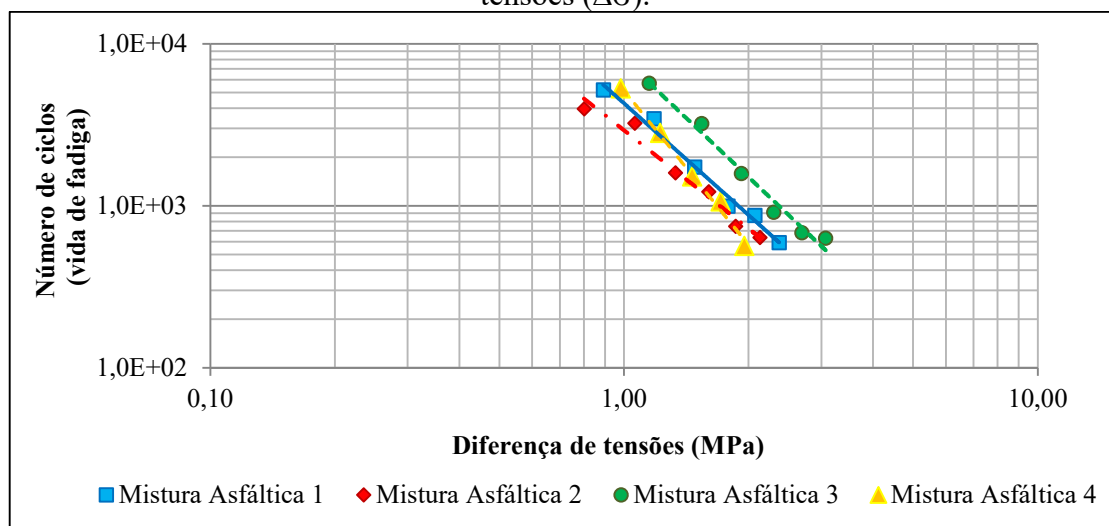
Observa-se que todas as curvas apresentaram boa correlação linear com R^2 acima de 0,96. As curvas correspondentes às composições asfálticas 3 e 4 (dosadas pelo método Superpave) apresentaram maiores inclinações do que aquelas correspondentes às misturas asfálticas dosadas pelo método Marshall (composições asfálticas 1 e 2), sendo que a mistura asfáltica 4 apresentou inclinação da curva de fadiga, 57% acima da curva correspondente à mistura asfáltica 2 (ambas pertencentes à faixa granulométrica B). Isto levou a menores valores de vida de fadiga (VF) quando os corpos de prova da mistura asfáltica 4 foram submetidos a valores de diferenças de tensões ($\Delta\sigma$) maiores, como pode ser observado na Figura 1.

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

		Mistura asfáltica 1	Mistura asfáltica 2	Mistura asfáltica 3	Mistura asfáltica 4
Método de dosagem		Marshall		Superpave	
Faixa granulométrica		C	B	C	B
Teor de projeto de ligante asfáltico (%)		4,70	4,20	4,60	4,85
Constante da regressão linear	K ₁	4292,9	2930,0	8068,1	5153,7
	K ₂	-2,289	-2,017	-2,422	-3,168
R ²		0,984	0,969	0,980	0,992

Fonte: Os Autores (2019).

A Figura 1 apresenta os resultados das curvas de fadiga, expressos em número de repetições *versus* diferença de tensões, para as misturas asfálticas dosadas pelos métodos Marshall e Superpave.

Figura 1 – Curva de fadiga das misturas asfálticas analisadas em função da diferença de tensões ($\Delta\sigma$).

Fonte: Os Autores (2019).

Analisando-se os resultados do ensaio de vida de fadiga através da variação de diferença de tensões ($\Delta\sigma$), percebe-se que as misturas asfálticas dosadas pelo método Superpave (composições asfálticas 3 e 4) apresentaram melhores resultados em relação às misturas dosadas pelo método Marshall (consoante com os resultados de VASCONCELOS, 2004). Considerando o valor da diferença de tensões ($\Delta\sigma$) da ordem de 1,0 MPa as misturas asfálticas 3 e 4 (faixas granulométricas C e B, respectivamente), dosadas pelo método Superpave, apresentaram maiores valores de vida de fadiga (VF), $VF=7 \times 10^3$, e $VF=5 \times 10^3$, respectivamente. Enquanto as misturas asfálticas 1 e 2 (faixas

granulométricas C e B, respectivamente), dosadas pelo método Marshall, apresentaram os menores valores de vida de fadiga (VF), $VF=4 \times 10^3$ e $VF=3 \times 10^3$, respectivamente, para este valor de $\Delta\sigma$. Estes resultados indicam que, para valores baixos de $\Delta\sigma$, o método de dosagem apresenta influência predominante sobre a vida de fadiga (VF) e que a granulometria do agregado também afeta os valores de VF; sendo os maiores valores de VF obtidos para as misturas asfálticas com granulometrias densas dosadas pelo método Superpave.

No entanto, para valores mais altos de $\Delta\sigma$ (2,0 MPa), as misturas asfálticas 3 e 4, dosadas pelo método Superpave, obtiveram o menor e o maior valor de vida de fadiga, em que a mistura asfáltica 4 (faixa granulométrica B) apresentou $VF=5 \times 10^2$ e a mistura asfáltica 3 (faixa granulométrica C) $VF=1,7 \times 10^3$. Enquanto as misturas asfálticas dosadas pelo método Marshall apresentaram valores de vida de fadiga intermediários, obtendo-se para a mistura asfáltica 1 (faixa granulométrica C) $VF=9 \times 10^2$, e para a mistura asfáltica 2 (faixa granulométrica B), $VF=6 \times 10^2$. Donde se verifica que os valores de vida de fadiga (VF) para diferenças de tensões ($\Delta\sigma$) maiores são predominantemente afetados pela distribuição granulométrica das misturas asfálticas independente do método de dosagem empregado. Sendo as granulometrias mais densas (faixa granulométrica C) as que atingem maiores valores de VF em níveis de $\Delta\sigma$ mais altos.

Considerando-se a relação MR/RT, as misturas asfálticas dosadas pelo método Marshall apresentaram valores para esta relação mais próximos do sugerido por Pinheiro, Soares e Leite (2003). Apesar disso, os valores de vida de fadiga (VF) obtidos nos ensaios de fadiga por compressão diametral à tensão controlada com os corpos-de-prova destas misturas asfálticas não se mostraram superiores aos obtidos com os corpos de prova para as misturas asfálticas dosadas pelo método Superpave, cujos valores da relação MR/RT foram superiores em aproximadamente 27% aos valores encontrados para os corpos de provas das misturas asfálticas dosadas pelo método Marshall.

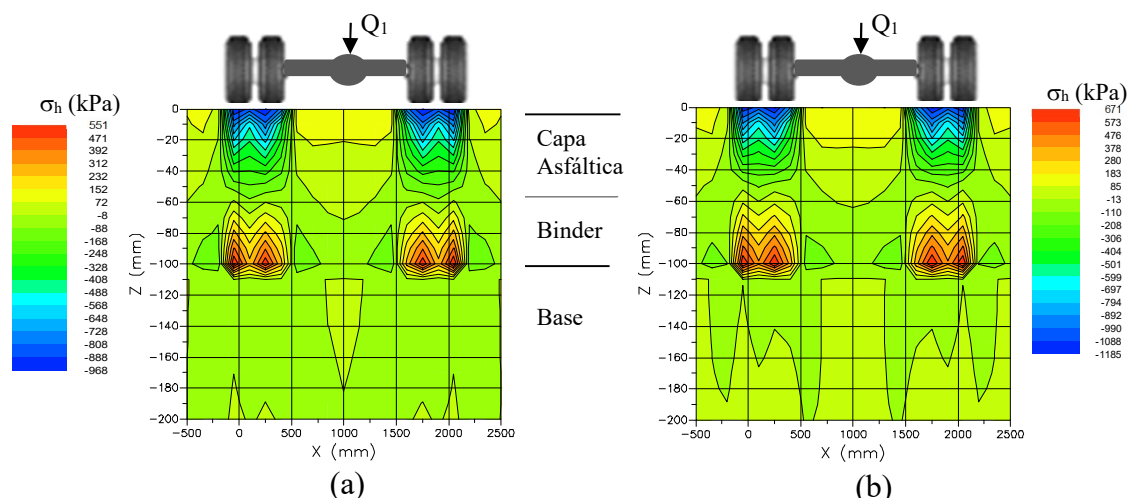
Estudos indicam que o método de compactação influencia a vida de fadiga das misturas asfálticas. Nesta pesquisa, os corpos de prova ensaiados foram compactados de acordo com as recomendações: da norma R 35 (AASHTO, 2014) para o método Superpave – considerando o nível de tráfego de projeto adotado (correspondente a vias principais, de tráfego médio a alto), com 100 giros do compactador Superpave para as misturas asfálticas 3 e 4; da especificação D6926 (ASTM, 2016) para o método Marshall – com 75 golpes do compactador por impacto para as misturas 1 e 2, para todos os níveis de tráfego.

Com isso, verifica-se que o método Superpave apresentou melhores resultados de vida de fadiga para as misturas asfálticas com granulometrias mais densas (VASCONCELOS, 2004), o que indica que granulometrias mais grossas exigem maior energia de compactação para promover o rearranjo das partículas dos agregados. Na mistura asfáltica 3, em que há uma combinação do método de compactação por amassamento com a granulometria mais densa da mistura asfáltica – que proporciona o aumento das forças de fricção interna entre as partículas dos agregados (MELO; TRICHÊS, 2016) – obteve-se maior valor de vida de fadiga (VF).

B.2.4 Análise Estrutural do Pavimento Flexível Adotado

Na Figura 2 são apresentadas as tensões horizontais (σ_h) que atuam na estrutura do pavimento flexível adotado, considerando as misturas asfálticas dosadas no teor de projeto de ligante asfáltico pelos métodos Marshall (Figura 2a) e Superpave (Figura 2b), para o carregamento de 80 kN por eixo e pressão de enchimento do pneus de 563 kPa.

Figura 2– Tensões horizontais (σ_h) na estrutura do pavimento flexível adotado.



Fonte: Os Autores (2019).

Observa-se que as maiores tensões horizontais de tração (σ_h) estão na fibra inferior da camada de binder, posição (x) correspondente às maiores tensões horizontais de compressão (σ_h) na capa asfáltica, que estão concentradas sob os pontos de aplicação de carga (pontos sob os pneus). Assim, as análises estruturais do pavimento flexível adotado foram realizadas considerando as tensões e deslocamentos nestes pontos.

Na Tabela 4 são apresentadas as maiores tensões horizontais (σ_h) na fibra inferior das camadas asfálticas em função do método de dosagem, da variação do carregamento dos eixos e do teor de ligante asfáltico das misturas asfálticas analisadas.

Tabela 4 – Tensões horizontais (σ_h) atuantes na fibra inferior das camadas asfálticas, na posição $x=0\text{mm}$, em função dos níveis de carregamento adotados, para as misturas asfálticas dosadas pelo método Marshall e Superpave.

Método de dosagem	Q _{eixo} (kN)	P _{pneus} (kPa)	Faixa Granul.	T _{Asf} (%)	σ_h (MPa)	Faixa Granul.	T _{Asf} (%)	σ_h (MPa)
Marshall	80	563	C	4,7	-0,160	B	4,2	0,628
	98	633			-0,194			0,726
	118	703			-0,229			0,827
Superpave	80	563		4,6	-0,085		4,85	0,755
	98	633			-0,107			0,881
	118	703			-0,132			1,012

Observação: (-) compressão e (+) tração

T_{Asf}: Teor de asfalto

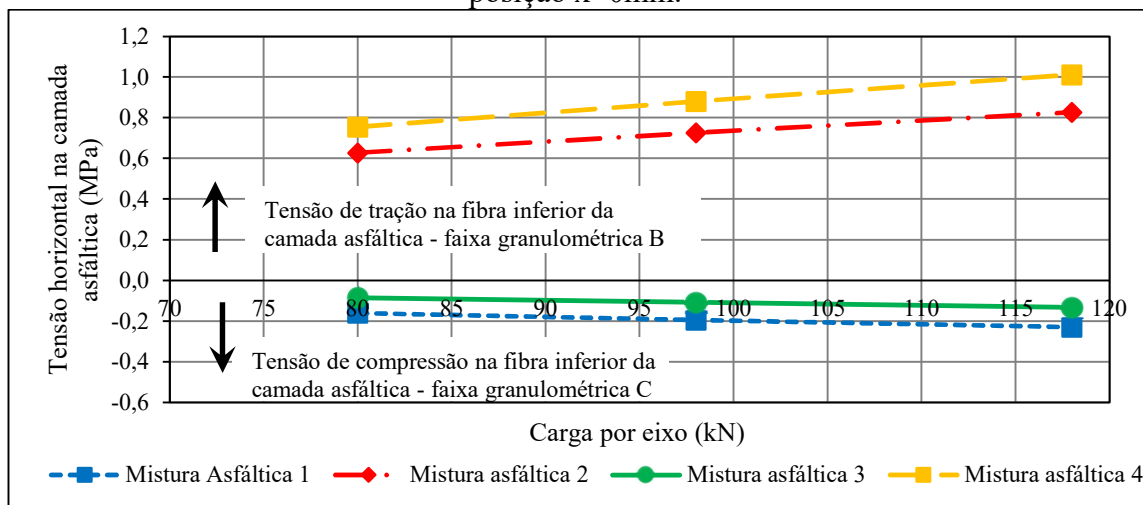
Fonte: Os Autores (2019).

Ao analisar as tensões horizontais (σ_h) que ocorrem na fibra inferior da capa asfáltica, obtidas pelo software *me-PADS*, 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 todos os carregamentos analisados apresentam valores inferiores aos encontrados para a resistência à tração por compressão diametral para os corpos de prova das misturas asfálticas dosadas pelos métodos utilizados em seus respectivos teores de projeto de ligante asfáltico, em que se observam tensões de 1,33 MPa para as misturas asfálticas dosadas pelo método Marshall e 1,42 MPa para as misturas asfálticas dosadas pelo método Superpave.

A Figura 3 apresenta uma representação gráfica da variação das tensões horizontais (σ_h) (apresentadas na Tabela 4) atuantes nas fibras inferiores das camadas asfálticas do pavimento flexível adotado, dosadas pelos métodos Marshall e Superpave, em função dos carregamentos adotados.

Figura 3 – Tensões horizontais (σ_h) atuantes na fibra inferior das camadas asfálticas do pavimento flexível analisado em função dos níveis de carregamento adotados, na posição $x=0\text{mm}$.



Fonte: Os Autores (2019).

Verifica-se, na Figura 3, que as tensões horizontais de tração atuantes na fibra inferior da camada do binder (faixa granulométrica B) do pavimento flexível adotado, cuja mistura asfáltica foi dosada pelo método Superpave são maiores (18% em média) do que as obtidas para a mistura asfáltica dosada pelo método Marshall, para todos os níveis de carregamento analisados, evidenciando o efeito do processo de compactação por amassamento que promove o rearranjo das partículas dos agregados tornando a estrutura da mistura asfáltica mais rígida.

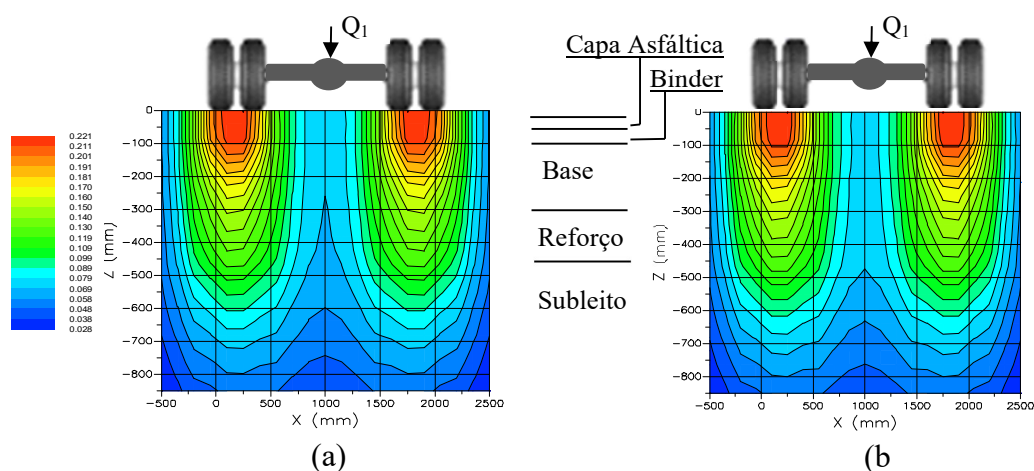
Já para as misturas asfálticas da faixa granulométrica C, as tensões horizontais de compressão obtidas para a mistura asfáltica dosada pelo método Marshall são maiores (45% em média) do que as obtidas para a mistura asfáltica dosada pelo método Superpave.

Esta diferença na resposta da estrutura dos pavimentos adotados está relacionada ao fato de que: por apresentarem módulo de resiliência inferiores às misturas asfálticas dosadas pelo método Superpave, as misturas asfálticas dosadas pelo método Marshall se mostram mais flexíveis do que as dosadas pelo método Superpave, de modo que as tensões concentradas no bordo inferior da capa asfáltica dissipam-se numa pequena área de influência em torno do ponto de concentração; enquanto as camadas correspondentes às misturas asfálticas dosadas pelo método Superpave, por apresentarem valores mais altos de módulo de resiliência, mostram-se mais rígidas, o que faz com que as tensões horizontais de tração se distribuam numa área maior. Isso se deve à diferença entre os processos de compactação empregados nos dois métodos estudados – Marshall (compactação por impacto) e Superpave (compactação por amassamento). Portanto, as

camadas asfálticas modeladas a partir das misturas asfálticas obtidas com o método Marshall apresentam maior concentração de tensão nos pontos de aplicação de carga.

Na Figura 4 são apresentados os valores de deflexões verticais recuperáveis previstas na estrutura do pavimento flexível analisado, para o carregamento de 80 kN por eixo e pressão de enchimento dos pneus de 563 kPa. A Figura 4a apresenta as deflexões verticais para as misturas asfálticas dosadas pelo método Marshall e a Figura 4b as deflexões verticais para as misturas asfálticas dosadas pelo método Superpave.

Figura 4 – Deflexões verticais (δz) na estrutura do pavimento flexível analisado para o carregamento por eixo de 80 kN: (a) Mistura asfáltica dosada pelo método Marshall e (b) Mistura asfáltica dosada pelo método Superpave.



Fonte: Os Autores (2019).

É possível verificar na Figura 4 que as maiores deflexões verticais recuperáveis ocorrem nas camadas asfálticas (capa asfáltica e binder) de maneira similar para ambos os métodos de dosagem analisados, sendo as deflexões apresentadas na camada asfáltica dosada pelo método Marshall, para o carregamento representado, superiores às da camada asfáltica dosada pelo método Superpave em cerca de 10%, o que evidencia a maior flexibilidade da camada asfáltica dosada pelo método Marshall, como pode ser observado na Tabela 5.

As deflexões verticais recuperáveis máximas no topo da camada asfáltica do pavimento flexível adotado para cada um dos carregamentos analisados estão apresentadas na Tabela 5, em que as estruturas dos pavimentos estão representadas por camadas asfálticas dosadas pelos métodos Marshall e Superpave.

Tabela 5 – Valores de deflexões verticais recuperáveis máximas no topo da camada asfáltica do pavimento flexível analisado.

Método de dosagem	Teor de asfalto (%) (FG – C)	Teor de asfalto (%) (FG – B)	Carga por eixo (kN)	Pressão de enchimento (kPa)	Deflexão recuperável (0,01 mm)
Marshall	4,7	4,2	80	563	21,50
			98	633	26,10
			118	703	31,30
Superpave	4,6	4,85	80	563	19,70
			98	633	24,00
			118	703	28,80

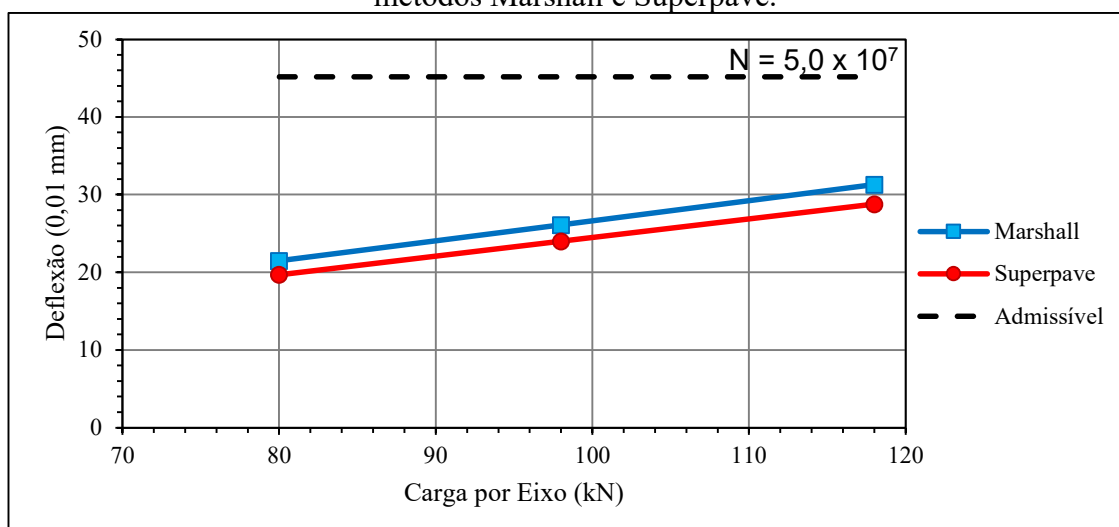
Observação: FG = faixa granulométrica

Fonte: Os Autores (2019).

Para a avaliação dos valores de deflexões máximas apresentadas na Tabela 5, foram calculadas as deflexões admissíveis, segundo o procedimento PRO-011 (DNER, 1979), para um tráfego pesado ($N=5 \times 10^7$), de acordo com DNIT (2006). A deflexão admissível calculada para este nível de tráfego é de 45,18x0,01 mm e está representada pela linha tracejada apresentada na Figura 8.

Observa-se, na Figura 5, que as deflexões verticais (δz) recuperáveis máximas para o pavimento flexível adotado, em que as misturas asfálticas foram dosadas pelos métodos Marshall e Superpave, apresentam valores de deflexões máximas inferiores aos valores das deflexões admissíveis determinadas para o nível de tráfego pesado, de acordo com DNIT (2006).

Figura 5 – Deflexões verticais máximas na estrutura do pavimento flexível analisado em função dos carregamentos adotados para as misturas asfálticas dosadas pelos métodos Marshall e Superpave.



Fonte: Os Autores (2019).

Analisando-se os valores de deflexões apresentados na Tabela 5 e representados na Figura 5, é possível observar que os valores das deflexões máximas medidas na superfície do pavimento flexível adotado, cujas misturas asfálticas foram dosadas pelo método Marshall são maiores (em média 8%) do que os valores das deflexões máximas medidas na superfície do pavimento flexível adotado, cujas misturas asfálticas foram dosadas pelo método Superpave, o que evidencia o efeito das misturas asfálticas dosadas pelo método Superpave por serem mais rígidas (maior valor de módulo de resiliência – Tabela 2) quando comparadas às misturas asfálticas dosadas pelo método Marshall.

Conhecidos os níveis de tensões atuantes no pavimento flexível adotado, através das análises estruturais realizadas com o software *me-PADS*, para cada nível de carregamento adotado, determinou-se a vida de fadiga da estrutura do pavimento flexível adotado em função das misturas asfálticas dosadas pelos métodos Marshall e Superpave e das faixas granulométricas C e B da especificação de serviço ES-031 (DNIT, 2006), cujos valores estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Valores de vida de fadiga das camadas asfálticas do pavimento flexível analisado em função dos carregamentos adotados no software *me-PADS*.

Mistura asfáltica	Método de dosagem	FG ⁽¹⁾	T _{Asf} (%)	Q _{eixo} (kN)	σ_h ⁽²⁾ (MPa)	σ_v ⁽²⁾ (MPa)	$\Delta\sigma$ ⁽³⁾ (MPa)	Vida de Fadiga
1	Marshall	C	4,7	80	-0,160	-0,411	0,250	1,02 x 10 ⁵
				98	-0,194	-0,466	0,272	8,42 x 10 ⁴
				118	-0,229	-0,522	0,293	7,13 x 10 ⁴
2		B	4,2	80	0,628	-0,194	0,822	4,36 x 10 ³
				98	0,726	-0,231	0,957	3,20 x 10 ³
				118	0,827	-0,270	1,097	2,43 x 10 ³
3	Superpave	C	4,6	80	-0,085	-0,388	0,303	1,45 x 10 ⁵
				98	-0,107	-0,441	0,334	1,15 x 10 ⁵
				118	-0,132	-0,494	0,362	9,45 x 10 ⁴
4		B	4,85	80	0,755	-0,165	0,920	6,72 x 10 ³
				98	0,881	-0,197	1,078	4,06 x 10 ³
				118	1,012	-0,231	1,244	2,58 x 10 ³

⁽¹⁾FG: faixa granulométrica

⁽²⁾ σ : (-) compressão e (+) tração

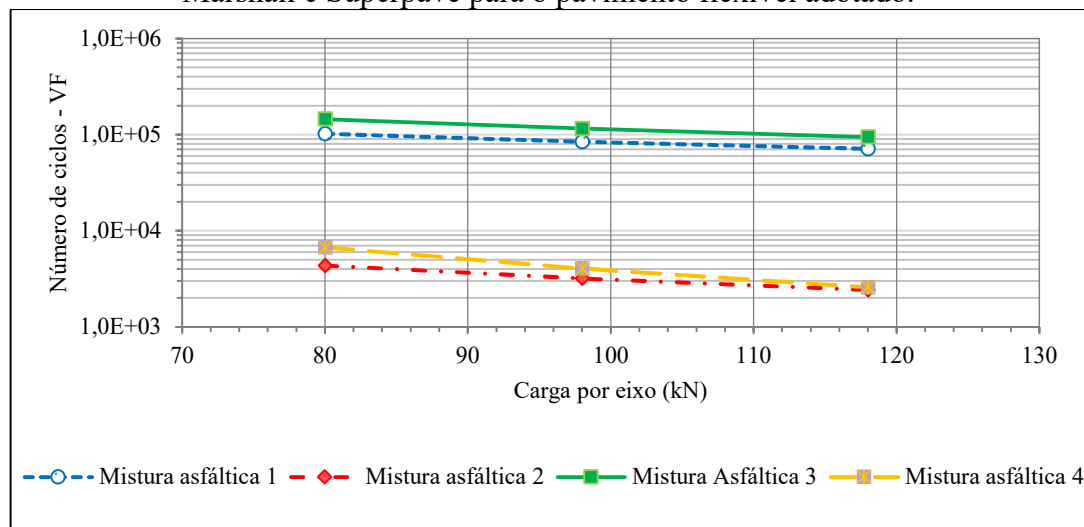
⁽³⁾ $\Delta\sigma$: diferença de tensões = $\sigma_h - \sigma_v$

T_{Asf}: Teor de asfalto

Fonte: Os Autores (2019).

As respostas estruturais determinadas evidenciam que, em função das cargas por eixo adotadas, as misturas asfálticas dosadas pelo método Superpave apresentam vidas de fadiga superiores às das misturas asfálticas dosadas pelo método Marshall (Figura 6).

Figura 6 – Valores de vida de fadiga das misturas asfálticas dosadas pelos métodos Marshall e Superpave para o pavimento flexível adotado.



Fonte: Os Autores (2019).

Analisando-se a Figura 6, evidencia-se que, para os níveis de carregamento adotados, os valores de vida de fadiga obtidos quando o pavimento flexível foi analisado considerando os parâmetros das misturas asfálticas dosadas pelo método Superpave (misturas asfálticas 3 e 4 – faixas granulométricas C e B, respectivamente) foram maiores do que quando o mesmo pavimento flexível foi analisado em função dos parâmetros das misturas asfálticas dosadas pelo método Marshall (misturas asfálticas 1 e 2 – faixas granulométricas C e B, respectivamente). Estes resultados coadunam com os valores de módulo de resiliência (Tabela 2) e de curvas de fadiga obtidos para as misturas asfálticas analisadas (Figura 1), uma vez que as misturas asfálticas dosadas pelo método Superpave apresentaram-se mais rígidas, com gradiente de tensões mais distribuídos, cujos valores de Diferenças de Tensões ($\Delta\sigma$ - Tabela 6) são da ordem de 1,0 MPa ou inferiores.

Da análise destes resultados, obtém-se que o método de dosagem apresenta influência predominante sobre a vida de fadiga (VF) e que a granulometria do agregado também afeta os valores de VF; sendo os maiores valores de VF obtidos para as misturas asfálticas com granulometrias densas dosadas pelo método Superpave – mistura asfáltica 3.

B.3 CONCLUSÕES

Dos resultados obtidos nesta pesquisa conclui-se que as misturas asfálticas dosadas pelo método Superpave apresentam melhor desempenho em fadiga do que as misturas

asfálticas dosadas pelo método Marshall, o que foi evidenciado pelos ensaios de fadiga por compressão diametral à tensão controlada e ratificado pelas análises estruturais no software *me-PADS*.

Além disso, pode se ressaltar que ao serem combinados os seguintes fatores: método de dosagem Superpave, adequados teores de projeto de ligante asfáltico e agregados de granulometria mais densa – obtêm-se misturas asfálticas com melhores resultados de vida em fadiga, ou seja, maior durabilidade.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALATAS, T.; YILMAZ, M.; KÖK, B.V.; KORAL, A.F. Comparison of permanent deformation and fatigue resistance of hot mix asphalts prepared with the same performance grade binders. **Construction and Building Materials**. v. 30, p. 66–72, 2012.

AL-QADI, I.L.; NASSAR, W.N. Fatigue shift factors to predict HMA performance. **The International Journal of Pavement Engineering**. v. 4, p. 69-75, 2003

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

ARABANI, M.; MIRABDOLAZIMI, S.M.. Experimental investigation of the fatigue behaviour of asphalt concrete mixtures containing waste iron powder. **Materials Science and Engineering A**. p. 3866–3870, 2011.

ASTM D6926-16, Standard Practice for Preparation of Asphalt Mixture Specimens Using Marshall Apparatus, **ASTM International**, West Conshohocken, PA, 2016.

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.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **PRO-011**: Avaliação estrutural dos pavimentos flexíveis. Procedimento de ensaio. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Rio de Janeiro. 1979. 16 p.

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

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. Background of SUPERPAVE asphalt mixture design and analysis. **FHWA-AS-95-003**. 1995. 160 p.

FRITZEN, M.A. e MOTTA, L.M.G., Enfoque do desenvolvimento e validação da função de transferência para previsão do dano por fadiga de misturas asfálticas. **22º Encontro de Asfalto**. Rio de Janeiro. Brasil. 2016. 11 p.

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

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.

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.

LEITE, L.F.M.; MOTTA, L.M.G.; BERNUCCI, L.B. e 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. 2000. Pp. 309-318.

LOUREIRO, T.G.; SOARES, J.B. e MOTTA, L.M.G., Estudo sobre o dano progressivo em misturas asfálticas no ensaio de fadiga à compressão diametral. **XVII Congresso de Ensino e Pesquisa em Transportes**, ANPET, Rio de Janeiro. 2003. 12 p.

MASHAAN, N.S.; KARIM, M.R.; AZIZ, M.A.; IBRAHIM, M.R.; KATMAN, H.Y.; KOTING, S. Evaluation of fatigue life of CRM-reinforced SMA and its relationship to dynamic stiffness. Hindawi Publishing Corporation. **The Scientific World Journal**. v. 2014, 2014. 11 p.

MEDINA, J.; MOTTA, L.M.G., **Mecânica dos Pavimentos**. 3^a ed., Editora Interciência, Rio de Janeiro – RJ, 2015, 620 p.

MELO, J. V. S.; TRICHÊS, G. Evaluation of rheological behavior and performance to permanent deformation of nanomodified asphalt mixtures with carbon nanotubes. **Canadian Journal of Civil Engineering**. v. 43. p. 472-479, 2016.

MOGHADDAM, T. B.; KARIM, M. R.; ABDELAZIZ, M. A review on fatigue and rutting performance of asphalt mixes. **Scientific Research and Essays**. v. 6, n. 4, p. 670-682, 2011.

PÉREZ-JIMÉNEZ, F.; MARTÍNEZ, A.H.; MIRÓ, R.; HERNÁNDEZ-BARRERA, D.; ARAYA-ZAMORANO, L. Effect of compaction temperature and procedure on the design of asphalt mixtures using Marshall and gyratory compactors. **Construction and Building Materials**. n. 65, 2014, p. 264-269.

PINHEIRO, J.H.M., SOARES, J.B. e 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. 2003. p 116-129.

STRATEGIC HIGHWAY RESEARCH PROGRAM. The Superpave Mix Design Manual for New Construction and Overlays. **SHRP-A-407**. Washington, DC. National Research Council. 1994, 172 p.

VASCONCELOS, K.L. Comportamento mecânico de misturas asfálticas à quente dosadas pelas metodologias Marshall e Superpave com diferentes granulometrias. 2004. 149 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2004.

WU, B.; LIU, L.; SUN L. Analysis of parameters affecting asphalt mixture performance and new perspectives on the design parameters. **Construction and Building Materials**. v. 174 p. 625–632. 2018.

APÊNDICE C - DEFORMAÇÃO PERMANENTE DE MISTURAS ASFÁLTICAS A QUENTE DOSADAS PELOS MÉTODOS MARSHALL E SUPERPAVE.

RESUMO

O objetivo principal desta pesquisa foi avaliar a influência de diferentes métodos de dosagem sobre a deformação permanente de quatro misturas asfálticas a quente. O programa experimental desenvolvido, quanto aos materiais, foi composto por um ligante asfáltico (CAP 50/70), uma composição de agregados minerais de origem gnáissica. Em relação aos procedimentos, utilizou-se dos métodos de dosagem pelo Marshall e Superpave, para as misturas asfálticas, ensaios de módulo de resiliência e creep estático. Os resultados dos ensaios de creep estático demonstraram que os corpos de prova de misturas asfálticas dosadas método de dosagem Marshall apresentaram valores superiores de deformações permanentes. No entanto, os corpos de prova de misturas asfálticas dosadas pelo método Superpave apresentaram maior percentual de deformação recuperável. A partir dos resultados obtidos, concluiu-se que a granulometria dos agregados minerais e o método de dosagem para misturas asfálticas têm influência significativa na deformação permanente, uma vez que estes fatores interferem nos valores do teor de projeto de ligante asfáltico e do módulo de resiliência.

Palavras-chaves: Misturas asfálticas densas. Ensaio mecânicos de laboratório. Métodos de dosagem Marshall. Método de dosagem Superpave.

CHARACTERIZATION OF THE PERMANENT DEFORMATION OF HOT ASPHALT MIXTURES MADE BY MARSHALL AND SUPERPAVE METHODS.

ABSTRACT

The main objective of this research was to evaluate the influence of different dosage methods on the permanent deformation of four hot asphalt mixtures. The experimental program developed, regarding the materials, was composed of an asphalt binder (CAP 50/70), a composition of mineral aggregates of gneissic origin. Regarding the procedures, the Marshall and Superpave dosage methods were used for the asphalt mixtures, resilience module and static creep tests. The results of the static creep tests showed that the specimens of asphalt mixtures dosed by the Marshall dosing method showed higher values of permanent deformations. However, the asphalt mix test specimens dosed by the Superpave method showed a higher percentage of recoverable deformation. From the results obtained, it was concluded that the granulometry of the mineral aggregates and the dosage method for asphalt mixtures have a significant influence on the permanent deformation, since these factors interfere with the values of the asphalt binder design content and the resilience modulus.

Keywords: Dense asphalt mixtures. Mechanical laboratory testing. Marshall dosage methods. Superpave dosage methods

C.1 INTRODUÇÃO

A deformação permanente é considerada uma das principais patologias de deterioração dos pavimentos asfálticos, causando o comprometimento prematuro do desempenho dessa estrutura (KHIAMI; MANSOORI, 2017). A formação destas depressões excessivas nas trilhas de rodas está conectada com o processo de acúmulo de deformações na camada asfáltica resultante de carregamentos dinâmicos provenientes do tráfego de veículos (RADZISZEWSKI, 2007, SAID; HAKIM, 2016). A progressão destas depressões pode levar a trincamentos, grandes falhas estruturais e acidentes devidos a hidroplanagem de veículos (SARKAR, 2017). A deformação permanente em um revestimento asfáltico é causada por dois mecanismos: (i) densificação, que é uma diminuição no volume e aumento na densidade de uma camada asfáltica, e (ii) deformação por cisalhamento com formação de ondulações, que são deslocamentos de materiais causados pelas tensões de cisalhamento (SAID et al., 2011; SARKAR, 2017).

A deformação permanente é definida como o acúmulo progressivo da deformação de cada camada da estrutura do pavimento flexível sob carregamento de tráfego repetido, no entanto, a camada asfáltica tem papel fundamental em sua magnitude (KHODAI; MEHRARA, 2009).

Segundo Said e Hakim (2016) e Al-Humeidawi (2016), existem três fatores principais que provocam a ocorrência de deformação permanente em pavimentos asfálticos: (i) condição climática; (ii) solicitações do tráfego e (iii) estrutura do pavimento. No aspecto condição climática, a temperatura tem um efeito significativo sobre a deformação da camada asfáltica do pavimento flexível, sendo que o aumento da temperatura eleva a possibilidade de ocorrência destas deformações plásticas (KATMAN et al., 2015). Da mesma forma, o aumento do número de solicitações do tráfego pode levar a um acréscimo na deformação permanente (AHAMAD et al., 2015).

As misturas asfálticas a quente são caracterizadas como materiais suscetíveis ao tempo de carregamento, temperatura e tensão, devido a sua natureza viscoelástica (HUSSAN et al., 2017). Estas misturas asfálticas tornam-se viscosas a alta tensão, tempo de carregamento longo (tráfego lento) e condições de alta temperatura, enquanto que o comportamento elástico se dá a baixas tensões, curto tempo de carregamento (tráfego lento) e condições de baixas temperaturas. Portanto, a deformação permanente de misturas asfálticas está associada à deformação plástica na faixa de deformação não linear. Este comportamento depende do tempo e das tensões aplicadas, podendo ser

observado apenas no estudo do comportamento de fluência das misturas asfálticas (AL-QADI et al., 2009).

Como as misturas asfálticas são materiais viscoelásticos, segundo Mansoori e Khiavi (2017), é importante utilizar a função fluência ou deformação total (D_t) para as análises que envolvam a relação tensão-deformação (CHRISTENSEN, 2003; MOURA et al., 2009).

Para Melo e Trichês (2016), a deformação permanente de uma mistura asfáltica pode ser considerada como a ocorrência simultânea de deformação viscosa do ligante asfáltico e deformação plástica da estrutura mineral da mistura asfáltica. Segundo estes autores, o ligante asfáltico e o agregado exercem papel fundamental no comportamento mecânico de misturas asfálticas: o ligante asfáltico, como resultado de sua consistência e reologia e o agregado em decorrência das forças de fricção interna entre suas partículas.

A deformação permanente, segundo Ahlrich (1996), Stakton e Bahia (2003) e Abo-Qudais e Al-Shweily (2007), é altamente dependente da distribuição granulométrica do agregado e do método de dosagem da mistura asfáltica, destacando-se como uma das causas destas deformações a granulometria inadequada. Segundo Golalipour et al. (2012), o intertravamento entre as partículas dos agregados tem um papel fundamental na formação do esqueleto pétreo das misturas asfálticas. Consequentemente, misturas asfálticas com granulometrias mais grossas apresentam deformações permanentes maiores que as misturas asfálticas com granulometrias densas e estas também apresentam maiores resistências mecânicas à ruptura plástica.

De acordo com Domingos, Faxina e Bernucci (2017), a deformação permanente ou *rutting* na nomenclatura norte-americana é um fenômeno, que ocorre nas camadas superficiais do pavimento, provocado pelo acúmulo de deformação plástica resultante da aplicação repetida das cargas do tráfego. Embora a resistência à deformação permanente de um pavimento seja influenciada primeiramente pelo arranjo do esqueleto pétreo da mistura asfáltica, as propriedades viscoelásticas do ligante asfáltico também são importantes (MOGHDDAM; SOLTANI; KARIM, 2014).

Vasconcelos (2004), ao realizar a dosagem de misturas asfálticas com diferentes granulometrias através das metodologias Marshall e Superpave, obteve valores de teores de projeto de ligante asfáltico superiores para as dosagens Superpave para todas as misturas analisadas. A autora investigou os parâmetros que influenciaram estes resultados, atribuindo o aumento no teor de projeto de ligante asfáltico à forma como a Densidade Máxima Teórica (DMT) foi determinada, através da ponderação das

densidades reais dos materiais constituintes (sendo influenciadas, principalmente, pela granulometria da mistura, quando comparadas misturas contínuas e descontínuas), bem como ao processo de compactação empregado.

De acordo com Onofre (2013), os ligantes asfálticos que apresentam maiores resistências à penetração (maiores consistências) tendem a gerar misturas asfálticas mais resistentes com relação à deformação permanente.

Diversas pesquisas mostram uma grande preocupação com o desempenho de misturas asfálticas quanto à deformação permanente em campo. Neste sentido, os ensaios laboratoriais são aliados importantes para avaliar a resistência à deformação permanente de misturas asfálticas (XU et al., 2014, SARKAR, 2017, KIM; KIM, 2017). Para tanto, existem diferentes ensaios, como o ensaio de fluência estática (creep estático) e dinâmica (creep dinâmico e Flow Number).

Gouveia, Fernandes JR e Soares (2007) realizaram ensaios de caracterização volumétrica e mecânica de misturas asfálticas e concluíram que a estabilidade Marshall varia conforme a energia de compactação aplicada, ou seja, maiores energias de compactação foram responsáveis por maiores valores desses parâmetros. Além disso, esses autores afirmam que os fatores mais significativos na determinação do módulo de resiliência de uma mistura asfáltica são os seguintes, por ordem de influência: temperatura de ensaio, viscosidade, teor de ligante e tipo de compactação.

Diante do exposto, o objetivo principal desta pesquisa é avaliar a influência de diferentes métodos de dosagem sobre a deformação permanente de misturas asfálticas a quente. Para tanto, foram realizados ensaios de creep estático em corpos de prova de quatro misturas asfálticas dosadas e compactadas segundo os métodos Marshall e Superpave.

C.2 RESULTADOS E DISCUSSÕES

C.2.1 Parâmetros Volumétricos das Dosagens Marshall e Superpave

Na Tabela 1, são apresentados os parâmetros volumétricos das misturas asfálticas analisadas em seus respectivos teores de projeto de ligante asfáltico, além das propriedades mecânicas de Estabilidade e Fluência Marshall.

Observou-se que o teor de projeto de ligante asfáltico da mistura asfáltica da faixa granulométrica C obtido pela dosagem Marshall é maior do que o obtido pela dosagem Superpave. Já para as misturas asfálticas que se enquadraram na faixa granulométrica B, o teor de projeto 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).

Tabela 1 – Parâmetros volumétricos e propriedades mecânicas de corpos de prova das misturas asfálticas analisadas.

	Valores de referência ES-031 (DNIT, 2006)		Mistura asfáltica 1	Mistura asfáltica 2	Mistura asfáltica 3	Mistura asfáltica 4
	C	B	C	B	C	B
Método de dosagem	-		Marshall		Superpave	
Faixa granulométrica	C	B	C	B	C	B
Teor de projeto de ligante asfáltico (%)			4,70	4,20	4,60	4,85
Vv (%)	3 a 5	4 a 6	4,19	4,49	4,28	4,75
RBV (%)	75 a 82	65 a 72	75,99	70,39	75,14	71,43
VAM (%)	-		15,23	14,71	15,55	16,48
Estabilidade (kgf)	>500		524,45	535,34	867,68	854,93
Fluência (mm)	-		3,50	1,20	4,81	4,70
Massa específica aparente (g/cm ³)	-		2,478	2,480	2,473	2,458
DMT (g/cm ³)	-		2,572	2,593	-	-
Gmm (g/cm ³)	-		-	-	2,588	2,569

Fonte: Os Autores (2019).

Porém, os resultados dos ensaios de caracterização volumétrica evidenciaram também que a distribuição granulométrica dos agregados influencia os valores de teor de projeto de ligante asfáltico.

Através da análise dos valores dos parâmetros de estabilidade e fluência Marshall apresentados na Tabela 1, percebeu-se uma tendência à rigidez das misturas asfálticas dosadas pelo método Superpave para as faixas granulométricas analisadas, uma vez que valores elevados de estabilidade indicam misturas asfálticas com maiores resistências à deformação permanente. Verificou-se que as misturas asfálticas compactadas por amassamento apresentaram maiores valores de fluência e estabilidade Marshall, fato também observado por Gouveia, Fernandes JR e Soares (2007), que afirmam que a estabilidade Marshall varia conforme a energia de compactação aplicada, ou seja, maiores energias de compactação foram responsáveis por maiores valores desse parâmetro.

C.2.2 Ensaio de Módulo de Resiliência

Na Tabela 2, são apresentados os valores médios dos módulos de resiliência determinados para os corpos de prova de misturas asfálticas em função de seus respectivos teores de projeto de ligante asfáltico.

Tabela 2 – Valores médios de módulo de resiliência em função do teor de ligante asfáltico.

	Mistura Asfáltica 1	Mistura Asfáltica 2	Mistura Asfáltica 3	Mistura Asfáltica 4
Método de dosagem	Marshall		Superpave	
Faixa granulométrica	C	B	C	B
Teor de projeto de ligante asfáltico (%)	4,70	4,20	4,60	4,85
Módulo de resiliência (MPa)	4.073,00	3.947,00	6.672,89	5.340,22

Fonte: Os Autores (2019).

Observou-se que, a despeito do fato de as misturas asfálticas 1 e 3 apresentarem distribuições granulométricas semelhantes entre si (faixa granulométrica C), e as misturas asfálticas 2 e 4 também apresentarem distribuições granulométricas semelhantes entre si (faixa granulométrica B), percebeu-se que as misturas asfálticas dosadas pelo método Superpave (misturas asfálticas 3 e 4) apresentaram maiores valores médios de módulo de resiliência, evidenciando que, para as particularidades desta pesquisa, os corpos de prova resultantes da dosagem e compactação Superpave foram mais rígidos do que os corpos de prova dosados pelo método Marshall, para todos os valores do teor de projeto de ligante asfáltico.

Portanto, os valores de módulo de resiliência (MR) das misturas asfálticas avaliadas foram predominantemente influenciados pelo método de compactação, mesmo considerando-se distribuições granulométricas semelhantes. Sendo os resultados médios de MR dos corpos de prova moldados pelo compactador giratório Superpave superiores (63,8% na faixa granulométrica C e 35,3% na faixa granulométrica B) em relação aos resultados obtidos para os corpos de prova moldados pelo compactador Marshall.

C.2.3 Ensaios de Creep Estático

Na Tabela 3, são apresentados os valores médios dos parâmetros do ensaio de creep estático obtidos para os dos corpos de prova das misturas asfálticas analisadas e dosadas pelos métodos Marshall e Superpave para as faixas granulométricas C e B da especificação de serviço ES-031 (DNIT, 2006).

Tabela 3 – Valores médios dos parâmetros do ensaio de creep estático para os corpos de prova das misturas asfálticas analisadas.

	Mistura asfáltica 1	Mistura asfáltica 2	Mistura asfáltica 3	Mistura asfáltica 4
Método de dosagem	Marshall		Superpave	
Faixa granulométrica	C	B	C	B
Teor de projeto de ligante asfáltico (%)	4,70	4,20	4,60	4,85
Tempo do ensaio (segundo)	4500			
Deslocamento plástico máximo (mm)	0,3443	0,5345	0,0923	0,1143
Deformação plástica específica máxima (mm/mm)	0,0092	0,0143	0,0020	0,0025
Deslocamento plástico final (mm)	0,2923	0,4730	0,0683	0,0967
Deformação plástica específica final (mm/mm)	0,0078	0,0126	0,0015	0,0021
Deformação permanente (%)	84,82	88,32	74,08	84,43
Deformação recuperável (%)	15,18	11,68	25,92	15,57

Fonte: Os Autores (2019).

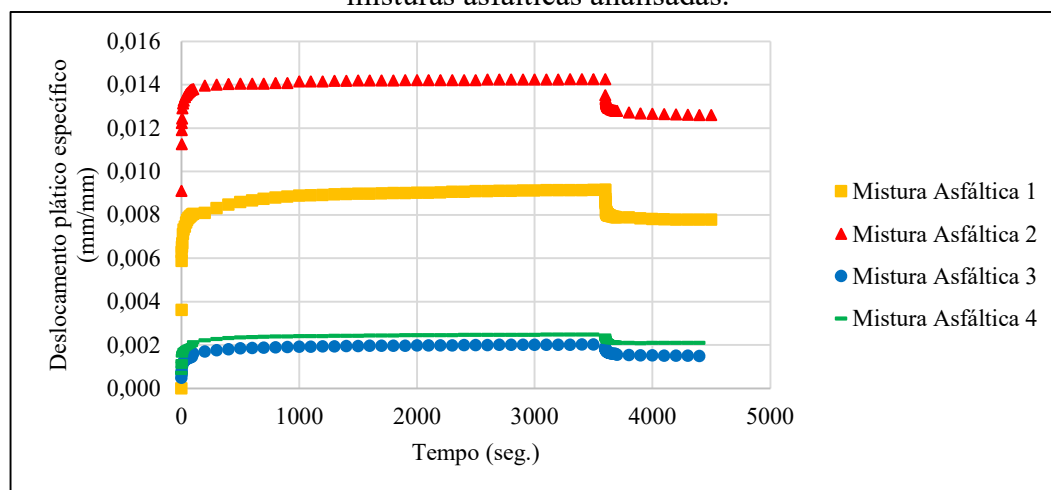
Observou-se na Tabela 3 que os valores de deformação plástica obtidos para as misturas asfálticas 1 e 3 da faixa granulométrica C são menores do que os obtidos para as misturas asfálticas 2 e 4 da faixa granulométrica B. Também, verificou-se que, comparando-se os resultados apresentados por faixa granulométrica, os valores de deformação plástica obtidos para os corpos de prova moldados pelo método de dosagem Marshall foram superiores aos obtidos para os corpos de prova moldados pelo método de dosagem Superpave (5,2 vezes para a faixa granulométrica C e 6 vezes para a faixa granulométrica B).

Pode-se ainda ressaltar que os corpos-de-prova das misturas asfálticas relativas a faixa granulométrica B apresentaram valores de deformação mais elevados do que os das misturas asfálticas relativas a faixa granulométrica C, ratificando as afirmações de Abo-Qudais e Al-Shweily (2007), que atribuíram os maiores valores de deformação ao fato de que as misturas preparadas com agregados de graduação mais grossa contêm menos finos, o que reduz a adesão pelos finos e conseqüentemente a resistência à deformação.

A diferença observada entre os resultados de deformação plástica específica máxima obtidos para os métodos de dosagem Marshall e Superpave deve-se, possivelmente, ao fato de que, ao serem moldados com o compactador giratório Superpave, os corpos de prova têm sua estrutura rearranjada de modo a tornarem-se mais rígidos porque o intertravamento entre as partículas dos agregados leva à formação de uma estrutura mais rígida do esqueleto pétreo, apresentando resultados de módulo de resiliência superiores aos valores apresentados por corpos de prova moldados pelo método Marshall.

A Figura 1 apresenta a curva de referência da deformação plástica específica, do ensaio de creep estático, para corpos de prova de misturas asfálticas dosadas pelos métodos Marshall e Superpave, para as faixas granulométricas C e B da especificação de serviço ES-031 (DNIT, 2006).

Figura 1 – Valores médios de deformação permanente dos corpos de prova das misturas asfálticas analisadas.



Fonte: Os Autores (2019).

Analisando-se os resultados apresentados na Figura 1, observou-se que os corpos de prova de mistura asfáltica dosada pelo método Marshall (mistura asfáltica 1) apresentaram valores de deformação plástica específica, cinco vezes maiores (Tabela 3) que os valores de deformação plástica específica obtidos para os corpos de prova de mistura asfáltica dosada pelo método Superpave (mistura asfáltica 3), ambas para a faixa granulométrica C.

Para os corpos de prova de mistura asfáltica 2 e 4 da faixa granulométrica B esta diferença foi ainda maior (seis vezes). Essa superioridade de resultados Superpave deve-se ao fato de que a compactação por meio do compactador giratório favorece o intertravamento entre as partículas dos agregados levando à formação de uma estrutura mais rígida do esqueleto pétreo, oferecendo, portanto, maior resistência à deformação.

A inclinação da curva no trecho secundário é um indicativo da tendência da mistura asfáltica em acumular deformação permanente, pois representa a velocidade da fluência do material. Quanto maior a inclinação, maior será o acúmulo de deformação permanente. Na Figura 1, entre os intervalos de tempos 1000s e 3600s, observou-se que os corpos de prova das misturas asfálticas 1 e 2 dosadas pelo método Marshall apresentaram inclinações menores no trecho secundário da curva de deformação permanente. Assim, apesar de apresentarem inicialmente altas velocidades de deformação, as curvas relativas

aos corpos de prova das misturas asfálticas 1 e 2 (método de dosagem Marshall) passam a se comportar com velocidades de deformação inferiores às dos corpos de prova moldados pelo método de dosagem Superpave (misturas asfálticas 3 e 4), demonstrando que os corpos de prova das misturas asfálticas 1 e 2 apresentam menor sensibilidade à deformação ao longo do tempo do que os corpos de prova moldados pelo método de dosagem Superpave, que tiveram evidenciadas as características viscoelásticas com o melhor intertravamento das partículas pelo processo de compactação.

Verificou-se que, embora as misturas asfálticas 1 e 2 moldadas pelo método de dosagem Marshall tenham obtido os maiores valores de deformação no trecho inicial da curva e os corpos de prova da mistura asfáltica 2 tenham apresentado o maior valor de deformação máxima e a melhor recuperação desta deformação, em valores absolutos, foram as misturas asfálticas 3 e 4 moldadas pelo método de dosagem Superpave que obtiveram, proporcionalmente, as maiores parcelas de deformação recuperável (Tabela 3).

Os valores médios dos parâmetros do ensaio de creep estático são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Valores médios dos parâmetros D_t , M_f , I_{curva} para os corpos de provas das misturas asfálticas analisadas.

	Mistura Asfáltica 1	Mistura Asfáltica 2	Mistura Asfáltica 3	Mistura Asfáltica 4
Método de dosagem	Marshall		Superpave	
Faixa granulométrica	C	B	C	B
Teor de Projeto de ligante asfáltico (%)	4,70	4,20	4,60	4,85
Deformação total – D_t (mm/mm)	0,0078	0,0126	0,0015	0,0021
Módulo de fluência – $M_f(450s)$ (MPa)	12,62	7,78	65,98	46,64
Inclinação da curva - I_{curva}	0,0222	0,0059	0,0464	0,0278

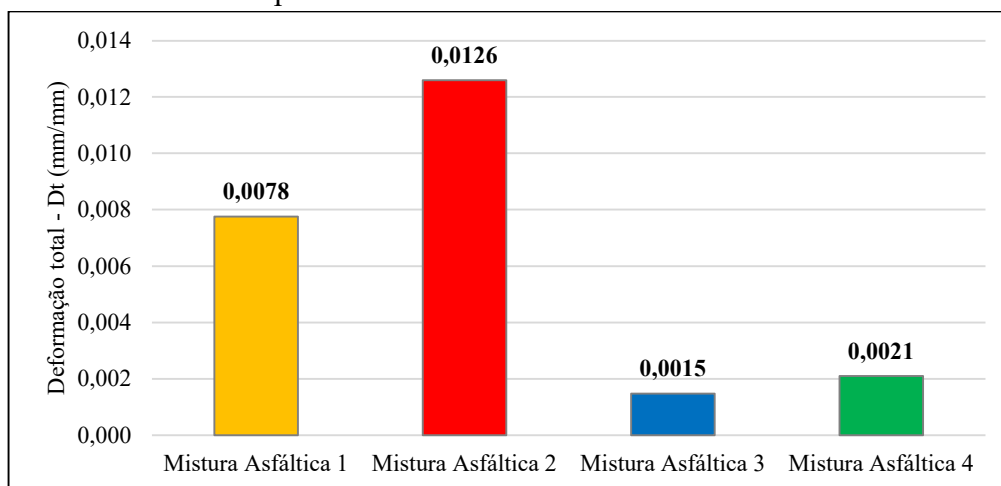
Fonte: Os Autores (2019).

A Figura 2 apresenta os valores de deformação total (D_t) de corpos de prova das misturas asfálticas analisadas, obtidos dos ensaios de creep estático realizado a 0,1 MPa e à temperatura de 40°C.

Observa-se que os corpos de prova das misturas asfálticas 1 e 2 dosadas pelo método Marshall apresentaram valores de deformações totais (D_t) aproximadamente, 5 vezes maiores que as medidas para os corpos de prova das misturas asfálticas dosadas pelo método Superpave (misturas asfálticas 3 e 4), possivelmente devido ao fato de que o processo de compactação giratório Superpave proporciona melhor rearranjo estrutural do

corpo de prova do que a compactação por impacto do método Marshall. Atribuindo, assim, aos corpos de prova moldados pelo método Superpave maior capacidade de resistir à deformação permanente em função do melhor intertravamento entre as partículas dos agregados.

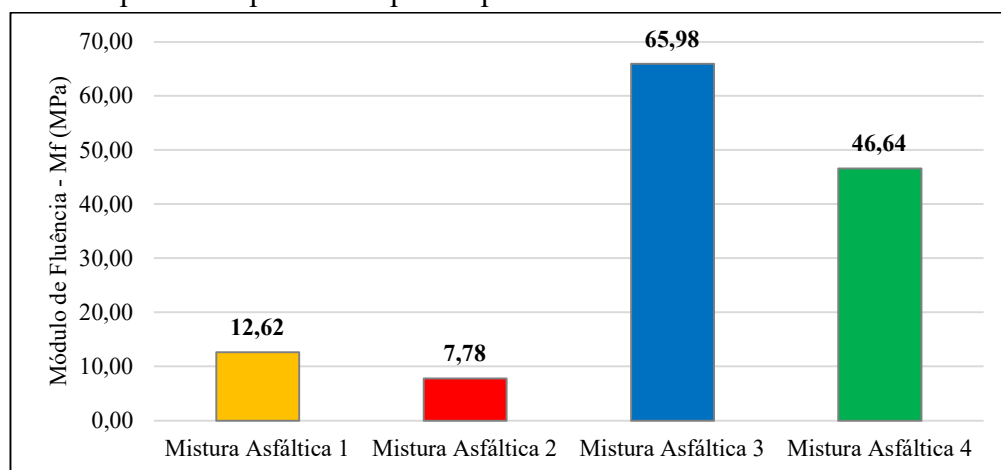
Figura 2 – Valores de deformação total (D_t) do ensaio de creep estático para os corpos de prova das misturas asfálticas analisadas.



Fonte: Os Autores (2019).

A Figura 3 apresenta os valores do módulo de fluência (M_f) das misturas asfálticas analisadas após o período de recuperação do material ($t=4500$ segundos).

Figura 3 – Valores de módulo de fluência (M_f) após o período de recuperação do ensaio de creep estático para os corpos de prova das misturas asfálticas analisadas.



Fonte: Os Autores (2019).

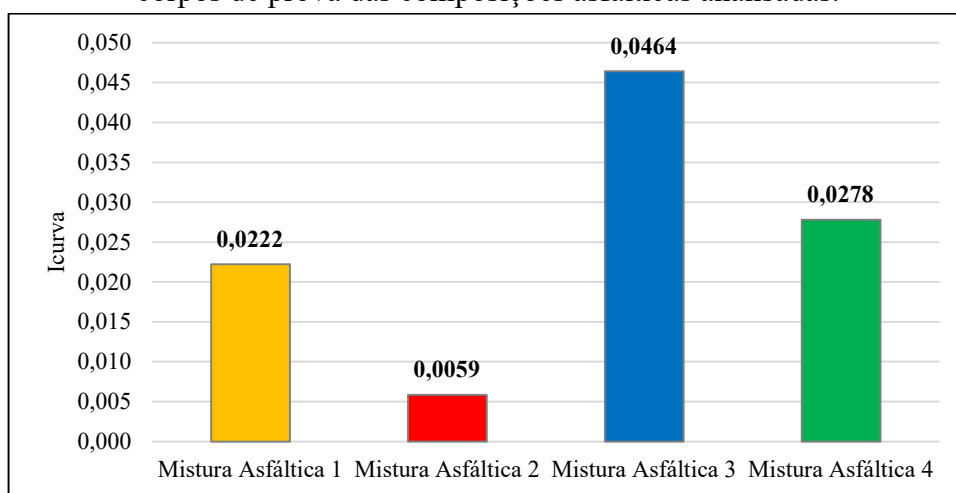
A partir da análise dos resultados apresentados na Figura 3, notou-se que os corpos de prova das misturas asfálticas 3 e 4, dosadas pelo método Superpave, apresentaram maiores módulos de fluência, portanto, estas misturas asfálticas têm maior capacidade de resistir a deformações permanentes se comparadas às misturas asfálticas 1 e 2 dosadas

pelo método Marshall, consoantes com os resultados do parâmetro deformação total (D_t), isto é, os valores de D_t para os corpos de prova das misturas asfálticas dosadas pelo método Superpave são menores do que os dos corpos de prova moldados pelo método Marshall.

Na Figura 4, apresenta-se a variação dos valores das inclinações das curvas (I_{curva}) para os corpos de prova das misturas asfálticas analisadas.

As inclinações das curvas de fluência para os corpos de prova das misturas asfálticas 3 e 4, dosadas pelo método Superpave, indicam um aumento na velocidade de deformação. No entanto, as misturas asfálticas 1 e 2, dosadas pelo método Marshall, apresentaram uma menor velocidade de deformação por fluência, o que evidencia a influência do método de dosagem. Para os corpos de prova moldados com o compactador giratório, o trecho secundário da curva *deformação x tempo* apresenta maior inclinação, que as dos corpos de prova compactados por impacto, demonstrando a característica viscoelástica destas misturas asfálticas.

Figura 4 – Valores da inclinação da curva (I_{curva}) do ensaio de creep estático para os corpos de prova das composições asfálticas analisadas.



Fonte: Os Autores (2019).

Além disso, considerando-se o parâmetro de fluência Marshall (Tabela 1), verifica-se que, para uma mesma curva granulométrica, estes parâmetros crescem em função do processo de compactação (Marshall e Superpave) e esta variação parece ter influência sobre a inclinação da curva, cujos parâmetros de velocidade de deformação também apresentaram crescimento com o método de compactação, principalmente na faixa granulométrica C, evidenciando a maior sensibilidade deste corpo de prova à deformação por fluência ($I_{curva} = 0,0464$).

Os resultados dos ensaios de creep estático destacaram os corpos de prova das misturas asfálticas 1 e 2, dosadas pelo método Marshall, por apresentarem maiores valores de deformação total, menores módulos de fluência e menores velocidades de deformação por fluência. Os corpos de prova dessas misturas asfálticas apresentaram maiores valores de deformação inicial, porém, entre os instantes 1000 e 3600 segundos, os valores de deformação total aumentaram apenas 2,9% e 0,8%, respectivamente.

Os corpos de prova das misturas asfálticas 3 e 4, dosadas pelo método Superpave, apresentaram valores de deformação inicial da ordem de 1/5 dos valores de deformação inicial dos corpos de prova das misturas asfálticas 1 e 2, entretanto no intervalo de 1000 a 3600 segundos os valores da deformação total cresceram 6,3 e 3,5%, respectivamente.

Assim, pôde-se constatar que as misturas asfálticas dosadas e compactadas pelo método Superpave (processo de amassamento) apresentaram melhor trabalhabilidade e maior intertravamento entre os grãos dos agregados, conferindo aos corpos de prova maior rigidez à deformação inicial do que os corpos de prova moldados pelo método Marshall (compactação por impacto).

Apesar de apresentarem menor susceptibilidade ao aparecimento de deformações iniciais e ao longo do tempo, os corpos de prova de misturas asfálticas dosadas pelo método Superpave indicaram uma inclinação da curva maior entre os tempos 1000 e 3600 segundos, o que significa maior evidência de comportamento viscoelástico do que para os corpos de prova das misturas asfálticas dosadas pelo método Marshall.

C.3 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos neste estudo conclui-se que a granulometria dos agregados minerais e os métodos de dosagem das misturas asfálticas têm influência significativa na deformação permanente, uma vez que estes fatores interferem nos valores do teor de projeto de ligante asfáltico e do módulo de resiliência, pois o compactador giratório proporciona um melhor rearranjo da estrutura pétreia do corpo de prova conferindo-lhe maior intertravamento das partículas com melhor preenchimento dos espaços intergranulares do que o obtido com a compactação por impacto.

Constatou-se que as misturas asfálticas compactadas por amassamento, método de dosagem Superpave, apresentaram maiores valores de fluência e estabilidade Marshall, apresentando a mesma tendência de resposta em fluência para os corpos de prova analisados no ensaio de creep estático, isto é, a maiores valores de fluência e estabilidade Marshall correspondem a valores maiores de módulo de fluência e vice-versa, embora

não haja uma correlação linear entre esses fatores. Portanto, as misturas asfálticas dosadas pelo método Superpave têm maior capacidade de resistir a deformações permanentes se comparadas às misturas asfálticas dosadas pelo método Marshall.

Em termos de deformação recuperável, as misturas asfálticas dosadas pelo método Superpave apresentaram maior potencial de recuperação elástica da deformação do que aquelas dosadas pelo método Marshall.

As inclinações das curvas para as misturas asfálticas dosadas pelo método Marshall apresentaram uma velocidade de deformação por fluência menor do que aquelas apresentadas pelas misturas asfálticas dosadas pelo método Superpave, que indicam um aumento na velocidade de deformação. Essas constatações sinalizam a influência do processo de compactação e da curva granulométrica sobre o comportamento em fluência das misturas asfálticas, principalmente para composições granulométricas mais finas, caracterizando a maior sensibilidade destas misturas à deformação por fluência.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABO-QUDAIS, S.; AL-SHWEILY, H. Effect of aggregate properties on asphalt mixtures stripping and creep behavior. **Construction and Building Materials**. v. 21. p. 1886-1898. 2007.

AHLRICH, R.C. Influence of Aggregate Properties on performance of Heavy-Duty Hot-Mix Asphalt Pavement. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**. v. 1547, p. 7-14. 1996. DOI: 10.3141/1547-02

AL-HUMEIDAWI, B.H. Experimental characterization of rutting performance of HMA designed with aggregate graduations according to Superpave and Marshall methods. **World Journal of Engineering and Technology**. v.4, p. 477-487. 2016. DOI:10.4236/wjet.2016.43048.

AL-QADI, I.L.; ASCE, F.; YOO, P.J.; ELSEIFI, M.A.; NELSON, S. Creep Behavior of Hot-Mix Asphalt due to Heavy Vehicular Tire Loading. **Journal of Engineering Mechanics**. v. 135 (11). p. 1265-1273. 2009.

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.

CHRISTENSEN, R.M. **Theory of Viscoelasticity**. 2^a ed. Mineola, New York, Dover Publications, 2003, 364 p.

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

DOMINGOS, M. D. I.; FAXINA, A. L.; BERNUCCI, L. L. B. Characterization of the rutting potential of modified asphalt binders and its correlation with the mixture's rut resistance. **Construction and Building Materials**. v. 144, p. 207-213. 2017.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. Background of SUPERPAVE asphalt mixture design and analysis. **FHWA-AS-95-003**. 1995, 160 p.

GOLALIPOUR, A.; JAMSHIDI, E.; NIAZI, Y.; AFSHARIKIA, Z.; KHADEM, M. Effect of Aggregate Gradation on Rutting of Asphalt Pavements. Published by Elsevier Ltd. **Social and Behavioral Sciences**. vol 53. p. 440 – 449, 2012.

GOUVEIA, L.T.; FERNANDES JR, J.L.; SOARES, J.B. Influência da energia de compactação no comportamento volumétrico e mecânico de misturas asfálticas. **Transportes**, v. XV, n. 1, p. 34-42. 2007

KATMAN, H.Y.; IBRAHIM, M.R.; KARIM, M.R.; MASHAAN, N.S.; KOTING, S. Evaluation of Permanent Deformation of Unmodified and Rubber-Reinforced SMA Asphalt Mixtures Using Dynamic Creep Test. **Advances in Materials Science and Engineering, Hindawi Publishing Corporation**. vol. 2015, Article ID 247149, 11 pages. 2015.

KHIAVI, A.K.; MANSSORI, S. The performance of hot mix asphalt in dynamic and static creep tests. **Petroleum Science and Technology**. v. 35, n. 15, p. 1627-1634. 2017. <https://doi.org/10.1080/10916466.2017.1336773>.

KHODAI, A.; MEHRARA, A. Evaluation of permanent deformation of unmodified and SBS modified asphalt mixtures using dynamic creep test. **Construction and Building Materials**. vol. 23. p. 2586-2592. 2009.

KIM, D.; KIM, Y.R. Development of Stress Sweep Rutting (SSR) test for permanent deformation characterization of asphalt mixture. **Construction and Building Materials**. v. 154, p. 373–383. 2017.

MANSOORI, S.; KHIAVI, A.K. The performance of hot mix asphalt in dynamic and static creep tests. **Petroleum Science and Technology**, vol. 35, n. 15, p. 1627-1634. 2017.

MELO, J.V.S.; TRICHÊS, G. Evaluation of rheological behavior and performance to permanent deformation of nanomodified asphalt mixtures with carbon nanotubes. **Canadian Journal of Civil Engineering**. vol.43. p. 472-479, 2016.

MOGHADDAM, T.B.; SOLTANI, M.; KARIM, M.R. Evaluation of permanent deformation characteristics of unmodified and Polyethylene Terephthalate modified asphalt mixtures using dynamic creep test. **Materials and Design**. vol. 53. p. 317-324, 2014.

MOREA, F. AGNUSDEI, J.O.; ZERBINO, R. Comparison of methods for measuring zero shear viscosity in asphalts. **Materials and Structures**. Vol. 43. p. 499-507. 2010. DOI 10.1617/s11527-009-9506-y.

MOURA, E.; BERNUCCI, L.L.B.; CHAVES, J.M.; CANDEIAS, C.M.; SILVA, A. Deformação permanente em trilha de roda em revestimento asfáltico: Estudo com simulador de tráfego de campo e de laboratório tipo LCPC. In: **XV CILA - Congresso Ibero-Latino Americano do Asfalto**., 2009, Lisboa, Portugal., 2009. v. 1. p. 469-478.

ONOFRE, F.C.; CASTELO BRNACO, V.T.F.; SOARES, J.B.; FAXINA, A.L. Avaliação do efeito de ligantes asfálticos modificados na resistência à deformação permanente de misturas asfálticas densas. **Revista Transportes**. v. 21. n. 3, p. 14-21. 2013. DOI:10.4237/transportes.21i3.685.

RADZISZEWSKI, P. Modified asphalt mixtures resistance to permanent deformations. **Journal of Civil Engineering and Management**. v. XIII, n. 4, p. 307-315. 2007

SAID, S.F.; HAKIM, H.; OSCARSSON, E.; HJORT, M. Prediction of flow rutting in asphalt concrete layers. **International Journal of Pavement Engineering**. v. 12, n. 6, p. 519–532. 2011

SAID, S.F.; HAKIM, H. Asphalt concrete rutting predicted using the PEDRO model. **International Journal of Pavement Engineering**. v. 17, n. 3, p. 245–252. 2016. <http://dx.doi.org/10.1080/10298436.2014.993184>

SARKAR, A. Combined Effect of Loading Pattern, Pulse Duration, and Stress Level on the Cyclic Creep Test of Asphalt Mixture. **Journal of Materials in Civil Engineering**. Vol. 29, Issue 1. 2017.

STAKTON, A.D.; BAHIA, H.U. The effect of fine aggregate angularity, asphalt content and performance graded asphalts on hot mix asphalt performance. **WisDOT Highway Research Study 0092-45-98**. University of Wisconsin, Madison. 2003, 96 p.

STRATEGIC HIGHWAY RESEARCH PROGRAM. The Superpave Mix Design Manual for New Construction and Overlays. **SHRP-A-407**. Washington, DC. National Research Council. 1994, 172 p.

TAPKIN, S.; KESKIN, M. Rutting Analysis of 100 mm Diameter Polypropylene Modified Asphalt Specimens Using Gyratory and Marshall Compactors. **Materials Research**. v. 16(2), p. 546-564. 2013.

VASCONCELOS, K.L. Comportamento mecânico de misturas asfálticas à quente dosadas pelas metodologias Marshall e Superpave com diferentes granulometrias. 2004. 149 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2004.

XU, T.; WANG, H.; LI, Z.; ZHAO, Y. Evaluation of permanent deformation of asphalt mixtures using different laboratory performance tests. **Construction and Building Materials**. v. 53, p. 561–567. 2014

ZHANG, J.; ALVAREZ, A.E.; LEE, S.I.; TORRES, A. WALUBITA, L.F. Comparison of flow number, dynamic modulus, and repeated load tests for evaluation of HMA permanent deformation. **Construction and Building Materials**. v. 44, p. 391–398. 2013. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2013.03.013.