

PAULO ROBERTO BORGES

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS ASFÁLTICAS A
QUENTE ANALISADAS PELOS MÉTODOS DE DOSAGEM MARSHALL E
SUPERPAVE**

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.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2019

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

T

B732e
2019
Borges, Paulo Roberto, 1967-
Estudo do comportamento mecânico de misturas asfálticas a
quente analisadas pelo métodos de dosagem *Marshall* e
Superparve / Paulo Roberto Borges. – Viçosa, MG, 2019.
xiv, 131 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Taciano Oliveira da Silva.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.
Inclui bibliografia.

1. Misturas com emulsão asfáltica. 2. Métodos de dosagem.
3. Análise estrutural (Engenharia). 4. Elsym5 (Programa de
computador). I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento
de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil. II. Título.

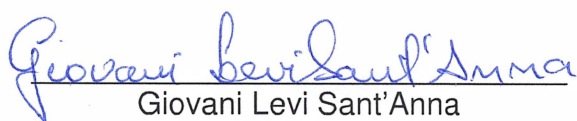
CDD 22. ed. 625.85

PAULO ROBERTO BORGES

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS ASFÁLTICAS A
QUENTE ANALISADAS PELOS MÉTODOS DE DOSAGEM MARSHALL
E SUPERPAVE**

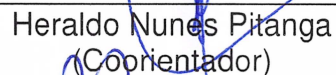
Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 27 de fevereiro de 2019.


Giovani Levi Sant'Anna


Carlos Alexandre Braz de Carvalho


Geraldo Luciano de Oliveira Marques


Heraldo Nunes Pitanga
(Coorientador)


Taciano Oliveira da Silva
(Orientador)

Dedico este trabalho
A Deus, Senhor de todas as coisas.
À Samantha, companheira de todas as horas.
Às minhas filhas Ana Clara e Alice.
À minha mãe e todos os meus familiares.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me concedido a oportunidade de viver este momento.

À Universidade Federal de Viçosa, por abrigar este sonho e contribuir para a sua realização.

Ao Professor Taciano Oliveira da Silva, que muito contribuiu com sua orientação para engrandecer este trabalho de pesquisa e que me deu força para caminhar até o seu término.

Ao professor Heraldo Nunes Pitanga, pela coorientação e disponibilidade em contribuir com sugestões e correções ao longo de toda jornada.

Ao professor Geraldo Luciano, pelos ensinamentos passados pela sua experiência no tema e sua disponibilidade em contribuir para esta pesquisa.

Ao professor Carlos Alexandre, pelo exemplo em que procuro sempre me espelhar, seja nos trabalhos de laboratório ou na sala de aula, viabilizando sempre o conhecimento.

Ao companheiro Giovani Levi Sant'Anna, que me auxiliou nos ensaios de laboratório e muito me ensinou durante todo esse período.

Ao companheiro de jornada Cássio Teoro, que dividiu algumas angústias, mas também muitas satisfações ao longo desse trajeto.

À Universidade Federal de Juiz de Fora, pelo suporte e pela possibilidade de execução de alguns ensaios em seu laboratório de pavimentação.

Ao técnico de laboratório Vítor, da UFJF, que executou ensaios de grande valia para a composição deste trabalho de pesquisa.

À Géssica Soares, que muito nos auxiliou nas tarefas árduas durante o período de ensaios de laboratório.

Enfim, a todos que direta ou indiretamente, participaram deste trabalho. Ao citá-los individualmente, a lista seria enorme, pois quando estamos diante de um desafio assim tão grande, precisamos e contamos com pessoas dos mais diferentes setores. Cada um de vocês tem importância única, e divido aqui o mérito deste trabalho com todos, muito obrigado.

*“... e aprendi que se depende sempre, de
tanta, muita, diferente gente, toda pessoa
sempre é a marca das lições diárias de
outras tantas pessoas...”*

Gonzaguinha

RESUMO

BORGES, Paulo Roberto, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2019. **Estudo do comportamento mecânico de misturas asfálticas a quente analisadas pelos métodos de dosagem marshall e superpave.** Orientador: Taciano Oliveira da Silva. Coorientadores: Heraldo Nunes Pitanga e Dario Cardoso de Lima.

Apresenta-se neste trabalho de pesquisa, uma avaliação comparativa entre os respectivos desempenhos de misturas asfálticas a quente dosadas pelos métodos Marshall e Superpave, analisando o seu desempenho através de ensaios mecânicos, assim como o desempenho estrutural dessas misturas asfálticas, quando aplicadas em um pavimento flexível. As faixas granulométricas selecionadas foram a faixa granulométrica B (camada de ligação ou binder) e a faixa granulométrica C (camada de rolamento ou capa asfáltica), conforme especificação de serviço do Departamento Nacional de Infraestrutura Terrestre. Após a definição da granulometria e do teor de ligante asfáltico para cada método de dosagem, foram confeccionados corpos de prova, efetuando-se os ensaios de laboratório para a determinação dos parâmetros mecânicos das misturas asfálticas analisadas. Foram realizados ensaios de estabilidade, resistência à tração por compressão diametral, módulo de resiliência, fadiga e compressão uniaxial estática (creep estático), comparando os resultados iniciais entre os métodos de dosagem utilizados nessa pesquisa. Conhecidas as propriedades mecânicas, utilizou-se o programa computacional Elsym5 para a análise estrutural de um pavimento adotado, ou seja, variou-se para este pavimento apenas as camadas de rolamento e binder, com suas propriedades mecânicas características. O pavimento adotado foi submetido a três níveis de carregamento (80kN, 98kN e 118kN) e a três níveis de pressão de enchimento dos pneus (563kPa, 633kPa e 703kPa). Os resultados obtidos indicam que a variação do método de dosagem altera o comportamento mecânico de corpos de prova de misturas asfálticas e também o desempenho estrutural do pavimento flexível. Ressalta-se então que os métodos de dosagem executados em laboratório conferem características únicas para o desempenho das misturas asfálticas, o que repercute nos resultados das análises estruturais do pavimento.

ABSTRACT

BORGES, Paulo Roberto, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2019. **Study of the mechanical behavior of hot asphalt mixtures analyzed by marshall and superpave dosing methods.** Adviser: Taciano Oliveira da Silva. Co-advisers: Heraldo Nunes Pitanga and Dario Cardoso de Lima.

This work presents a comparative evaluation of the performance of hot asphalt mixtures measured by Marshall and Superpave methods, analyzing their performance through mechanical tests, as well analyzing the structural performance of these mixtures when applied to a flexible pavement. The selected grades were the B range (bond layer or binder) and the C range (bearing layer or asphalt layer), according to the National Department of Terrestrial Infrastructure service specification. After determination of the granulometry and binder content for each dosing method, the test bodies were made, and the laboratory tests were carried out to determine the mechanical parameters of the asphalt mixtures analyzed. Stability tests, tensile strength by diametrical compression, resilient modulus, fatigue and static uniaxial compression (static creep) were performed, in order to compare the initial results between the dosing methods. Once the mechanical properties were known, the Elsym5 computer program was used for structural analysis of a pavement-type, that is, only the rolling and binder layers with their characteristic mechanical properties were varied for this pavement. The pavement-type was subjected to three loading levels (80kN, 98kN and 118kN) and to three tire inflation pressure levels (563kPa, 633kPa and 703kPa). The results indicate that choosing dosing method alters the mechanical behavior of the asphalt mixtures and also the structural performance of the flexible pavement. It should be emphasized that the dosage methods performed in the laboratory provide unique characteristics for the asphalt mixtures performance, both when evaluating the mechanical tests and also in the results of the pavement structural analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Teor de ligante asfáltico versus volume vazios e relação betume vazios	16
Figura 2.2 – Deformações permanentes em pavimentos asfálticos	22
Figura 2.3 – Estágios de deformação permanente axial acumulada	25
Figura 2.4 – Deformações e tensões no revestimento asfáltico	29
Figura 2.5 – Distribuição de tensões em um pavimento	30
Figura 3.1 – Curva granulométrica dos agregados minerais empregados na nessa pesquisa	37
Figura 3.2 – Curvas de projeto das Faixas granulométricas B e C – Marshall	39
Figura 3.3 – Teor de ligante asfáltico obtido através da relação Vv versus RBV	40
Figura 3.4 – Curva de projeto – Faixa granulométrica B – Superpave	41
Figura 3.5 – Curva de projeto – Faixa granulométrica C – Superpave	42
Figura 4.1 – Eixo simples de roda dupla, carregamento aplicado, parâmetros e espessura das camadas do pavimento adotado	58
Figura 4.2 – Curva granulométrica dos agregados minerais empregados nesta pesquisa	60
Figura 4.3 – Curvas de projeto das Faixas granulométricas B e C – Marshall	61
Figura 4.4 – Curva de projeto – Faixa granulométrica B – Superpave	61
Figura 4.5 – Curva de projeto – Faixa granulométrica C – Superpave	62
Figura 4.6 – Vida de Fadiga (Nflab) versus Diferença de tensões ($\Delta\sigma$) – Faixa granulométrica B	64
Figura 4.7 – Vida de Fadiga (Nflab) versus Diferença de tensões ($\Delta\sigma$) – Faixa granulométrica C	64
Figura 4.8 – Vida de Fadiga (Nf) para diversas posições no eixo X	68
Figura 5.1 – Curva granulométrica dos agregados minerais empregados na pesquisa	81
Figura 5.2 – Eixo simples de roda dupla, cargas aplicadas, parâmetros e espessura das camadas	84
Figura 5.3 – Curvas granulométricas para as misturas asfálticas de projeto das faixas granulométricas B e C	86
Figura 5.4 – Vida de Fadiga (Nflab) versus Diferença de tensões ($\Delta\sigma$) – Faixa granulométrica B	89
Figura 5.5 – Vida de Fadiga (Nf) versus Diferença de tensões ($\Delta\sigma$) – Faixa granulométrica C	90
Figura 5.6 – Vida de Fadiga (Nflab) para diversas posições no eixo X	95
Figura 6.1 – Curva granulométrica dos agregados minerais empregados na pesquisa	107
Figura 6.2 – Eixo simples de roda dupla, cargas aplicadas, parâmetros e espessura das camadas	111
Figura 6.3 – Curvas para as misturas asfálticas de projeto da faixa B e faixa C	113

Figura 6.4 – Curvas representativas da relação V_v x Número de giros para a mistura asfáltica de projeto da faixa B, compactada no CGS	115
Figura 6.5 – Curvas representativas da relação V_v x Número de giros para a mistura asfáltica de projeto da faixa C, compactada no CGS	115
Figura 6.6 – Vida de Fadiga (N) versus Diferença de Tensão ($\Delta\sigma$) – Faixa granulométrica B	117
Figura 6.7 – Vida de Fadiga (N) versus Diferença de Tensão ($\Delta\sigma$) – Faixa granulométrica C	117
Figura 6.8 – Vida de Fadiga (N_f) para diversas posições no eixo X	121

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Limites para os parâmetros volumétricos e mecânicos da dosagem Marshall.....	15
Tabela 2.2 – Limites para vazios no agregado mineral – VAM.....	15
Tabela 2.3 – Número de giros em função do volume de tráfego	18
Tabela 2.4 – Alguns critérios para controle da deformação permanente com base na limitação do módulo de fluência	26
Tabela 2.5 – Valores limites para a deformação após 1 hora de ensaio de creep e para inclinação da curva de fluência no estágio secundário	27
Tabela 3.1 – Caracterização dos agregados minerais empregados na pesquisa.....	37
Tabela 3.2 – Caracterização do cimento asfáltico de petróleo (CAP 50/70).....	38
Tabela 3.3 – Limites para os parâmetros volumétricos e mecânicos da dosagem Marshall.....	40
Tabela 3.4 – Valores limites para TMN (tamanho nominal máximo).....	42
Tabela 3.5 – Número de giros especificado para o método Superpave	43
Tabela 3.6 – Critérios volumétricos para escolha do teor de projeto	44
Tabela 4.1 – Valores limites para o Tamanho Máximo Nominal (TMN) do agregado	55
Tabela 4.2 – Critérios volumétricos para escolha do teor de projeto	55
Tabela 4.3 – Resultados da caracterização dos agregados minerais empregados na pesquisa.....	59
Tabela 4.4 – Resultados da caracterização do ligante asfáltico CAP 50/70	60
Tabela 4.5 – Teores de projeto obtidos segundo os métodos de dosagem.....	62
Tabela 4.6 – Parâmetros volumétricos e mecânicos para as misturas asfálticas de projeto enquadradas na faixa granulométrica B	63
Tabela 4.7 – Parâmetros volumétricos e mecânicos para as misturas asfálticas de projeto enquadradas na faixa granulométrica C.....	63
Tabela 4.8 – Média dos resultados de creep estático das misturas asfálticas dosadas e compactadas pelos métodos Marshall e Superpave – Faixa granulométrica B.	65
Tabela 4.9 – Média dos resultados de creep estático das misturas asfálticas dosadas e compactadas pelos métodos Marshall e Superpave – Faixa granulométrica C.	65
Tabela 4.10 - Tensões horizontais e verticais atuantes na camada de rolamento (capa asfáltica) e na camada de ligação (binder).....	67
Tabela 4.11 – Vida de fadiga nos pontos de maior carregamento (Nflab)	69
Tabela 4.12 – Relação entre as vidas de fadiga obtidas por meio dos métodos Superpave e Marshall nos pontos de maior carregamento	69
Tabela 4.13 – Deflexões verticais recuperáveis no topo do pavimento adotado: comparativo com D_{adm} obtido para o carregamento padrão.....	70
Tabela 5.1 – Resultados da caracterização dos agregados minerais empregados nessa pesquisa	85

Tabela 5.2 – Resultados da caracterização do ligante asfáltico CAP 50/70	86
Tabela 5.3 – Teor de projeto para o método de dosagem Marshall.....	87
Tabela 5.4 – Parâmetros e resultados mecânicos para as faixas granulométricas B e C.....	87
Tabela 5.5 – Média dos resultados de creep estático das misturas dosadas e compactadas pelo método Marshall – Faixa granulométrica B	91
Tabela 5.6 – Média dos resultados de creep estático das misturas dosadas e compactadas pelo método Marshall – Faixa granulométrica C	91
Tabela 5.7 – Tensões horizontais e verticais atuantes na camada de rolamento (capa asfáltica) e na camada de ligação (binder).....	94
Tabela 5.8 – Vida de fadiga – N_f Laboratório.....	96
Tabela 5.9 – Relação entre as vidas de fadiga Marshall versus Marshall Envelhecimento nos pontos de maior carregamento	96
Tabela 5.10 – Deflexões verticais recuperáveis no topo do pavimento adotado: comparativo com Dadm obtido para o carregamento padrão	97
Tabela 6.1 – Resultados da caracterização dos agregados minerais empregados na pesquisa.....	112
Tabela 6.2 – Resultados da caracterização do ligante asfáltico CAP 50/70	113
Tabela 6.3 – Teor de projeto, Vv, RBV, Estabilidade e Resistência à tração por compressão diametral para as misturas asfálticas de projeto – método de dosagem Marshall.....	114
Tabela 6.4 – Resultados mecânicos e relação MR/RT após compactações, obtidos para as faixas B e C	116
Tabela 6.5 – Média dos resultados de creep estático das misturas dosadas pelo método Marshall e compactadas pelos métodos Marshall e Superpave – Faixa B.....	118
Tabela 6.6 – Média dos resultados de creep estático das misturas dosadas método Marshall e compactadas pelos métodos Marshall e Superpave – Faixa C	118
Tabela 6.7 – Tensões atuantes na camada asfáltica e camada de ligação (Binder)	120
Tabela 6.8 – Vida de fadiga – N_f Laboratório	122
Tabela 6.9 – Relação entre as vidas de fadiga Nequivalente e Marshall nos pontos de maior carregamento	122
Tabela 6.10 – Deflexões verticais recuperáveis no topo do pavimento adotado: comparativo com Dadm obtido para o carregamento padrão	123

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1.....	1
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Contextualização Do Problema	1
1.2 Identificação Do Problema.....	4
1.3 Justificativa	5
1.4 Objetivos	6
1.5 Organização Do Trabalho.....	7
REFERÊNCIAS	8
CAPÍTULO 2.....	10
1 REVISÃO DE LITERATURA	10
1.1. Misturas Asfálticas A Quente.....	12
1.2 Método De Dosagem Marshall	13
1.3 Método De Dosagem Superpave.....	16
1.4 Deformação Permanente	19
1.5 Fluência Por Compressão Uniaxial.....	22
1.5.1 Fluência Por Compressão Uniaxial Estática	23
1.6 Fadiga.....	27
REFERÊNCIAS	32
CAPÍTULO 3.....	36
1 MATERIAIS E MÉTODOS.....	36
1.1 Materiais	36
1.1.1 Agregados	36
1.1.2 Ligante Asfáltico	38
1.2 Métodos	38
1.2.1 Método De Dosagem Marshall	38
1.2.2 Método De Dosagem Superpave	41

1.3 Ensaaios Mecânicos	44
1.3.1 Estabilidade Marshall	44
1.3.2 Ensaio De Resistência À Tração Por Compressão Diametral	45
1.3.3 Ensaio De Módulo De Resiliência	45
1.3.4 Ensaio De Fadiga	45
1.3.5 Ensaio De Compressão Uniaxial Estático (Creep Estático).....	46
1.3.6 Programa Computacional Elsym5	46
REFERÊNCIAS.....	46
CAPÍTULO 4.....	49
ANÁLISE ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS SOB A PERSPECTIVA DE DIFERENTES MÉTODOS DE DOSAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS	49
1 INTRODUÇÃO.....	51
2 MATERIAIS E MÉTODOS.....	53
2.1 Materiais Utilizados.....	53
2.2 Produção Dos Corpos De Prova.....	54
2.2.1 Método De Dosagem Marshall	54
2.2.2 Método De Dosagem Superpave	54
2.2.3 Ensaaios Mecânicos	56
2.2.4 Análise Estrutural	56
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	58
3.1 Agregados E Ligante Asfáltico.....	58
3.2 Curvas Granulométricas De Projeto	61
3.3 Teores De Projeto E Resultados De Ensaaios Mecânicos	62
3.4 Análise Estrutural.....	66
4 CONCLUSÕES.....	71
REFERÊNCIAS	71
CAPÍTULO 5.....	76
ANÁLISE ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS DE MISTURAS ASFÁLTICAS A QUENTE, DOSADAS PELO MÉTODO MARSHALL E SUBMETIDAS AO ENVELHECIMENTO DE CURTO PRAZO.....	76

1 INTRODUÇÃO.....	78
2 MATERIAIS E MÉTODOS.....	81
2.1 Materiais Utilizados.....	81
2.2.1 Método De Dosagem Marshall	82
2.2.2 Ensaios Mecânicos Para Avaliar O Comportamento Das Misturas Asfálticas	82
2.2.3 Simulação Do Comportamento Mecânico Das Misturas Asfálticas Utilizando O Software Elsym5	83
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	85
3.1 Agregados E Ligante Asfáltico.....	85
3.2 Curvas Granulométricas Para A Dosagem	86
3.3 Teor De Projeto E Resultados De Ensaios Mecânicos	87
3.3.1 Teor De Projeto, Propriedades Volumétricas, Estabilidade, RT E MR ...	87
3.3.2 Ensaio De Fadiga	89
3.3.3 Ensaio De Fluência Por Compressão Uniaxial Estática (Creep Estático)	91
3.4. Análise Estrutural.....	92
4 CONCLUSÕES.....	98
REFERÊNCIAS	99
CAPÍTULO 6.....	103
ANÁLISE ESTRUTURAL DE REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS DOSADOS PELO MÉTODO MARSHALL E COMPACTADOS EM ENERGIAS EQUIVALENTES	103
1 INTRODUÇÃO.....	105
2 MATERIAIS E MÉTODOS.....	107
2.1 Materiais Utilizados.....	107
2.2 Produção De Corpos De Prova	107
2.2.1 Método De Dosagem Marshall	108
2.2.2 Número De Giros Equivalente	108
2.2.3 Ensaios Mecânicos.....	109
2.2.4 Análise Estrutural	109
3 RESULTADOS E ANÁLISES.....	111

3.1 Agregados E Ligante Asfáltico.....	111
3.2 Curvas Granulométricas Dos Agregados.....	113
3.3 Teor De Projeto, Parâmetros Volumétricos, Parâmetros Mecânicos E Número De Giros Equivalente	114
3.4 Resultados De Ensaio Mecânicos E Relação MR/RT	116
3.5 Análise Estrutural.....	119
4 CONCLUSÕES.....	124
REFERÊNCIAS	125
CAPÍTULO 7	129
1 CONCLUSÕES FINAIS	129
1.2 Envelhecimento De Curto Prazo.....	130
1.3 Energia De Compactação Equivalente	130
1.4 Sugestões Para Trabalhos Futuros	131

Capítulo 1

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização do problema

Segundo a CNT (2017), o Brasil possui 210.618 Km de rodovias pavimentadas, representando cerca de 12,2% do total da malha rodoviária brasileira. Desse total, 5,3% de rodovias possuem pista dupla, 94%, pista simples e 0,7%, em duplicação. A extensão das rodovias federais pavimentadas cresce, aproximadamente, 1,0% ao ano, o que resultou em uma ampliação em torno de 11,3%, no acumulado do período de 2007 a 2017. Em quase sua totalidade, as rodovias brasileiras têm como revestimento as misturas asfálticas. Conforme essa mesma fonte, tais vias são responsáveis por 95% da locomoção de passageiros e por 61% da movimentação de cargas no Brasil, sendo o restante distribuído entre os demais modais de transporte, a saber, ferroviário, aeroviário e aquaviário. Do total pavimentado, aproximadamente 95% das rodovias são constituídas por revestimentos asfálticos divididos em dois grupos principais, os concretos betuminosos usinados a quente (CBUQs) e os pré-misturados a frio (PMFs), ambos apresentando graduações predominantemente densas (BERNUCCI et al., 2008).

No final do século XVIII, por iniciativa do governador da capitania de São Paulo, Bernardo José de Lorena, e sob a supervisão de engenheiros da Escola de Fortificações de Lisboa, foi construída a primeira estrada pavimentada no país, tratada sob vários aspectos com base em preceitos de engenharia, a qual receberia a alcunha de seu idealizador: a Calçada do Lorena, ligando o Planalto Paulista ao porto de Santos (BALBO, 2007).

As primeiras misturas betuminosas produzidas nos Estados Unidos foram usadas a partir do final da década de 1860. Em 1870, foi colocado em frente à prefeitura de Newark, em New Jersey, o primeiro pavimento de asfalto, que era uma mistura de areia e asfalto. Enquanto o automóvel se popularizava, as solicitações de melhores condições nas estradas foram se multiplicando, surgindo então as primeiras unidades de produção de misturas asfálticas a quente. Nos últimos 30 anos, o uso do asfalto se difundiu para diversas áreas, graças a sua versatilidade de aplicação. Hoje,

aplica-se a mistura asfáltica em ruas, estradas, autoestradas, aeroportos, estaleiros de cargas, entre outras possibilidades. Nesse sentido, a indústria busca melhorias no projeto e na produção das misturas asfálticas, desenvolvendo materiais avançados para a pavimentação, incluindo o Open Graded Friction Course (OGFC), o Superpave e o Stone Matrix Asphalt (SMA), chamado de Matriz Asfáltica Pétreá, no Brasil (NATIONAL ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION, 2017).

Hoje, os pavimentos construídos podem ser projetados para atender a uma variedade de necessidades, tais como: menor ruído, maior durabilidade e maior resistência mecânica. Toda essa evolução nos leva a estudar as particularidades de uma mistura asfáltica, a partir da perspectiva do local onde será aplicada, dos materiais empregados e da utilização de métodos para a confecção dessa mistura, para que suporte as cargas destinadas a ela, como camada de revestimento.

O revestimento é uma das várias camadas de um pavimento flexível que, segundo Balbo (2007), é uma estrutura não perene, composta por camadas sobrepostas de diferentes materiais, compactados a partir do subleito do corpo estradal, adequada para atender estrutural e operacionalmente ao tráfego, de maneira durável e ao custo adequado, considerados diferentes horizontes para serviços obrigatórios de manutenção preventiva, corretiva e de reabilitação.

Nos Estados Unidos, o Strategic Highway Research Program (SHRP) foi iniciado em 1987, para o desenvolvimento de um novo sistema de especificação de materiais asfálticos. O Superior Performance Asphalt Pavements (Superpave – M 323 (AASTHO, 2017) foi um dos produtos finais desse programa, concebido para auxiliar na seleção de materiais e no projeto de misturas asfálticas. Esse sistema especifica materiais, projeta e analisa misturas asfálticas e prevê o desempenho de pavimentos, incluindo equipamentos de ensaios, métodos e critérios (MARQUES, 2004).

O programa SHRP busca aprimorar em laboratório um método de dosagem de misturas asfálticas que ocorre em campo, quando a mistura asfáltica é executada em grande escala (ADVANCED ASPHALT TECHNOLOGIES, 2011).

No Brasil, o método de dosagem para misturas asfálticas mais utilizado é o método Marshall ME 043 (DNER, 1995), que é definido por Roberts et al. (2002) como uma metodologia de dosagem que consiste em um processo empírico, baseado em parâmetros que melhor relacionam o desempenho da mistura em campo ao afundamento em trilha de roda e ao trincamento de revestimentos asfálticos. Tal

método foi desenvolvido em 1939, por Bruce Marshall, no Mississippi Highway Department. Segundo Leandro (2016), o método de dosagem Marshall foi desenvolvido com base em estudos da Mecânica dos Solos, e, na época, a maior preocupação dos engenheiros consistia na deformação devido a esforços de cisalhamento nas estruturas dos pavimentos.

Programas computacionais são utilizados para cálculo das tensões, deformações e deslocamentos da estrutura que compõe o pavimento. Para Medina e Motta (2015), tem-se economia de tempo e mais versatilidade quando se utilizam os programas de cálculo. Além do mais, pode-se considerar mais facilmente a elasticidade não linear, o que é importante para determinados solos e materiais granulares. Esses autores descrevem ainda que o programa computacional Elsym5, desenvolvido com base no método de diferenças finitas, é aplicado a problemas de elasticidade linear de meios estratificados, com a solução de Burmister ampliada para cinco camadas, sendo utilizado o método das diferenças finitas na resolução das expressões. O número de cargas pode ir até dez e o número de pontos de análise até cem (10 pares x-y em 10 profundidades z).

Segundo Medina e Motta (2015), o método das diferenças finitas resolve problemas de valores no contorno em equações diferenciais ordinárias e as derivadas das equações diferenciais se calculam por meio de fórmulas aproximadas, numa série de pontos no domínio de integração do problema. Obtém-se um sistema de equações algébricas que permite calcular as incógnitas nos pontos escolhidos. Aumentando-se o número de pontos, as soluções se aproximam da solução exata. Tem-se uma solução discreta do problema nos pontos considerados. Consideram-se as camadas homogêneas, isotrópicas e horizontalmente infinitas, sendo o subleito um meio semi-infinito. Cada camada deve ter seu módulo de elasticidade constante e coeficiente de Poisson definidos nos dados de entrada do programa.

Neste trabalho, será avaliado o desempenho mecânico das misturas asfálticas a quente, que são utilizadas como camadas de revestimento, podendo ser divididas em: camada de rolamento; camada de ligação (binder). Para Balbo (2007), a camada de rolamento é a camada superficial do pavimento, diretamente em contato com as cargas e com ações ambientais; a camada de ligação é a camada intermediária, também em mistura asfáltica, entre a camada de rolamento e a base do pavimento; já a camada de nivelamento é empregada na execução de reforço (recapeamento), cuja

função é corrigir os desníveis em pista ou os afundamentos localizados, isto é, nivelar o perfil do greide, para posterior execução da nova camada de rolamento. Por fim, a camada de reforço é uma nova camada de rolamento executada por razões funcionais, estruturais ou ambas, após anos de uso do pavimento existente.

1.2 Identificação do Problema

A dosagem de misturas asfálticas busca, em sua essência, produzir um material que seja o mais resistente e durável possível. Segundo Balbo (2007), os critérios de dosagem de misturas asfálticas não são únicos, dependendo, por exemplo, do tipo de mistura, da tradição local e da disponibilidade de equipamentos de maior ou menor evolução tecnológica. Uma dosagem racional será aquela que, por meio de testes laboratoriais, procure elucidar o processo de degradação do material que possivelmente ocorrerá em pista.

Os métodos de dosagem de misturas asfálticas adotadas nesta pesquisa foram os métodos Marshall e Superpave (Nível 1), verificando ainda o comportamento mecânico em relação à vida de fadiga e à deformação permanente, as quais se apresentam como os principais parâmetros para a determinação da vida útil de um pavimento. Almeida Júnior et al. (2017) descrevem que os projetos de misturas asfálticas no país ainda são baseados em ensaios básicos de ligantes asfálticos e em uma seleção granulométrica por tentativa e erro, por meio de faixas granulométricas da especificação de serviço ES 031 (DNIT, 2006), e sem um estudo relativo ao dano, o que pode resultar em uma mistura asfáltica não efetiva em termos mecânicos.

A partir dessas considerações, foi verificada a necessidade de avaliação de outros parâmetros para além do que prescrevem as normas técnicas ME 043 (DNER, 1995), para o método Marshall, e M 323 (AASHTO, 2017), para o método Superpave. Dessa forma, foi verificado o comportamento mecânico das misturas asfálticas dosadas pelos métodos Marshall e Superpave, por meio dos ensaios de módulo de resiliência (MR), de vida de fadiga e de fluência por compressão uniaxial estática (creep estático), os quais ampliaram o espectro de resultados analisados para as misturas asfálticas estudadas. Dos resultados encontrados para esses parâmetros mecânicos, é possível avaliar o comportamento mecânico para essas misturas.

Outro ponto que diferencia os métodos Marshall e Superpave é a forma de compactação dos corpos de prova das misturas asfálticas produzidas. O método Marshall utiliza a compactação por impacto e o método Superpave utiliza a compactação por amassamento. Essa diferença de compactação pode gerar um arranjo distinto das partículas, produzindo uma densidade diferente para cada mistura asfáltica de projeto, obtida segundo o respectivo método de dosagem utilizado e, por consequência, uma mistura asfáltica mais ou menos resistente aos fenômenos de fadiga e de deformação permanente.

Através da utilização de programa computacional, simulou-se uma estrutura de pavimento para verificar o desempenho de cada mistura asfáltica dosada pelos métodos Marshall e Superpave, sendo a faixa C como camada de rolamento (capa) e a faixa B como camada de ligação (Binder).

1.3 Justificativa

O projeto de dosagem de misturas asfálticas a quente é a primeira etapa para que seja definida a melhor composição entre agregados e cimento asfáltico, a qual possa gerar uma mistura asfáltica que atenda aos requisitos de durabilidade, estabilidade, resistência à derrapagem e resistência à fadiga e ao trincamento térmico. Segundo Bernucci et al. (2008), os requisitos técnicos e de qualidade de um pavimento asfáltico serão atendidos com um projeto adequado da estrutura do pavimento e com o projeto de dosagem da mistura asfáltica compatível com as outras camadas escolhidas. Neste trabalho, buscou-se realizar uma análise do comportamento das misturas asfálticas dosadas pelos métodos Marshall e Superpave.

No Brasil, o método de dosagem Marshall é normatizado e de uso corrente; porém, pesquisas têm apontado para a utilização de outros métodos de dosagem de misturas asfálticas que, embora ainda não normatizados pelos órgãos reguladores, já se apresentam como alternativas e possibilitam fazer um paralelo com os resultados do método Marshall, como é o caso do método Superpave.

O método de dosagem Superpave prescreve que, após a mistura entre agregados e ligante asfáltico, esta seja acondicionada em estufa, na temperatura de compactação, por um período de 2 horas. A função desse acondicionamento é simular o período em que uma mistura asfáltica é transportada, lançada e compactada em

pista. Nesse período de 2 horas ocorre o envelhecimento de curto prazo da mistura asfáltica e esse processo fornece características distintas em relação às misturas asfálticas que são compactadas imediatamente após a mistura dos materiais, que é o que ocorre no método de dosagem Marshall.

Outro ponto que distingue os métodos de dosagem Superpave e Marshall, é a forma de compactação das misturas asfálticas: o método Superpave se utiliza da compactação por amassamento, enquanto o método Marshall realiza a compactação por impacto. A energia de compactação desprendida em cada caso produz diferentes arranjos entre as partículas das misturas asfálticas e, assim, uma resposta também diferente para o comportamento mecânico das misturas asfálticas compactadas de acordo com cada método estudado. Ainda, é possível avaliar o comportamento das misturas asfálticas dosadas pelos métodos Marshall e Superpave, utilizando um programa computacional para avaliar a resposta estrutural de um pavimento composto de capa, binder, base, reforço de subleito e subleito. Nesse trabalho utilizou-se o programa computacional Elsym5, para uma estrutura de base, reforço de subleito e subleito iguais para todas as situações, variando apenas as camadas de revestimento (capa) e camada de ligação (binder). Com isso foi possível verificar o comportamento das misturas asfálticas dosadas pelos métodos aplicados neste trabalho, simulando as situações de tráfego para o pavimento adotado.

1.4 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho de pesquisa é avaliar o comportamento mecânico de misturas asfálticas a quente, dosadas e compactadas pelos métodos Superpave e Marshall, considerando-se as particularidades de cada método, bem como analisar comparativamente os efeitos da forma de compactação, a volumetria e os resultados de ensaios mecânicos. Para tal fim, a seguir se apresentam os objetivos específicos:

- Avaliar o comportamento mecânico de misturas asfálticas dosadas pelos métodos Superpave e Marshall para as faixas B e C do DNIT. As avaliações do comportamento mecânico de cada mistura asfáltica serão divididas por

faixa, ou seja, Superpave versus Marshall para a faixa B e Superpave versus Marshall para a faixa C;

- Avaliar, para a dosagem e compactação Marshall, os efeitos do envelhecimento de curto prazo para misturas asfálticas dosadas por este método. O envelhecimento de curto prazo é uma das características do método Superpave, porém será incorporada ao método Marshall para uma avaliação deste requisito. Serão observados os efeitos desse envelhecimento de curto prazo para as faixas granulométricas B e C do DNIT;
- Analisar o comportamento mecânico de misturas asfálticas a quente dosadas pelo método Marshall, compactadas no compactador mecânico Marshall e no Compactador Giratório Superpave (CGS), visando determinar a energia equivalente entre as duas formas de compactação. Foram avaliadas as faixas B e C do DNIT;
- Para todas as situações e objetivos acima descritos, foram analisados o comportamento das misturas asfálticas a quente dosadas pelos métodos Marshall e Superpave, através de simulações, utilizando-se o programa computacional Elsym5 de diferenças finitas e se analisando o comportamento das misturas asfálticas estudadas em uma estrutura de pavimento hipotética, onde se fixaram as camadas subjacentes e se analisou o comportamento das misturas asfálticas para cada caso.

1.5 Organização do Trabalho

O trabalho foi dividido em sete capítulos, em função dos objetivos específicos. No primeiro capítulo tem-se a introdução, com um breve histórico das misturas asfálticas e contextualização da importância dos estudos realizados neste trabalho de pesquisa. No segundo capítulo, apresenta-se uma revisão de literatura sobre os métodos de dosagem de misturas asfálticas a quente.

O terceiro capítulo apresenta os materiais e métodos utilizados nesta pesquisa. E no quarto capítulo, têm-se as dosagens de misturas asfálticas a quente pelos métodos Marshall e Superpave para as faixas B e C do DNIT e avaliam-se os resultados da volumetria e dos ensaios mecânicos para os dois métodos. Também foi realizada uma comparação entre os métodos de dosagem de misturas asfálticas Superpave e Marshall, avaliando-se os resultados obtidos nos ensaios mecânicos de módulo de resiliência, resistência à tração por compressão diametral, fadiga, deformação permanente e simulações de comportamento da estrutura de um pavimento hipotético, utilizando-se o programa computacional Elsym5, elaborado com base no método de diferenças finitas.

No quinto capítulo, há a abordagem do comportamento de misturas asfálticas a quente dosadas pelo método Marshall e submetidas ao envelhecimento de curto prazo, que é uma das características de misturas asfálticas dosadas pelo método Superpave. Após o envelhecimento de curto prazo, comparou-se o desempenho das misturas executadas com o envelhecimento de curto prazo e sem o envelhecimento de curto prazo, através de ensaios mecânicos.

O sexto capítulo traz a análise do comportamento mecânico de misturas asfálticas a quente dosadas pelo método Marshall e compactadas no compactador mecânico Marshall e no compactador giratório Superpave (CGS), visando determinar a energia equivalente entre as duas formas de compactação. Após a determinação do $N_{equivalente}$ (número de giros no compactador Superpave), que produziu a mesma volumetria dos corpos de prova compactados pelo compactador mecânico Marshall, foram realizados os ensaios para avaliar o desempenho mecânico dessas misturas asfálticas a quente.

No sétimo capítulo apresentam-se a conclusão geral do trabalho e as recomendações para trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **M 323**: Standard Specification for Superpave volumetric mix design. Washigton, D. C, 2017.

ADVANCED ASPHALT TECHNOLOGIES. **A manual for design of hot mix asphalt with commentary**. Nacional Cooperative Highway Research Program – NCHRP. Report 673. Washigton, 2011.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B.
Pavimentação asfáltica – Formação básica para engenheiros. PETROBRÁS:
ABEDA. Rio de Janeiro, 2008.

BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica**: materiais, projeto e restauração. Oficina de
textos, 560 p. São Paulo, 2007.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE – CNT. **Pesquisa CNT de
Rodovias 2017**: Relatório Gerencial. Confederação Nacional do Transporte. 406p.
Brasília, 2017.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **ME 043**: Misturas
betuminosas a quente – Ensaio Marshall para misturas betuminosas. Rio de Janeiro,
1995.

LEANDRO, R. P. **Avaliação do comportamento mecânico de corpos de prova de
misturas asfálticas a quente resultantes de diferentes métodos de
compactação**. Tese de Doutorado. São Paulo: Escola Politécnica de Engenharia,
2016.

MARQUES, G. L. O. **Utilização do Módulo de Resiliência como Critério de
Dosagem de Mistura Asfáltica**: Efeito da Compactação por Impacto e Giratória. Rio
de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2004.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. **Mecânica dos pavimentos**. 3. ed. Rio de Janeiro:
Interciência, 2015.

ROBERTS, F. L., MOHAMMAD, L. N., WANG, L. B. History of hot mix asphalt
mixture design in the United States. **Journal of Materials in Civil Engineering**.
Reston, VA, 2002. v.14, n.4, p. 279 - 293.

Capítulo 2

1 REVISÃO DE LITERATURA

Os revestimentos asfálticos densos são constituídos por uma mistura de agregados minerais (gráúdo, miúdo, fíler) com ligante asfáltico (cimento asfáltico de petróleo, emulsão asfáltica de petróleo), em proporções adequadas, formando uma camada que deve ser suficientemente impermeável, flexível e resistente às solicitações do tráfego e às influências climáticas ou intempéricas. Tal camada deve ser projetada visando proporcionar conforto e segurança aos usuários e garantir uma maior vida útil ao pavimento, principalmente por proteger suas camadas subjacentes, absorvendo parte das solicitações impostas pelo tráfego de veículos (BALBO, 2007).

A fim de atender às exigências especificadas, para conferir à camada de revestimento os desempenhos funcional e estrutural satisfatórios, as misturas asfálticas devem ser submetidas a rigorosos controles nas operações de dosagem, usinagem e execução na pista, devendo satisfazer a critérios técnicos pertinentes à resistência mecânica, à flexibilidade e à durabilidade. O correto atendimento a esses critérios possibilita que o revestimento resista às solicitações de serviço, durante o período de vida útil para o qual a estrutura do pavimento será projetada (PINTO e PREUSSLER, 2010).

Para cumprir este papel, certos pontos tornam-se fundamentais: (i) análise dos materiais empregados na composição das misturas asfálticas, com ênfase em suas características tecnológicas; (ii) compatibilidade entre os métodos de dosagem dessas misturas e os procedimentos de usinagem da mistura solta e de execução da mistura compactada em campo; e (iii) avaliação do comportamento mecânico das misturas asfálticas compactadas, por meio de ensaios que traduzam as solicitações impostas aos revestimentos e a resposta estrutural deles sob tais solicitações.

Particularmente para a dosagem de misturas asfálticas densas, a técnica de dosagem Marshall é a mais utilizada no Brasil, por se tratar de uma metodologia simples e de baixo custo, na qual se utilizam impactos de um soquete metálico como método de compactação. Apesar de seu histórico de uso e das vantagens previamente citadas, Motta (1998) relata críticas a tal metodologia, das quais se destacam a pouca representatividade do método de compactação em relação ao

campo e a grande influência de fatores ligados à preparação dos corpos de prova na determinação do teor de ligante asfáltico de projeto.

Na utilização do método Marshall, Francken et al. (1997) ressaltam que os procedimentos laboratoriais não são sempre semelhantes, resultando em dispersões significativas entre os teores de projeto para mesmas composições de agregados minerais, o que reflete sobre o desempenho em campo. Com relação à metodologia Marshall, os autores consideram a necessidade de revisão de normas, definições, equipamentos, procedimentos de preparação de amostras, calibrações e interpretações de resultados, de forma a se buscar o aprimoramento constante dos técnicos e a melhorar a reprodutibilidade e a confiabilidade dos resultados.

Adicionalmente, Bernucci et al. (2008) realçam a importância de que sejam compatibilizadas as características mecânicas do revestimento asfáltico e das demais camadas da estrutura de um pavimento, o que não é garantido quando se obtém o teor de projeto a partir dos requisitos volumétricos tradicionais do método Marshall. Nesse sentido, os autores sugerem que, quando da utilização do método, sejam consideradas propriedades mecânicas mais representativas do comportamento estrutural da camada de revestimento asfáltico, tais como aquelas derivadas dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral, de módulo de resiliência e de vida de fadiga.

Nesse contexto, foi proposta uma nova técnica de dosagem experimental de misturas asfálticas, denominada Superpave (AASHTO, 2001), a qual se baseia na estimativa de um teor provável de ligante asfáltico de projeto, por meio da fixação do volume de vazios da mistura asfáltica compactada e do atendimento a critérios granulométricos específicos para a composição de agregados minerais (pontos de controle). A metodologia de dosagem Superpave, de utilização ainda restrita nos centros de pesquisa rodoviária do país e, conseqüentemente, de aplicação igualmente restrita na prática rodoviária nacional, representa um avanço nas metodologias de dosagem de misturas asfálticas, pois simula melhor as condições de campo, considerando variáveis climáticas e de tráfego como parâmetros na escolha dos materiais usados na mistura. Dentre as pesquisas realizadas no Brasil e que envolvem a aplicação dessa metodologia, podem ser citados os trabalhos de Motta et al. (1996), Vasconcelos (2004) e Marques (2004).

Comparativamente ao método Marshall, além dos já citados critérios granulométricos e volumétricos, a metodologia Superpave diferencia-se pela forma de compactação da mistura, a qual se dá por amassamento e é julgada como mais representativa da compactação de campo, limitando a suscetibilidade do pavimento às patologias estruturais mais comuns decorrentes de deficiências do processo de compactação, tais como os afundamentos nas trilhas de rodas (BERNUCCI ET AL., 2008).

Estudo realizado por Oliveira Filho (2007), para granulometrias com Tamanho Máximo Nominal (TMN) de 12,5 mm, mostrou que a compactação Marshall parece produzir misturas com rigidez inferior e com uma menor vida de fadiga que as produzidas com o compactador giratório Superpave (CGS). Esse resultado corrobora o estudo de Vasconcelos (2004), que observou uma maior vida de fadiga para amostras compactadas no CGS, em relação às misturas dosadas e compactadas pelo método Marshall, o que pode ter ocorrido, segundo o autor, por um melhor arranjo dos agregados após a compactação por amassamento.

1.1. Misturas asfálticas a quente

As misturas asfálticas a quente são as mais empregadas no revestimento de pavimentos flexíveis no Brasil. Essas misturas consistem na combinação de material asfáltico, agregados e materiais finos, eventualmente com adição de aditivos ou produtos especiais, misturados de maneira uniforme, de modo a produzir uma massa homogênea. Segundo Pinto e Preussler (2010) nas misturas asfálticas a quente, os métodos de projeto visam determinar o teor ótimo de ligante asfáltico para que as camadas funcionem satisfatoriamente para as características de estabilidade e durabilidade.

Para Bernucci et al. (2008), as misturas asfálticas a quente podem ser subdivididas pela graduação dos seus agregados componentes, destacando-se três tipos mais usuais: (i) graduação densa, onde a curva granulométrica é contínua e bem graduada, gerando um esqueleto mineral com poucos vazios (exemplo: concreto asfáltico – CA); (ii) graduação aberta, em que a curva granulométrica é uniforme, com agregados praticamente do mesmo tamanho, gerando misturas asfálticas com elevado volume de vazios, o que objetiva tornar a mistura asfáltica drenante, e

possibilitando a percolação de água pelo interior da mistura asfáltica (exemplo: mistura asfáltica drenante, conhecida no Brasil como camada porosa de atrito – CPA); e (iii) graduação descontínua, em que na curva granulométrica predominam os grãos de maior dimensão em relação aos grãos de dimensão intermediária, completados por certa quantidade de finos, produzindo um esqueleto mineral mais resistente à deformação permanente, com maior número de contatos entre os agregados graúdos (exemplo: matriz pétrea asfáltica – SMA – e mistura sem agregados de certa graduação – GAP-GRADED).

Já Balbo (2007) acrescenta que o concreto asfáltico usinado a quente (CAUQ) ou simplesmente concreto asfáltico (CA) é a mistura asfáltica a quente mais utilizada no país, caracterizando-o como material para construção de revestimentos de pavimentos, nos quais se incluem as capas de rolamento e as camadas de ligação (binder). O CAUQ é obtido pela mistura e homogeneização de agregados minerais (naturais ou artificiais, britados ou em sua forma disponível), em geral bem graduados, com algum material fino de enchimento – fíler (pó de pedra, finos calcários ou cimento Portland) e com cimento asfáltico de petróleo (CAP).

Pinto e Preussler (2010) entendem que as principais funções de uma mistura asfáltica, utilizada como componente estrutural do pavimento, são: resistir às forças abrasivas do tráfego; reduzir a penetração de água superficial no pavimento; proporcionar uma superfície resistente ao deslizamento dos veículos; e proporcionar um rolamento suave e uniforme ao tráfego. Para isso, é necessário que a mistura asfáltica apresente uma boa graduação dos agregados e uma porcentagem adequada de ligante asfáltico, para que seja durável e resistente a fraturas e desagregações, sem se tornar instável ao tráfego e às condições climáticas.

Para Roberts et al. (1996), as principais características que uma mistura asfáltica deve apresentar são: resistência à deformação permanente; resistência à fadiga; resistência ao trincamento em baixas temperaturas; durabilidade; resistência ao dano pela água; resistência ao polimento (derrapagem); e trabalhabilidade.

1.2 Método de dosagem Marshall

O método para o projeto de misturas asfálticas Marshall foi desenvolvido na década de 1940, nos Estados Unidos pelo engenheiro Bruce Marshall e

posteriormente aprimorado pelo exército norte-americano. Este método se tornou popular devido à simplicidade de execução, ao baixo custo e ao grande banco de dados de resultados encontrados, sendo o mais utilizado dentre todos os existentes. No Brasil, este método é especificado através do método de ensaio ME 043/95 (DNIT, 1995).

O método Marshall, ao longo dos anos, foi modificada para se adaptar à realidade do aumento de carga de roda e pressão de enchimento dos pneus dos veículos. Dentre as modificações, destacam-se a sugestão de novos critérios para a determinação da quantidade ótima de ligante asfáltico, que deveria ser a mais próxima dos valores correspondentes à estabilidade e à densidade aparente máximas, e a modificação de outros parâmetros, como porcentagem de vazios, relação betume/vazios, estabilidade e fluência, de acordo com uma realidade mais atual (ZEGARRA, 2007).

Segundo Tinajeros (2016), no Brasil, a compactação Marshall ainda é a mais utilizada e consiste na aplicação de um número definido de golpes com um soquete, que cai de uma altura pré-determinada, sobre a amostra de mistura asfáltica, dentro de um cilindro padronizado.

O método Marshall, basicamente, é executado em três etapas: (i) seleção dos agregados, de acordo com a faixa granulométrica de projeto, contidas nas especificações de serviços (por exemplo: DNIT, DER/SP e etc.); (ii) seleção do ligante asfáltico utilizado na mistura; e (iii) determinação do teor de ligante asfáltico, que geralmente está em torno de 4,0% a 6,0% em relação ao peso da mistura asfáltica. Para este método de dosagem, o teor de ligante é definido para que seja obtido um determinado volume de vazios na mistura, possibilitando a acomodação do ligante entre as partículas do agregado, quando da aplicação das cargas iniciais. Segundo o ME 043 (DNIT, 1995), o volume de vazios da faixa de rolamento (capa) deve estar compreendido entre 3,0% e 5,0% e para a faixa de ligação (binder) entre 4,0% e 6,0%.

São aplicados 75 golpes em cada face do corpo de prova, com um soquete de 4,5 kg, podendo-se utilizar o compactador mecânico ou manual, sendo o primeiro o mais empregado atualmente. O número de 75 golpes por face está relacionado a um revestimento que suportará a atuação de um tráfego com intensidade média a alta.

Para se estabelecer o teor de projeto pelo método Marshall, são avaliadas as características volumétricas do corpo de prova, tais como: massa específica aparente;

porcentagem de vazios; relação betume/vazios (RBV); vazios do agregado mineral (VAM); e parâmetros mecânicos da mistura, como estabilidade Marshall e fluência. Gráficos com esses valores são plotados e, a partir de uma média entre esses valores, define-se o teor de asfalto de projeto para a mistura. A especificação de serviço ES 031 (DNIT, 2006) estabelece limites para os parâmetros de dosagem de misturas destinadas às camadas de rolamento e de ligação, como se apresentam nas Tabelas 2.1 e 2.2.

Tabela 2.1 – Limites para os parâmetros volumétricos e mecânicos da dosagem Marshall

Parâmetros	Camada de Rolamento	Camada de Ligação
Vv (%)	3,0 a 5,0	4,0 a 6,0
RBV (%)	75 – 82	65 – 72
Estabilidade mínima (kgf)	500	500
Resistência à tração por compressão diametral estática, mínima (MPa)	0,65	0,65

Fonte: Adaptado da ES 031 (DNIT, 2006).

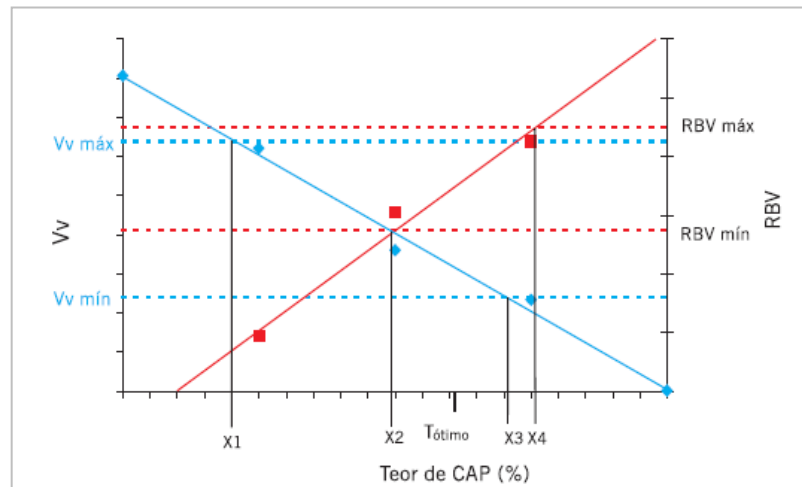
Tabela 2.2 – Limites para vazios no agregado mineral – VAM

Vazios do agregado mineral (%)	TMN	VAM
	9,5 mm	≥ 18
	12,5 mm	≥ 16
	19,1 mm	≥ 15

Fonte: Adaptado da ES 031 (DNIT, 2006).

Segundo Bernucci et al. (2008), outra forma de se obter o teor de projeto é através da relação Vv versus RBV. Anotando-se os valores médios de Vv e RBV obtidos para os cinco grupos de corpos de prova, testados inicialmente, traça-se um gráfico com o teor de ligante asfáltico (no eixo X) versus Vv (no eixo Y1) e RBV (no eixo Y2), e adiciona-se linhas de tendência para os valores encontrados dos dois parâmetros. O gráfico deve conter, ainda, os limites das duas variáveis (Vv e RBV). A partir das linhas de tendência do Vv e RBV, com os limites respectivos de cada um dos parâmetros, são determinados quatro teores de CAP (X1, X2, X3 e X4), definindo-se o teor de projeto a partir da média aritmética entre os valores centrais. A Figura 2.1 mostra essa forma de obtenção do teor de ligante de projeto, sendo para este exemplo o teor de ligante de projeto obtido da média aritmética de X2 e X3.

Figura 2.1 – Teor de ligante asfáltico versus volume vazios e relação betume vazios



Fonte: Adaptado de Bernucci et al. (2008).

Segundo Leandro (2016), os esforços de Bruce Marshall e do U. S. Army Corps of Engineers foram valiosos para o desenvolvimento do projeto de dosagem das misturas asfálticas, existindo, porém limitações no método de dosagem Marshall, principalmente pelo tipo de compactação não ser bem representativo da compactação executada em campo. Mesmo assim, embora tenham ocorrido avanços significativos para materiais e projetos de pavimentos, o método Marshall ainda se mantém como o de uso corrente no país, ainda que haja questionamentos a respeito de novos tipos de carregamentos, dos efeitos do clima e do tamanho da amostra produzida para a definição desta dosagem de mistura asfáltica.

1.3 Método de dosagem Superpave

Com a criação, na década de 1980, do SHRP, foi proposta uma nova metodologia para a dosagem de misturas asfálticas, denominada Superpave. Esse método foi concebido como alternativa e posterior substituição dos métodos Hveem e Marshall e está se tornando padrão para o projeto de misturas asfálticas a nível internacional. As misturas asfálticas dosadas pelo método Marshall têm cumprido o papel para o qual foram concebidas; porém, com o aumento do tráfego e com as cargas mais pesadas, observou-se a necessidade de criar um método de dosagem de misturas asfálticas mais eficiente, de onde se originou o Superpave (BARA' AL-MISTAREHI, 2014).

As normas para o sistema Superpave são publicadas e mantidas pela AASHTO, por meio do Subcomitê de Materiais. Esse subcomitê, composto por 50 associados, organizou um encontro em agosto de 1998, em Duluth, Minnesota, EUA, onde foi estabelecida uma comissão para considerar, preparar e recomendar mudanças nas normas de dosagem de misturas Superpave. O Subcomitê completou seu trabalho em novembro de 1998, propondo a revisão de quatro normas, com base em resultados de pesquisas, opinião de especialistas e experiências práticas, cuja intenção foi clarear e simplificar o processo de dosagem (MARQUES, 2004).

Segundo Marques (2004), a aplicação do sistema Superpave depende do volume de tráfego ou de outra forma de classificação funcional da rodovia. Nesse sentido, foram desenvolvidos três níveis de projeto de misturas:

O nível 1 é para tráfego com carga de eixo equivalente (ESAL – Equivalent Axle Loads) abaixo de 10^6 . Requer apenas o projeto volumétrico. Engloba a moldagem de corpos de prova usando o compactador giratório Superpave (CGS) e a seleção do teor de ligante é baseada na porcentagem de vazios (V_a), nos vazios do agregado mineral (VAM), na porcentagem de vazios preenchidos com asfalto (VFA) e na razão pó/asfalto.

O nível 2 é para tráfego com ESAL entre 10^6 e 10^7 . Usa-se o projeto volumétrico como ponto de partida e uma bateria de testes com os equipamentos: analisador de cisalhamento Superpave (Superpave shear tester – SST) e analisador de tração indireta (indirect tensile tester – IDT). Estes são testes de predição de desempenho.

Já o nível 3 é para tráfego com ESAL acima de 10^7 . Engloba os passos dos níveis 1 e 2 e testes adicionais com o SST e IDT em uma faixa mais ampla de temperatura e ensaios com corpos de prova confinados (Testes de Predição Estendidos). A previsão de desempenho do nível 3 é mais confiável, pois se baseia num grupo maior de ensaios.

O número de giros de projeto no compactador giratório Superpave (CGS) é determinado através do volume de tráfego de projeto, conforme aponta a FHWA (2002) e se apresenta na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Número de giros em função do volume de tráfego

Números de Giros			N – Repetições do eixo padrão	Tráfego
N _{mínimo}	N _{projeto}	N _{máximo}		
6	50	75	$< 3 \times 10^5$	Muito leve
7	75	115	3×10^6 a 1×10^7	Médio
8	100	160	1×10^7 a 3×10^7	Médio a alto
9	125	205	$> 3 \times 10^7$	Alto

Fonte: Adaptado de FHWA (2002).

O teor de projeto pelo método Superpave é definido a partir da escolha de três curvas granulométricas, sendo uma graúda, outra intermediária e a terceira, de graduação miúda. O teor de ligante asfáltico inicial (P_{li}) utilizado será igual para as três curvas granulométricas, assim como o número de giros. A partir dos resultados obtidos nesta etapa, define-se a curva granulométrica a ser utilizada e determina-se o teor de ligante, obedecendo-se aos critérios do método. Isto é, volume de vazios de 4% para o $N_{projeto}$, volume de vazios maior do que 2% para o $N_{máximo}$, ou massa específica aparente maior do que 98% da Gmm (densidade máxima medida), e volume de vazios maior do que 11% para o $N_{mínimo}$, ou massa específica aparente maior que 89% da Gmm.

Para Moura (2010), o procedimento de dosagem Superpave recomenda que o ligante asfáltico seja avaliado quanto ao Performance Grade (PG), isto é grau de desempenho quando a rodovia apresenta condições mais severas de tráfego e com trechos em aclave, o que determina deslocamentos em baixas velocidades, e ainda para regiões que apresentam temperaturas médias elevadas. Para este trabalho, o ligante asfáltico não foi avaliado quanto ao PG.

O grau de desempenho do ligante é designado pelas letras PG seguidas por dois números (por exemplo: PG (64-22)). O primeiro número é o “grau a alta temperatura”, que é a temperatura mais alta em que o ligante possui propriedades físicas adequadas. Deve ser comparada à temperatura mais elevada que se espera do pavimento, no trecho onde vai ser usado este ligante asfáltico. O segundo número é o “grau a baixa temperatura”, que é a temperatura mais baixa em que o ligante possui propriedades físicas adequadas, e, da mesma forma deve ser comparada com a mínima temperatura do trecho onde o ligante será utilizado (MARQUES, 2004).

Para o método Superpave, outra característica importante a ser observada refere-se às propriedades dos agregados. Segundo o Advanced Asphalt Technologies (2011), como cerca de 85% do volume de uma mistura asfáltica é constituído pelos

agregados, o desempenho da mistura asfáltica é muito influenciado pelas características deles. Assim, é preciso que as propriedades dos agregados sejam muito bem conhecidas pelos projetistas, para se garantir o melhor desempenho de uma mistura asfáltica. Outra característica dos agregados utilizados pelo método Superpave é a adoção do tamanho máximo nominal (TMN). No procedimento de projeto de uma mistura asfáltica dosada pelo método Superpave, o TMN do agregado é definido como um tamanho de peneira maior que o primeiro tamanho de peneira que reter 10% ou mais do total de agregado em massa.

O Advanced Asphalt Technologies (2011) descreve também, as denominadas propriedades de consenso e origem dos agregados, que devem ser atendidas para que estes sejam aceitos em uma mistura asfáltica dosada pelo método Superpave. Deve obedecer ainda aos critérios de angularidade, teor de argila e percentual de partículas planas e alongadas dos agregados.

O sistema Superpave tem apresentado sucesso em vários aspectos, principalmente com relação à avaliação dos ligantes asfálticos. Quanto ao desempenho em campo das misturas projetadas por essa metodologia, o sucesso é evidente em termos de resistência ao afundamento em trilha de rodas.

No entanto, agências rodoviárias americanas têm apresentado preocupações quanto ao trincamento e à permeabilidade dos revestimentos com misturas dosadas através do método Superpave (LEANDRO, 2016). O autor ainda refere que tal situação tem motivado a modificação da sistemática de dosagem de modo a tratar os problemas verificados, além de outros associados aos materiais e condições específicas de cada região. Desde a implantação do Superpave, pesquisas têm sido desenvolvidas de modo a aperfeiçoar vários aspectos desse sistema, incluindo requisitos volumétricos, níveis de compactação e especificação para agregados, bem como distribuição granulométrica.

1.4 Deformação permanente

A tendência de ocorrerem carregamentos mais pesados e pressões de enchimento maiores dos pneus, juntamente com o substancial aumento do número de repetições de aplicação de carga, tem aumentado significativamente a importância do fenômeno de deformação permanente (MAJIDZADEH, 1976).

Segundo Mugayar (2004), o carregamento produz um efeito mais danoso em relação à deformação permanente que a pressão de enchimento dos pneus e as condições climáticas, nas seções dos pavimentos estudados, ou seja, o aumento da capacidade de carga dos veículos se transforma em danos mais severos ao pavimento.

Entre os diversos defeitos a que está sujeito um pavimento, a deformação permanente em trilha de roda ou afundamento da trilha de roda (ATR) da camada de rolamento é um dos mais importantes, pois além de propiciar uma degradação acelerada da estrutura do pavimento, reduz consideravelmente o conforto ao rolamento, a segurança do usuário e, ainda, aumenta os custos operacionais (MOURA, 2010).

Já Medina e Motta (2015), apontam que o estudo das deformações permanentes em misturas asfálticas deve ser considerado como um problema à parte, sendo necessário dosar as misturas de modo que resistam ao esforço do tráfego e à ação climática, utilizando ensaios próprios que procurem simular as solicitações do tráfego, em condições de temperatura controlada. Os autores ressaltam também que o tipo de ligante asfáltico e principalmente a granulometria do agregado exercem grande influência sobre o desempenho da mistura asfáltica. Quanto mais grossa a granulometria, melhor o embricamento do esqueleto mineral e, combinado com um ligante asfáltico mais consistente, melhor é o desempenho em relação ao fenômeno de deformação permanente. Para o revestimento de concreto asfáltico, observou-se uma contribuição desta camada da ordem de 32% da deformação permanente do pavimento (MEDINA e MOTTA, 2015).

Ferreira, Soares e Bastos (2016), também indicam que a escolha de uma granulometria inadequada tende a favorecer o desenvolvimento precoce de deformação permanente, sendo uma consequência imediata dessa escolha a possibilidade de uma composição de misturas asfálticas com pouca estabilidade do esqueleto pétreo e com reduzido intertravamento entre as partículas, portanto, com reduzida resistência à deformação permanente.

Os efeitos da morfologia do agregado gráudo na resistência à deformação permanente têm sido objetos de diversos estudos, incluindo a angularidade, textura e forma global das partículas a partir de observações de campo e de laboratório. Esses estudos evidenciam que misturas asfálticas com partículas angulares e/ ou rugosas

favorecem a maior estabilidade da estrutura de agregado (LEANDRO, 2016). Para Bessa et al. (2014), de maneira geral, a mineralogia dos agregados não afeta diretamente o comportamento mecânico das misturas asfálticas densas; portanto, se os parâmetros de forma forem similares, agregados com mineralogias diferentes podem resultar em comportamentos mecânicos semelhantes.

Moura (2010) mostra que uma seleção criteriosa da graduação dos agregados e do tipo de ligante empregado, além de um controle rigoroso na dosagem da mistura asfáltica e do acompanhamento de ensaios mecânicos que possam prever o seu comportamento, são imprescindíveis para a criação de uma mistura asfáltica que tenha bom desempenho nesse parâmetro, principalmente para aquelas empregadas em vias de tráfego pesado.

Para Bernucci et al. (2008), a deformação permanente pode ocorrer no revestimento, nas subcamadas do pavimento ou ainda por uma combinação de efeitos. Nas camadas não asfálticas, a deformação permanente pode ocorrer por densificação devido ao tráfego e também por ruptura ao cisalhamento. Já a deformação permanente em misturas asfálticas ocorre devido a uma combinação do fluxo do material (viscoelástico ou viscoplástico) e do dano, neste material, através da formação e propagação de trincas. Para uma mistura resistente à deformação permanente, os fatores mais influentes são a consistência do ligante asfáltico e a volumetria da mistura asfáltica. Na Figura 2.2, apresentam-se os dois tipos de deformação permanente que ocorrem em pavimentos flexíveis, sendo que na roda esquerda a deformação ocorre apenas na camada de revestimento e na roda direita no revestimento e na camada subjacente.

Figura 2.2 – Deformações permanentes em pavimentos asfálticos



Fonte: Adaptado de Bernucci et al. (2008).

Para Mugayar (2004), são muitas as variáveis que influenciam na deformação permanente de uma mistura asfáltica, incluindo volume de vazios, número de aplicação da carga e fatores climáticos, como a temperatura; porém, nenhum desses fatores prediz adequadamente este tipo de defeito.

Por fim, Moura (2010) refere que as misturas asfálticas densas e bem graduadas podem oferecer resistência suficiente para evitar a ocorrência de trilhas de rodas, observando a macrotextura resultante dos revestimentos asfálticos para que não sejam geradas misturas asfálticas fechadas ou muito fechadas. Dessa forma, as misturas asfálticas com graduação descontínua apresentam-se como uma alternativa importante para reduzir a deformação permanente; porém, devem ser bem dimensionadas quanto à sua graduação e escolha do tipo de ligante asfáltico.

1.5 Fluência por compressão uniaxial

Como visto no item anterior, um dos principais defeitos em pavimentos asfálticos é a deformação permanente, materializada pela formação de afundamento por trilha de rodas (ATR). Para a consideração dos efeitos da deformação permanente em misturas asfálticas, são aplicados os ensaios de fluência por compressão uniaxial ou ensaios de creep, que podem ser estáticos ou dinâmicos. Segundo Motta et al. (2010), para a quantificação do potencial de uma mistura asfáltica sofrer os efeitos da deformação permanente ainda na fase de dosagem, foi desenvolvido o ensaio de

fluência por compressão uniaxial ou ensaio de creep. O ensaio pode ser realizado de forma estática ou dinâmica e é executado em diversos centros de pesquisas brasileiros. Porém, como apontam os autores, o fato de não existir uma norma para este tipo de ensaio leva à diversificação de execução do método entre os laboratórios, o que prejudica a comparação entre os resultados obtidos.

Para Ka Yan Ng (2013), a ocorrência de ruptura em misturas asfálticas relaciona-se à deformação devido à fluência, que é um fenômeno que ocorre em revestimentos asfálticos submetidos a carregamentos de longa duração ou ainda expostos a elevadas temperaturas, além de fatores como ligantes asfálticos de baixa consistência ou misturas asfálticas com alto teor de ligante. Ainda aponta Little et al. (1993) que os ensaios de carregamentos cíclicos ou fluência por compressão uniaxial dinâmica permitem retratar melhor a suscetibilidade das misturas asfálticas ao fenômeno de deformação permanente; porém, o ensaio de fluência por compressão uniaxial estática também pode ser utilizado, com a vantagem de ser utilizado um equipamento simples e com baixo custo de execução.

1.5.1 Fluência por compressão uniaxial estática

O ensaio de creep estático foi desenvolvido a partir de modelos teóricos que permitem avaliar a deformação ocorrida nas misturas asfálticas. Esses modelos foram desenvolvidos com base nas teorias estabelecidas por Hills (1973), que consideram as misturas asfálticas como sistemas constituídos de partículas de agregado mineral envolvidas por películas de ligante asfáltico e a presença de vazios entre as partículas (KA YAN NG, 2013).

Segundo esses autores, para a sistematização dos modelos, considerou-se um comportamento viscoelástico para as misturas asfálticas e a proporcionalidade entre as tensões e deformações. Em seguida, foram montados três modelos de deformação a partir do isolamento de um par de partículas de agregado mineral e estas foram separadas por uma película de ligante asfáltico. Os objetivos desses modelos foram retratar o comportamento mecânico de uma mistura no momento em que é submetida à fluência e prever a sua deformação após um carregamento de longa duração, considerando que o movimento relativo das partículas do agregado promove diversos arranjos que atendem às condições de equilíbrio. Mas o processo

não é completamente reversível, pois no momento do descarregamento, o equilíbrio é alcançado com a recuperação da componente elástica retardada.

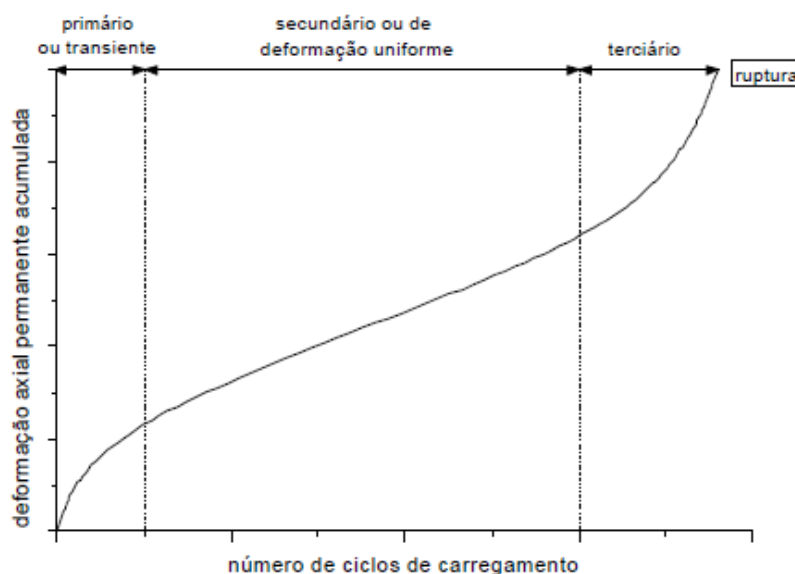
Segundo Bernucci et al. (2008), o ensaio de fluência por compressão uniaxial estática ou simplesmente creep estático se baseia na aplicação de cargas de compressão estática com valores constantes, geralmente em corpos de prova cilíndricos. No sentido axial do corpo de prova é aplicada a compressão uniaxial, mantendo-se a amostra em temperatura constante e padronizada.

Roberts et al. (1996) descrevem que o ensaio de fluência por compressão uniaxial estática apresenta três condições de carregamento: uniaxial estático com confinamento; uniaxial estático sem confinamento; e tração indireta. Para as duas primeiras condições, o objetivo é prever a deformação permanente, para a última, é verificar o potencial de formação de trincas em baixa temperatura. Entre os três ensaios possíveis, o mais utilizado é o ensaio de carga uniaxial estática sem confinamento, pela facilidade de manuseio e pelo baixo custo apresentado.

Após o processo de carregamento e descarregamento do corpo de prova, é possível determinar os seguintes parâmetros: deformação total, deformação permanente ou total após o período de recuperação, deformação recuperável ou elástica, módulo de fluência e inclinação da curva (SOARES, 2014).

Os resultados de testes obtidos por Mohamed e Yue (1994) demonstram que a deformação permanente axial acumulada a partir do aumento do número de solicitações pode ser dividida em três estágios diferentes, conforme se apresenta na Figura 2.3.

Figura 2.3 – Estágios de deformação permanente axial acumulada



Fonte: Adaptado de Mohamed e Yue (1994).

Para Mugayar (2004), ocorrem grandes deformações em um curto período de tempo para o primeiro estágio, o que indica uma taxa elevada de deformação (inclinação da curva), implicando em um decréscimo da altura do corpo de prova, já nos primeiros segundos em que a carga é aplicada. Já para o segundo estágio, a taxa de acúmulo da deformação permanente varia a uma taxa constante (K), que é utilizada para a avaliação do potencial de deformação permanente de diferentes misturas asfálticas. A inclinação da curva nesse segundo estágio indica a suscetibilidade da mistura asfáltica à deformação permanente, quanto maior a inclinação da curva neste estágio, maior será a deformação permanente. O terceiro estágio está relacionado à formação de trincas, sendo a não homogeneidade da mistura asfáltica, a excentricidade da placa de carregamento e a inclinação da superfície da amostra fatores que podem gerar falhas prematuras.

Ka Yan Ng (2013) destaca que o módulo de fluência relaciona a tensão aplicada e a deformação relativa das misturas asfálticas em ensaios de fluência por compressão uniaxial estática, indicando que misturas asfálticas com módulo de fluência mais elevado resistem melhor à deformação permanente.

Mugayar (2004) refere que alguns pesquisadores utilizaram os valores do módulo de fluência para caracterizar as misturas asfálticas quanto à resistência à deformação permanente. A Tabela 2.4 mostra alguns critérios que empregam a limitação do módulo de fluência.

Tabela 2.4 – Alguns critérios para controle da deformação permanente com base na limitação do módulo de fluência

Critério	Tempo de carregamento (minuto)	Temp. do Ensaio (°C)	Nível de Tensão (MPa)	Módulo de Fluência Mínimo (MPa)	Condições
Von Quintus et al. (1991)	60	40	0,345 a 0,414	68,9	Concreto asfáltico sobre base rígida
				55,1	Superfície de uma camada de concreto asfáltico espessa
				27,6	Revestimento Superficial
Viljoen e Meadows (1981)	100	40	0,207	82,7	-
Khedr (1986)	60	40	0,207	137,9	-
Kronfuss et al. (1984)	60	40	0,103	20,7	Intensidade de tráfego baixa
				20,7	Intensidade de tráfego moderada
				31	Intensidade de tráfego alta
Souza et al. (1991)	60	40	0,207	69	-

Fonte: Adaptado de Simões (2018).

Little et al. (1993) estabeleceram critérios para analisar o comportamento da mistura asfáltica quanto à deformação permanente, com base em dados fornecidos pelo Instituto de Transportes do Texas, e que visam minimizar o potencial de deformação permanente. Na Tabela 2.5, apresentam-se os critérios relacionados à deformação total após uma hora de ensaio e a inclinação da curva de fluência no estágio secundário, o qual foi adotado por representar o trecho de inclinação constante para a curva deformação versus tempo de carregamento.

Tabela 2.5 – Valores limites para a deformação após 1 hora de ensaio de creep e para inclinação da curva de fluência no estágio secundário

Deformação Total após 1h de Ensaio (%)	Inclinação da Curva de Fluência no Estágio Secundário					
	< 0,17	< 0,20	< 0,25	< 0,30	< 0,35	< 0,40
< 0,25	IV ²	IV ²	IV ²	IV ²	IV ²	III
< 0,40	IV ²	IV ²	IV ²	III ²	III ²	III ²
< 0,50	IV ²	IV ²	III ²	III ²	III ²	II
< 0,80	III ²	III ²	II	II	II	II
< 1,0	I	I	I	I	I ¹	-
< 1,2	I ¹	I ¹	I ¹	-	-	-

Fonte: Adaptado de Little (1993).

(1) Deve apresentar deformação permanente <0,8% aos 1800s de carregamento. (2) Deve respeitar o seguinte critério: $\epsilon_p < 0,5\epsilon_{qu} + \epsilon_{rp}$.

Onde:

I – Intensidade de tráfego baixa < 10⁵ ESALs;

II – Intensidade de tráfego moderada: entre 10⁵ e 5 x 10⁵ ESALs;

III – Intensidade de tráfego alta: entre 5 x 10⁵ e 10⁶ ESALs;

IV – Intensidade de tráfego muito alta: > 10⁶ ESALs;

ϵ_p – Deformação permanente após 3600s de carregamento (ASTM D 3497);

ϵ_{rp} – Deformação elástica total após 3600s de carregamento (ASTM D 3497);

ϵ_{qu} – Deformação obtida pelo ensaio de compressão não confinada (AASHTO T 167);

ESALs = Solicitação equivalente do eixo padrão de 8,2t.

1.6 Fadiga

A deformação elástica ocasionada pela repetição das cargas do tráfego pode levar o revestimento asfáltico à fadiga, que se evidencia na forma de trincamentos. A resistência à fadiga de uma mistura asfáltica, característica também chamada de flexibilidade, pode ser definida como a capacidade de resistir a esforços repetitivos de flexão, sem se romper. A fadiga pode ocorrer mesmo quando são aplicados carregamentos repetitivos bem menores que a carga de ruptura estática do material (SANTANNA-GRECO, 2004).

O fenômeno de fadiga pode ser descrito como a diminuição da resistência de um material por efeito de solicitações repetidas. Quando o tráfego circula sobre a

estrutura de um pavimento, aplica-se num curto espaço de tempo um grande número de solicitações nas suas diferentes camadas. A sucessiva aplicação de cargas pode dar origem à ocorrência de fadiga nos materiais, induzindo o desenvolvimento de trincas, motivadas pela diminuição da capacidade do material em suportar as cargas, ante a ação contínua de tensões de tração (IWANAGA, 2007).

A ASTM define a fadiga como:

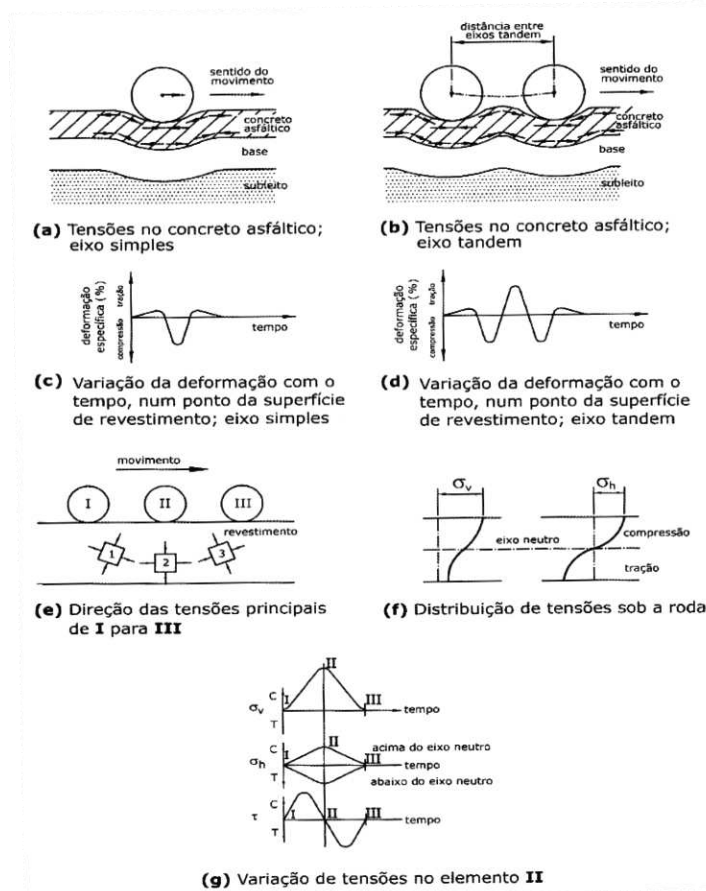
O processo da mudança estrutural permanente, progressiva e localizada, que ocorre em um ponto do material, sujeito a tensões variáveis que produzem as fissuras que conduzem para totalizar a falha após um determinado número de ciclos (ASTM, 1979).

MENDES (2011) acrescenta que a fadiga ocorre por meio de ações mecânicas e/ou térmicas, que isoladamente não parecem ser críticas, mas que na verdade são decisivas para a vida útil do material.

A vida de fadiga de uma mistura asfáltica é definida em termos de vida de fratura (N_f) e vida de serviço (N_s). A primeira se refere ao número total de aplicações de uma determinada carga, necessário à fratura completa da amostra; a segunda (N_s), ao número total de aplicações desta mesma carga, capaz de reduzir o desempenho ou a rigidez inicial da amostra a um nível pré-estabelecido (MOTTA et al., 2010).

A repetição das cargas das rodas dos veículos provoca flexão na camada de concreto asfáltico do revestimento betuminoso. Iniciam-se trincas, geralmente, na parte inferior do revestimento, que se propagam para cima até atingir a superfície. Em revestimentos muito espessos, de 20cm ou mais, podem-se iniciar trincas na superfície pela curvatura convexa próxima às rodas (MEDINA e MOTTA, 2015). De acordo com esses autores, a Figura 2.4 apresenta, de modo esquemático, as deformações desenvolvidas num revestimento de concreto asfáltico sob a passagem das rodas de um veículo. É possível observar que as tensões principais nos planos horizontal e vertical só ocorrem quando a roda está verticalmente acima, como no elemento 2 (e). Em outras posições da roda, atuam tensões cisalhantes (t), como se indica em (g).

Figura 2.4 – Deformações e tensões no revestimento asfáltico



Fonte: Adaptado de Medina e Motta (2015).

Para Rossato (2015), o processo de fadiga é proveniente da perda de resistência que o material sofre quando solicitado por uma carga frequente. Esse processo pode ser resumido com as seguintes definições:

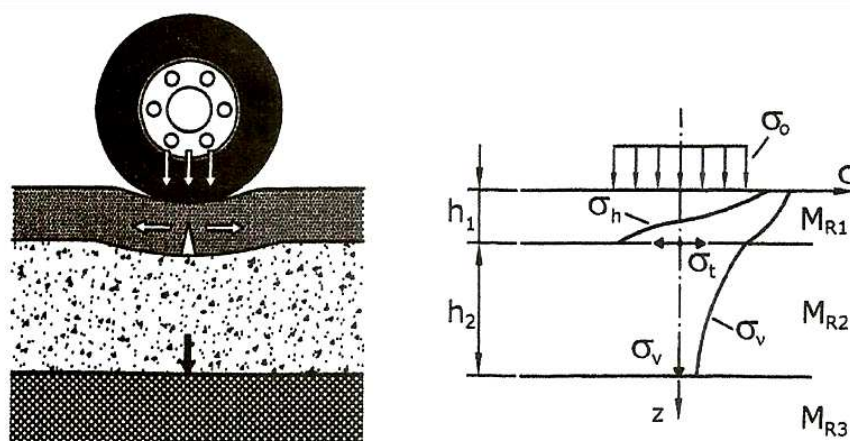
- Ensaio de Fadiga: material submetido à sollicitação, em que há evolução de modo irreversível para um estágio final de ruptura ou estabilização;
- Suscetibilidade à Fadiga: taxa de variação da resistência ao curso dos ciclos de carga;
- Duração de Vida: número de ciclos necessários para que uma sollicitação provoque a ruína;
- Resistência à Fadiga: sollicitação (tensão ou deformação) a que corresponde uma determinada duração de vida; e
- Limite de Fadiga: sollicitação que conduz a uma duração de vida infinita.

Rossato (2015) cita que as manifestações em campo do aparecimento do fenômeno de fadiga estão relacionadas ao surgimento de trincas nos revestimentos

que, por sua vez, estão relacionadas com questões estruturais do pavimento ligadas à redução da sua capacidade de suportar as cargas do tráfego, podendo o aparecimento destas trincas ser relacionado a vários fatores.

Geralmente as trincas por fadiga ocorrem primeiramente na superfície inferior da capa asfáltica, onde as forças de tração são maiores sob a carga de roda, evidenciando a tese de que os revestimentos asfálticos são mais resistentes a carregamentos repetidos de compressão do que de tração (BERNUCCI et al. 2008). A Figura 2.5 ilustra a distribuição de tensões em um pavimento.

Figura 2.5 – Distribuição de tensões em um pavimento



Fonte: Adaptado de Medina e Motta (2015).

Uma ressalva importante foi apresentada por Rossato (2015), que descreve que o fenômeno de fadiga não deve ser confundido com o de fissuração “*Top Down*”. Neste processo de degradação, semelhante à fadiga, as fissuras se desenvolvem na superfície da camada de rolamento e a partir daí se propagam para as camadas inferiores do revestimento asfáltico. Grande concentração de tensões verticais no contato entre pneu e pavimento podem desencadear trincas no topo da capa asfáltica, provocando cisalhamento nessa área.

1.7 Programa computacional Elsym5

Segundo Pinto e Preussler (2010), está disponível uma série de programas para o cálculo de tensões, deformações e deslocamentos em sistemas de camadas

elásticas, sendo o Elastic Layered Symmetrical (Elsym5) um dos mais utilizados. Esse programa foi desenvolvido na Universidade da Califórnia, em Berkeley, no ano de 1970, e posteriormente adaptado para computadores pessoais, em 1985. Uma de suas vantagens em relação à maioria dos programas dessa natureza é a possibilidade de o carregamento do sistema elástico se constituir por até dez cargas iguais, situadas em pontos quaisquer da superfície do pavimento. Essa característica torna seu uso bastante simples, não só para o caso de eixos rodoviários simples, mas também duplos e triplos, assim como para trens de pouso das grandes aeronaves.

São admitidas as hipóteses básicas relativas ao sistema de camadas elásticas de Burmister, sendo cada camada homogênea, isotrópica, linearmente elástica e ilimitada na direção horizontal. Cada camada tem uma espessura finita, exceto a inferior (subleito) que vai se estender a uma profundidade infinita. As condições de contorno e continuidade exigem contato contínuo das camadas, inexistência de tensões normais ou cisalhantes além da superfície carregada, e tensões e deflexões na camada inferior nulas a uma profundidade infinita. Admite-se que cada carga seja vertical e uniformemente distribuída em uma área circular, utilizando-se o princípio da superposição para considerar o efeito de várias cargas (PINTO e PREUSSLER, 2010).

O programa computacional Elsym5 de diferenças finitas pode ser aplicado em problemas de elasticidade linear em meios estratificados, com a solução de Burmister ampliada para cinco camadas, e utiliza o método das diferenças finitas na resolução das expressões. O número de cargas pode ser até dez e o número de pontos de análise até cem, 10 pares x-y em 10 profundidades z (MEDINA; MOTTA, 2015).

Ainda segundo Medina e Motta (2015), o método das diferenças finitas resolve problemas de valores no contorno de equações diferenciais ordinárias e as derivadas das equações diferenciais se calculam por meio de fórmulas aproximadas, numa série de pontos no domínio de integração do problema. Obtém-se um sistema de equações algébricas que permite calcular as incógnitas em pontos escolhidos. Aumentando-se o número de pontos, as soluções se aproximam da solução exata. Tem-se uma solução discreta do problema nos pontos considerados. A superposição dos efeitos causados por várias rodas é correta para o cálculo dos deslocamentos, mas aproximada para as tensões. Consideram-se as camadas homogêneas, isotrópicas e horizontalmente infinitas, sendo o subleito um meio semi-infinito. Cada camada deve

ter seu módulo de elasticidade constante e coeficiente de Poisson definidos nos dados de entrada.

Balbo (2007) observa que na década de 1960 foram desenvolvidas programações eletrônicas associadas ao emprego do método das diferenças finitas, apresentando-se programas computacionais que expandiram a teoria de sistemas de camadas elásticas (TSCE) para casos de n camadas. Nesta época foi desenvolvido o programa computacional Elsym5, que trata o problema de pavimentos com até cinco camadas e que, posteriormente, se tornou um dos mais populares programas de análise.

Neste trabalho de pesquisa, devido à sua grande aplicação e à sua facilidade de obtenção, o programa foi escolhido para realizar as comparações entre as estruturas de um pavimento hipotético, que utilizou as misturas asfálticas dosadas pelos métodos Marshall e Superpave.

REFERÊNCIAS

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO PP28**: Standard Practice for SUPERPAVE Volumetric Design for Hot-Mix Asphalt (HMA). 2001.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS. **Standard Test Method for Dynamic Modulus of Asphalt Mixtures**. ASTM E 206-72, USA: 1979.

BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica**: materiais, projeto e restauração. Oficina de textos, 560 p. São Paulo, 2007.

BARA', AL-M. (2014). **Global jornal of Researches in Engineering**: G Industrial Engineering. Volume 14 Issue 5 Version 1.0. Global Journals Inc. (USA).

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica** – Formação básica para engenheiros. PETROBRÁS: ABEDA. Rio de Janeiro, 2008.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE – CNT. **Pesquisa CNT de Rodovias 2017**: Relatório Gerencial. Confederação Nacional do Transporte. Brasília/DF: 2017. 406p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **ME 043/95**: Misturas betuminosas a quente – Ensaio Marshall para misturas betuminosas. Rio de Janeiro, 1995.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **ES 031/2006**: Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2006.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION – FHWA. **Superpave Asphalt Mixture Desing**. Estados Unidos, 2002. 78p.

FERREIRA, J. L. S., SOARES, J. B., BASTOS, J. B. S. Métodos de seleção granulométrica com foco na resistência à deformação permanente. **Revista Transportes**, v. 24, n. 2, p. 46-52. Rio de Janeiro, 2016.

FRANCKEN, L.; EUSTACCHIO, E.; ISACSSON, U.; PARTL, M.N. Recent activities of RILEM TC 152 – PBM – performance of bituminous materials. In: **International Conference of Asphalt Pavement**, 8, Seattle, USA, 1997.

IWANAGA, F. I. **Avaliação da Influência do Tipo de Agregado, do Tipo de Ligante, do Tipo de Moldagem e do Tipo de Filer na Vida de Fadiga das Misturas Asfálticas Densas**. Dissertação de mestrado. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, 2007.

LEANDRO, R. P. **Avaliação do comportamento mecânico de corpos de prova de misturas asfálticas a quente resultantes de diferentes métodos de compactação**. Tese de Doutorado. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2016.

KA YAN NG, A. **Contribuição ao Estudo da Deformação Permanente de Misturas Asfálticas Densas à Luz de Ensaios de Fluência por Compressão Uniaxial Estática e Dinâmica**. Dissertação de Mestrado. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, 2013.

MAJIDZDEH, K.; KHEDR, S.; GUIRGUIS, H. Laboratory verification of a mechanistic subgrade rutting model. **Transportation Research Record**. 616. p. 34-37. 1976.

MARQUES, G. L. O. **Utilização do Módulo de Resiliência como Critério de Dosagem de Mistura Asfáltica: Efeito da Compactação por Impacto e Giratória**. Rio de Janeiro, 2004.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. **Mecânica dos pavimentos**. 3. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2015.

MENDES, L. O. **Utilização do Método Bailey para Seleção de Agregados em Dosagem de Misturas Asfálticas**. Dissertação de Mestrado. Juiz de Fora: Universidade Federal de Juiz de Fora, 2011.

MOHAMED, H.H.; YUE, Z. Criteria for evaluation of rutting potential based on repetitive uniaxial compression test. **Transportation Research Record 1454**, p. 74-81. 1994.

MOTTA, L. M. G., TONIAL, I., LEITE, L. F. M.; CONSTANTINO, R. **Princípios do Projeto e Análise SUPERPAVE de Misturas Asfálticas**. Tradução Comentada. Instituto Brasileiro do Petróleo – IBP, 1996.

MOTTA, L. M. G.; RIBEIRO F. L. B.; ESTEFEN, S. F. **Estudo comparativo do Comportamento de Fadiga de Misturas Betuminosas com Diferentes Teores de Asflato**. PEC – 8650, UFRJ-COPPE. Rio de Janeiro, 2010. 294 p.

MOURA, E. **Estudo de deformação permanente em trilha de roda misturas asfálticas em pista e em laboratório**. 2010. Tese de Doutorado. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2010. 299p.

MUGAYAR, A. N. (2004). **Avaliação do Tipo de Asfalto e da Distribuição Granulométrica do Agregado nas Fluências Estática e Dinâmica de Misturas Asfálticas Densas**. Dissertação de Mestrado. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, 2004. 137 p.

OLIVEIRA FILHO, C. M. S. (2007). **Estudo do efeito de diferentes granulometrias no comportamento mecânico de misturas asfálticas densas descontínuas tipo Stone Matrix Asphalt (SMA)**. Dissertação de Mestrado. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 2007. 122 p.

PINTO, S.; PREUSSLER, E. **Pavimentação rodoviária – conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis**. Synergia: IBP. Rio de Janeiro: 2010. 220 p.

ROBERTS, F. L.; KANDHAL, P. S.; BROWN, E. R.; LEE, D. Y.; KENNEDY, T. W. Hot mix asphalt materials, mixture design, and construction. **National Asphalt Pavement Association Education Foundation**. 2 ed. Lanham, 1996. 604 p.

ROSSATO, F. P. **Avaliação do Fenômeno de Fadiga e das Propriedades Elásticas de Misturas Asfálticas com Diferentes Ligantes em Variadas Temperaturas**. Dissertação de Mestrado. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2015. 221 p.

SANTANNA-GRECO, J. A. **Avaliação da influência de alguns fatores nas propriedades mecânicas de misturas asfálticas, à luz da técnica de planejamento e análise de experimentos fatoriais fracionários assimétricos**. Tese de Doutorado. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, 2004. 367p.

SIMÕES, F. A. **Análise do Comportamento Mecânico em Fluência de Misturas Asfálticas Dosadas pela Metodologia Superpave**. Dissertação de Mestrado. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2018. 102p.

SOARES, J. S. **Investigação da Relação Entre Parâmetros da Compactação Giratória e de Deformação Permanente Em Misturas Asfálticas Densas**. Tese de Mestrado. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, 2014. 109p.

VASCONCELOS, K. L. **Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas a Quente Dosadas pelas Metodologias Marshall e Superpave com Diferentes**

Granulometrias. Dissertação de Mestrado. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 2004. 149p.

TINAJEROS, R. A. P. **Estudo do comportamento mecânico de misturas asfálticas a quente convencional e modificada com polímero.** Dissertação de Mestrado. Viçosa/MG: Universidade Federal de Viçosa, 2016. 177p.

ZEGARRA, J. R. E. **Avaliação de misturas produzidas com ligantes asfálticos peruanos convencional PEN 60/70 e modificados por polímero SBS TIPO I 60/60 E PG 76-22,** Dissertação de Mestrado. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, 2007.

Capítulo 3

1 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo contempla os materiais utilizados nesse trabalho de pesquisa e apresenta as metodologias de dosagem das misturas asfálticas, através dos métodos Marshall e Superpave. Ainda é descrita a metodologia utilizada para a caracterização mecânica dos corpos de prova submetidos aos ensaios de módulo de resiliência, fadiga e fluência por compressão uniaxial estático (creep estático).

Também é apresentada a metodologia para a análise estrutural de um pavimento pré-definido, utilizando-se o programa computacional Elsym5.

1.1 Materiais

1.1.1 Agregados

Para a realização dos estudos foram utilizados agregados graúdos (brita 1 e brita 0) e agregado miúdo (pó de pedra), todos de natureza mineral gnáissica, originário da Pedreira Ervália, localizada no município de Ervália, em Minas Gerais. Optou-se pela escolha desse agregado devido à sua grande utilização em obras de engenharia na cidade de Viçosa e em grande parte da região da Zona da Mata mineira.

A Tabela 3.1 apresenta a caracterização dos agregados utilizados nesse trabalho de pesquisa.

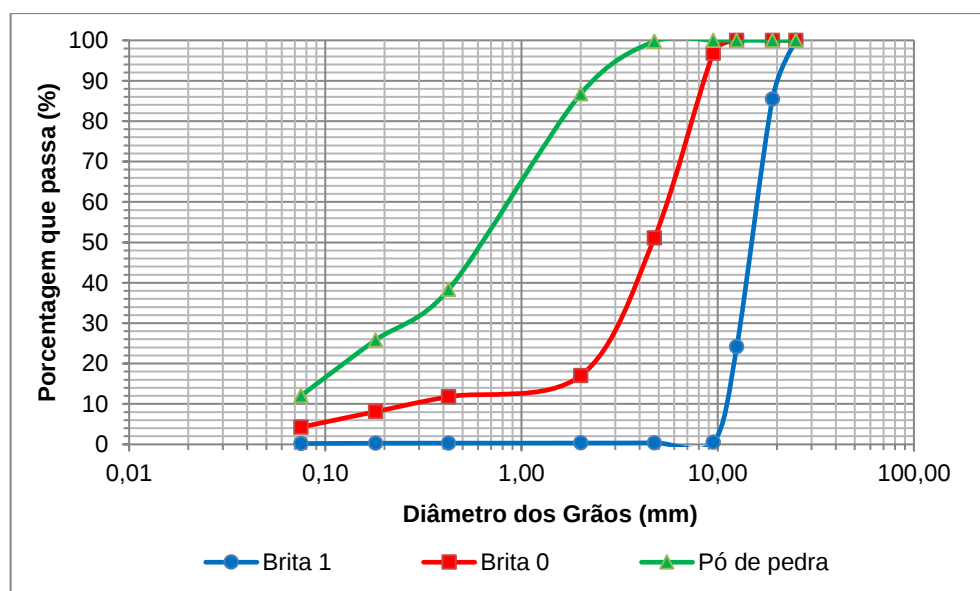
Tabela 3.1 – Caracterização dos agregados minerais empregados na pesquisa

ENSAIOS	NORMA TÉCNICA	RESULTADOS OBTIDOS
Índice de forma dos agregados graúdos	ME 086 (DNER, 1994c)	0,68
% de material pulverulento	ME 266 (DNER, 1997)	16,66%.
Abrasão "Los Angeles" dos agregados graúdos	ME 035 (DNER, 1998a)	45%
Adesividade dos agregados graúdos ao ligante betuminoso	ME 078 (DNER, 1994b)	Satisfatório com a adição de 0,1% de material dopante
Absorção - Brita 0	ME 081 (DNER, 1998b)	1,14%
Massa específica real Brita 0	ME 081 (DNER, 1998b)	2,794 g/cm ³
Massa específica e aparente - Brita 0	ME 081 (DNER, 1998b)	2,722 g/cm ³
Absorção - Brita 1	ME 081 (DNER, 1998b)	1,14%
Massa específica real - Brita 1	ME 081 (DNER, 1998b)	2,794 g/cm ³
Massa específica e aparente - Brita 1	ME 081 (DNER, 1998b)	2,722 g/cm ³
Massa específica do agregado miúdo	ME 194 (DNER, 1998d)	2,798 g/cm ³

Fonte: Autor.

A análise granulométrica dos agregados foi efetuada seguindo-se o que preconiza o ME 083 (DNER, 1998c), conforme Figura 3.1.

Figura 3.1 – Curva granulométrica dos agregados minerais empregados na nessa pesquisa



Fonte: Autor.

1.1.2 Ligante asfáltico

O ligante asfáltico utilizado nesta pesquisa foi o cimento asfáltico de petróleo (CAP) 50/70. Este material foi fornecido pela empresa Stratura Asfaltos S/A. As características físicas e reológicas do cimento asfáltico de petróleo são apresentadas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Caracterização do cimento asfáltico de petróleo (CAP 50/70)

ENSAIOS	NORMAS TÉCNICAS	RESULTADOS OBTIDOS
Penetração	ME 155 (DNIT, 2010d)	56,93
Ponto de amolecimento	ME 131 (DNIT, 2010a)	51°C
Ponto de fulgor	ME 148 (DNER, 1994d)	343°C
Ponto de combustão	ME 148 (DNER, 1994d)	365°C
Massa específica	ME 193 (DNER, 1996)	1,010 g/cm ³
Densidade relativa	ME 193 (DNER, 1996)	1,006 g/cm ³
RTFOT Penetração Retida	D 5 (ASTM, 2013)	67%
RTFOT - Aumento do Ponto de Amolecimento	D 36 (ASTM, 2014)	3,8°C
RTFOT - Ductilidade a 25GC	D 113 (ASTM, 2017)	>150 cm
RTFOT Variação em % Massa	D 2872 (ASTM, 2012)	-0,003%
Solubilidade no Tricloroetileno	D 2042 (ASTM, 2015)	100 %massa
Viscosidade Rotacional Brookfield, 135 °C	NBR 15184 (ABNT, 2004)	318 cP
Viscosidade Rotacional Brookfield, 155 °C		162 cP
Viscosidade Rotacional Brookfield, 170 °C		51 cP

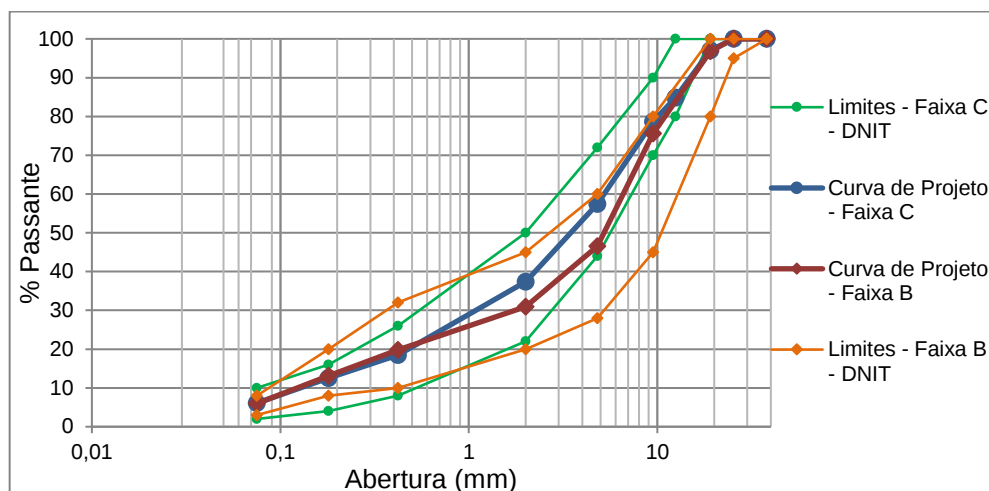
Fonte: Autor.

1.2 Métodos

1.2.1 Método de dosagem Marshall

Após a caracterização dos agregados, foram adotadas duas faixas de trabalho contidas na especificação de serviço ES 031 (DNIT, 2006), a saber, a faixa C, utilizada como camada de revestimento, e a faixa B, utilizada como camada de ligação. As curvas granulométricas dos agregados empregados nas misturas asfálticas são apresentadas na Figura 3.2, estando estas porcentagens compreendidas nos limites estipulados pela especificação de serviço ES 031 (DNIT, 2006).

Figura 3.2 – Curvas de projeto das Faixas granulométricas B e C – Marshall



Fonte: ES 031 (DNIT, 2006).

Para a dosagem das misturas asfálticas correspondentes às duas faixas granulométricas previamente definidas, foi empregado o método Marshall, segundo o método de ensaio ME 043 (DNER,1995).

Visando obter o teor de projeto, a partir da dosagem Marshall, foram adotados cinco teores de ligante e analisado o desempenho de cada mistura asfáltica para cada teor de ligante. Os teores experimentados foram 4,0%; 4,5%; 5,0%; 5,5% e 6,0% para a Faixa C, baseando-se em experiências de misturas asfálticas já produzidas no laboratório de Materiais Asfálticos e Misturas do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa – DEC/UFV – para os mesmos materiais, agregados e ligante asfáltico. Para a faixa B, os teores experimentados foram 3,5%; 4,0%; 4,5%; 5,0% e 5,5%, também admitidos a partir de experiências em misturas asfálticas já produzidas com estes materiais. Foram confeccionados três corpos de prova para cada teor. A mistura foi realizada com o ligante a 159°C e os agregados aquecidos a 174°C, sendo estas temperaturas obtidas através da curva de viscosidade-temperatura do ligante conforme recomenda o método de ensaio ME 004 (DNER, 1994).

A compactação desses corpos de prova foi realizada através do compactador Marshall, com um esforço de compactação de 75 golpes por face, como apresentado na ES 031 (DNIT, 2006).

Após a determinação dos parâmetros volumétricos e dos parâmetros mecânicos, estabilidade e fluência Marshall, segundo as prescrições da ME 043 (DNER, 1995), foram analisados os resultados, com base nas exigências da ES 031

(DNIT, 2006). Tais exigências são apresentadas na Tabela 3.3, com os valores limites aplicáveis à faixa granulométrica C e os aplicáveis a faixa granulométrica B.

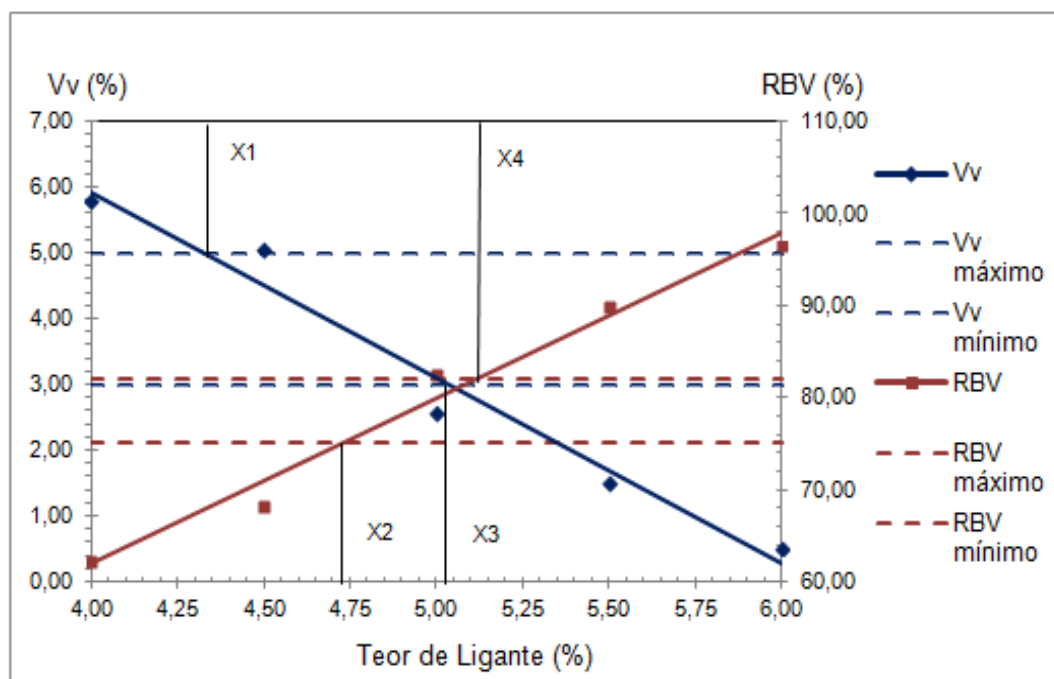
Tabela 3.3 – Limites para os parâmetros volumétricos e mecânicos da dosagem Marshall

Índices	FAIXA GRANULOMÉTRICA C	FAIXA GRANULOMÉTRICA B
Vv (%)	3,0 a 5,0	4,0 a 6,0
RBV (%)	75 – 82	65 – 72
Estabilidade mínima (kgf)	500	500
Resistência à tração por compressão diametral estática, mínima (MPa)	0,65	0,65

Fonte: Autor.

O teor de projeto de ligante asfáltico foi obtido mediante análise da variação do Volume de vazios (Vv) e da Relação Betume/Vazios (RBV) em função dos cinco teores de ligante adotados inicialmente, obedecendo os limites inferiores e superiores para cada parâmetro (Vv e RBV). A Tabela 3.3, supracitada, apresenta tais limites. A Figura 3.3 apresenta um exemplo do gráfico com os valores de Vv e RBV para cinco teores de ligante asfáltico.

Figura 3.3 – Teor de ligante asfáltico obtido através da relação Vv versus RBV



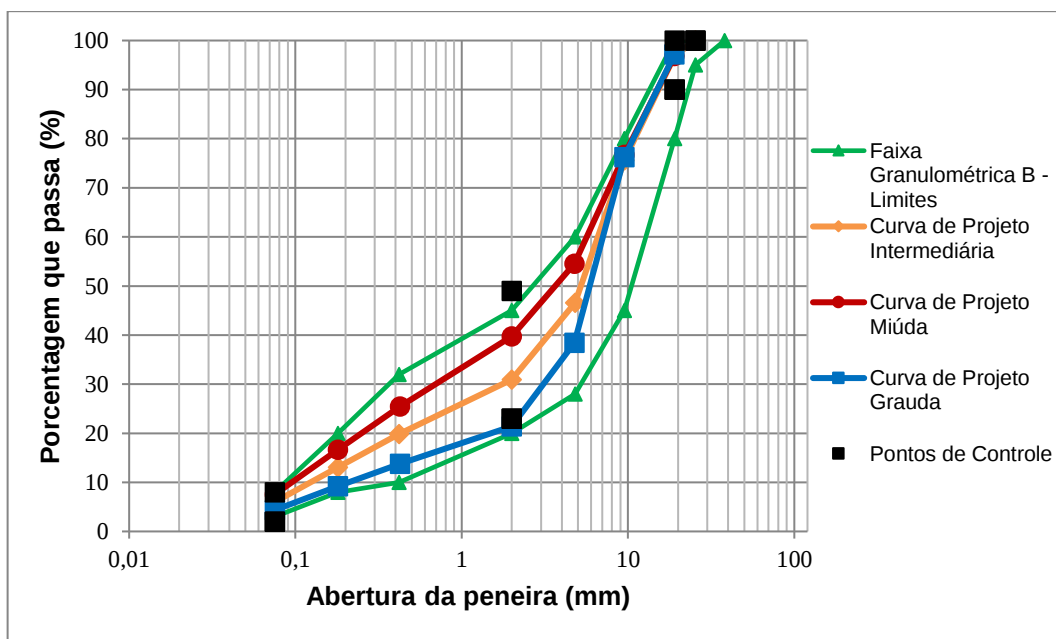
Fonte: Autor.

Através das linhas verticais X_1 , X_2 , X_3 e X_4 , é obtido o teor de ligante, por meio da média aritmética entre os dois valores centrais, que para o caso do exemplo acima, seria a média entre X_2 e X_3 . Após determinado o teor de ligante de projeto, são produzidos corpos de prova para os ensaios de estabilidade Marshall e de resistência à tração por compressão diametral e verificados os parâmetros volumétricos.

1.2.2 Método de dosagem Superpave

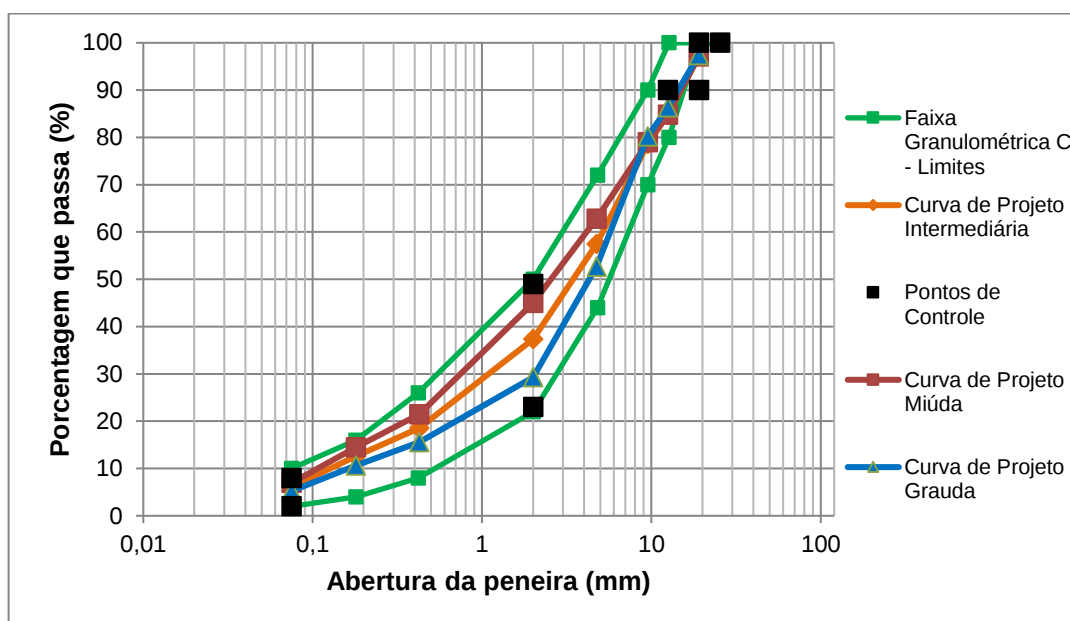
O método de dosagem Superpave adota, para a escolha da granulometria, o critério dos pontos de controle, ou seja, as curvas granulométricas utilizadas (graúda, miúda e intermediária) devem estar entre esses pontos de controle, mas a diferença mais relevante em relação ao método de dosagem Marshall é a adoção do sistema de compactação por amassamento. As curvas granulométricas dos agregados utilizados nas misturas asfálticas são apresentadas nas Figuras 3.4 e 3.5, estando estas porcentagens compreendidas nos limites estipulados pelos pontos de controle para o método de dosagem Superpave.

Figura 3.4 – Curva de projeto – Faixa granulométrica B – Superpave



Fonte: Autor.

Figura 3.5 – Curva de projeto – Faixa granulométrica C – Superpave



Fonte: Autor.

Após definidas as curvas granulométricas graúda, miúda e intermediária, são executados dois corpos de prova, com teor de ligante igual a uma porcentagem de ligante definida através de formulação empírica, indicada no método de dosagem Superpave. Para a definição do teor de ligante asfáltico inicial de projeto, utilizam-se expressões empíricas baseadas nos seguintes parâmetros: massa específica aparente e massa específica real da composição de agregados, fator de absorção desta composição, percentual de agregados na mistura, volume de vazios da mistura, massa específica do ligante e tamanho máximo nominal de peneira para a composição de agregados (BERNUCCI et. al. 2008).

Definido o teor de ligante inicial, adota-se a curva granulométrica que atender aos parâmetros exigidos pelo método Superpave, os quais são apresentados na Tabela 3.4. No caso deste trabalho, o tamanho nominal máximo do agregado foi de 19 mm, seguindo o que prescreve o método Superpave.

Tabela 3.4 – Valores limites para TMN (tamanho nominal máximo)

Parâmetros	Valores Limites
TMN	19,0 mm
Vv (%)	4,0
VAM (%)	≥ 13
RBV (%)	65 – 75
P/A	0,6 - 1,2

Fonte: Autor.

São executados então 2 corpos de prova no teor de ligante inicial (P_{II}) e mais 2 corpos de prova com $\pm 0,5\%$ e ainda 2 corpos de prova com $+1,0\%$ de ligante em relação ao teor de ligante inicial.

A determinação do V_v é obtida após a compactação no CGS (Compactador Giratório Superpave) considerando os três esforços de compactação (número de giros). Sendo:

- ✓ $N_{inicial}$ = Esforço de compactação inicial;
- ✓ $N_{projeto}$ = Esforço de compactação de projeto (V_v igual a $4,0\%$);
- ✓ $N_{máximo}$ = Esforço de compactação máximo (representa a condição de compactação da mistura asfáltica, ao fim da sua vida de serviço).

Os esforços de compactação $N_{inicial}$ e $N_{máximo}$ são utilizados para avaliar a compactabilidade da mistura asfáltica, já o $N_{projeto}$ é utilizado para definir o teor de ligante de projeto obtendo uma mistura com volume de vazios igual a $4,0\%$. Estes valores são em função do tráfego N , conforme mostra a Tabela 3.5. Neste trabalho foi utilizada a compactação para um tráfego de médio a alto.

Tabela 3.5 – Número de giros especificado para o método Superpave

Parâmetros de compactação			Tráfego
$N_{inicial}$	$N_{projeto}$	$N_{máximo}$	
-	50	75	Muito leve (local)
7	75	115	Médio (rodovia coletora)
8	100	160	Médio a alto (vias principais, rodovias rurais)
9	125	225	Alto volume de tráfego (interestaduais, muito pesado)

Fonte: Adaptado Bernucci et. al. (2008).

Durante o processo de compactação no método Superpave, é monitorada a massa específica em função da altura do corpo de prova. Dessa forma, as massas específicas estimadas da mistura asfáltica (G_{mb}) são expressas como percentuais da massa específica máxima ou massa específica medida (G_{mm}), conforme é apresentado na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 – Critérios volumétricos para escolha do teor de projeto

Esforço de Compactação (número de giros)	Relação entre massa específica aparente e Gmm (%)	Vv (%)
N _{inicial}	< 89,0	> 11,0
N _{projeto}	96,0	4,0
N _{máximo}	< 98,0	> 2,0

Fonte: Adaptado Bernucci et. al. (2008).

O método Superpave estabelece os mesmos critérios tanto para a faixa C como para a faixa B do DNIT, ou seja, é utilizado o mesmo processo, embora as curvas granulométricas sejam diferentes.

A obtenção da massa específica medida (Gmm) seguiu o método americano descrito na ASTM D 2041 (2011), em que é utilizado o equipamento que permite obter esse parâmetro através do método desenvolvido por James Rice, sendo o ensaio também conhecido como ensaio Rice, uma homenagem a seu criador. Esse ensaio utiliza um equipamento que, por meio de vácuo, retira o ar entre os grumos formados pelos agregados e o ligante asfáltico. Esse processo obtém a massa específica da mistura asfáltica sem a necessidade da obtenção das massas específicas dos seus componentes em separado e ainda considera a absorção de ligante asfáltico pelos agregados. A Gmm é obtida através da razão entre a massa do agregado mais ligante asfáltico e a soma dos volumes dos agregados, vazios impermeáveis, vazios permeáveis não preenchidos com ligante e o total de ligante (NCHRP, 2011).

1.3 Ensaios mecânicos

1.3.1 Estabilidade Marshall

O ensaio de estabilidade Marshall determina a resistência máxima à compressão radial, apresentada pelo corpo de prova e expressa em N (kgf). A resistência máxima à compressão radial é um dos parâmetros para avaliar a mistura asfáltica, sendo estipulado um limite mínimo de 500 kgf para que a mistura seja considerada aceitável, conforme ES 031 (DNIT, 2006). O ensaio consiste em se

aplicar uma carga de compressão ao corpo de prova, por meio de cabeçotes curvos padronizados, sendo a temperatura de ensaio igual a 60 °C e uma taxa de carregamento de 5 cm/minuto (BERNUCCI ET AL. 2008).

1.3.2 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral é descrito na norma ME 136 (DNIT, 2010). Esse parâmetro também compõe os limites mínimos exigidos para que uma mistura asfáltica seja considerada apta a utilização. Neste sentido, o valor mínimo exigido e que consta ES 031 (DNIT, 2006) é de 0,65 MPa.

1.3.3 Ensaio de módulo de resiliência

O ensaio de módulo de resiliência para misturas asfálticas é descrito pela norma técnica ME 135 (DNIT, 2010). Este método descreve o modo pelo qual se determina o módulo de resiliência de misturas asfálticas, a 25 °C, utilizando o equipamento de compressão diametral de carga repetida. O módulo de resiliência (MR) de misturas asfálticas é a relação entre a tensão de tração (σ_T) aplicada repetidamente no plano diametral vertical de uma amostra cilíndrica de mistura asfáltica e a deformação específica recuperável (ϵ_T) correspondente à tensão aplicada.

1.3.4 Ensaio de fadiga

O ensaio de fadiga para misturas asfálticas é descrito pela norma ME 183 (DNIT, 2018). Esta norma estabelece os procedimentos para determinar o comportamento de misturas asfálticas quanto à fadiga sob um carregamento repetido, à tensão constante, usando o ensaio de compressão diametral de tração indireta. O carregamento vertical diametral pulsante gera uma tensão de tração perpendicular à direção da carga aplicada, o que provoca a ruptura do corpo de prova ao longo da parte central do plano diametral vertical. A vida de fadiga é o número total de aplicações de carga que provoca a ruptura do corpo de prova a cada nível de tensão. Esta estimativa de laboratório é usada no dimensionamento de pavimentos asfálticos e comparada ao tráfego real para prever a área trincada.

1.3.5 Ensaio de compressão uniaxial estático (creep estático)

Este ensaio consiste da aplicação de uma carga de compressão estática durante 60 minutos, em um corpo de prova cilíndrico, e posterior descarregamento durante 15 minutos, para obtenção dos valores da deformação total, deformação recuperável, deformação não recuperável, módulo de fluência e inclinação da curva de fluência. A aquisição dos dados ocorre durante todo o período do ensaio, tanto na fase de carregamento, como na fase de recuperação (Mugayar, 2004).

Os corpos de prova são ensaiados a uma temperatura controlada de 40 °C.

1.3.6 Programa computacional Elsym5

O programa Elastic Layered Symmetrical (Elsym5) apresenta uma grande vantagem que é a possibilidade de o carregamento elástico se constituir por até dez cargas iguais, situadas em pontos quaisquer da superfície do pavimento. A hipótese básica aos sistemas de camadas é o mesmo de Burmister. Isto é, cada camada é homogênea, isotrópica, linearmente elástica e ilimitada na direção horizontal (Pinto e Preussler, 2010).

Esses autores descrevem ainda que, neste programa, cada camada tem uma espessura finita, exceto a camada de subleito, onde se considera uma profundidade infinita. O programa calcula tensões e deformações para um sistema de camadas elástica e tridimensional, podendo aceitar um total de cinco camadas e até dez cargas circulares normais. O programa computacional Elsym5 possui três tipos de entradas principais: i) variáveis de caracterização do material ou camada, ii) variáveis do carregamento e iii) informações das coordenadas do sistema.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15184**. Materiais betuminosos - Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional. Rio de Janeiro, 2004.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 5**: Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials, West Conshohocken, PA, 2013.

_____ **ASTM D 36.** Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus), West Conshohocken, PA, 2014

_____ **ASTM D 113.** Standard Test Method for Ductility of Asphalt Materials, West Conshohocken, PA, 2017.

_____ **ASTM D 2041.** Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures. USA, 2011.

_____ **ASTM D 2042.** Standard Test Method for Solubility of Asphalt Materials in Trichloroethylene, West Conshohocken, PA, 2015b.

_____ **ASTM D 2872.** Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test). West Conshohocken, PA, 2012.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B.
Pavimentação asfáltica – Formação básica para engenheiros. PETROBRÁS: ABEDA. Rio de Janeiro, 2008.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **ME 004/94:** Material betuminoso – determinação da viscosidade Saybolt-Furol a alta. Rio de Janeiro, 1994a.

_____ **ME 078:** Agregado graúdo: adesividade a ligante betuminoso. Rio de Janeiro, 1994b.

_____ **ME 086:** Agregado: determinação do índice de forma. Rio de Janeiro, 1994c.

_____ **ME 148:** Material betuminoso - determinação dos pontos de fulgor e de combustão (vaso aberto cleveland) (ABNT - NBR 11341). Rio de Janeiro, 1994d.

_____ **ME 043:** Misturas betuminosas a quente – Ensaio Marshall para misturas betuminosas. Rio de Janeiro, 1995.

_____ **ME 193:** Produtos betuminosos líquidos e semi-sólidos – determinação da densidade 20 °C / 4 °C. Rio de Janeiro, 1996.

_____ **ME 266:** Agregados – determinação do teor de materiais pulverulentos. Rio de Janeiro, 1997.

_____ **ME 035:** Agregados: determinação da abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro, 1998a.

_____ **ME 081:** Agregados: determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo. Rio de Janeiro, 1998b.

_____ **ME 083:** Agregados: análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1998c.

_____ **ME 194:** Agregados - determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco chapman. Rio de Janeiro, 1998d.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **ES 031: Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de serviço.** Rio de Janeiro, 2006

_____ **ME 131:** Materiais asfálticos - determinação do ponto de amolecimento - método do anel e bola. Rio de Janeiro, 2010a.

_____ **ME 135:** Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010b.

_____ **ME 136:** Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010c.

_____ **ME 155:** Material asfáltico – Determinação da penetração – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010d.

_____ **ME 183:** Pavimentação asfáltica – Ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2018.

MUGAYAR, A. N. **Avaliação dos efeitos do tipo de asfalto e da distribuição granulométrica do agregado nas fluências estática e dinâmica de misturas asfálticas densas.** Tese de Doutorado. São Carlos: Escola de Engenharia, 2004. 85p.

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

PINTO, S.; PREUSSLER, E. **Pavimentação rodoviária – conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis.** Rio de Janeiro, Synergia: IBP, 2010. 220 p.

Capítulo 4

ANÁLISE ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS SOB A PERSPECTIVA DE DIFERENTES MÉTODOS DE DOSAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS

RESUMO

Apresenta-se, neste estudo, uma avaliação comparativa entre os desempenhos estruturais de pavimentos flexíveis, constituídos por revestimentos asfálticos resultantes da aplicação dos métodos Marshall e Superpave, trabalhando-se com as faixas granulométricas B (camada de ligação ou binder) e C (camada de rolamento ou capa asfáltica), da atual especificação de serviço do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Após a definição da granulometria e do teor de ligante de projeto, segundo cada método de dosagem, foram confeccionados corpos de provas, ensaiados em laboratório com o objetivo de determinar os parâmetros mecânicos característicos de cada mistura asfáltica de projeto (estabilidade, resistência à tração por compressão diametral, módulo resiliente, fadiga e deformação permanente ou creep estático), para fins de comparação preliminar dos resultados. De posse dessas propriedades, utilizou-se o programa computacional Elsym5 para a análise estrutural de um pavimento adotado, variando-se apenas as propriedades mecânicas da camada de revestimento, constituída pela capa asfáltica e pelo binder. Nas análises estruturais, cada pavimento adotado foi submetido a três níveis de carregamento (80kN, 98kN e 118kN) e a três níveis de pressão de enchimento dos pneumáticos (563kPa, 633kPa e 703kPa). Os resultados obtidos indicam que o método de dosagem interfere no comportamento mecânico das misturas asfálticas e, conseqüentemente, na resposta estrutural do pavimento flexível. Foi observado um melhor desempenho estrutural das misturas asfálticas dosadas pelo método Superpave e, por conseguinte, dos pavimentos constituídos por tais misturas. Os resultados ressaltam a relevância da escolha, em laboratório, de um método de dosagem da mistura asfáltica mais criterioso e, conseqüentemente, mais representativo daquela dosagem prevista para ser executada em campo, visto que essa escolha influencia na resposta estrutural do pavimento flexível.

Palavras-chave: Mistura asfáltica; Métodos de dosagem; Análise estrutural de pavimento.

ABSTRACT

This study presents a comparative evaluation of the structural performances of flexible pavements, consisting of asphalt coatings produced by the application of both Marshall and Superpave methods of dosing hot asphalt mixtures. The granulometric bands B (bond layer) and C (bearing layer or asphalt layer) were used, classified according to the current service specification of the National Department of Transport Infrastructure. After the definition of the granulometry and the discovery of the asphalt binder content, according to each dosing method, the test bodies were made. The first laboratory tests aimed at determining the mechanical parameters characteristic of each asphalt mixture (stability, tensile strength by diametrical compression, resilient modulus, fatigue and permanent deformation) to obtain comparative parameters. From these initial results, the Elsym5 program was used for the structural analysis of a pavement-type, varying only the mechanical properties of the coating layer, consisting of the asphalt layer and the binder. In the structural analyzes, each pavement-type was subjected to three loading levels (80kN, 98kN and 118kN) and to three tire inflation pressure levels (563kPa, 633kPa and 703kPa). The final results indicate that the choice of the dosing method interferes in the mechanical behavior of the asphalt mixtures and, consequently, in the structural response of the flexible pavement. It was observed a better structural performance of the asphalt mixtures dosed by the Superpave method and, therefore, better performance of the pavements constituted by such mixtures. The results highlight the importance of choosing, in the laboratory, a more judicious asphalt mixing dosage method which is consequently more representative of that dosage to be performed in the field, as this choice influences the structural response of the flexible pavement.

Keywords: Asphalt mixtures; Dosing Methods; Structural pavement analysis.

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, na quase totalidade das rodovias pavimentadas, utiliza-se como revestimento o concreto asfáltico usinado a quente (CAUQ). Esse material é obtido a partir da composição de uma mistura asfáltica composta de agregados e cimento asfáltico de petróleo (CAP). Segundo Gouveia et al. (2007), o desempenho estrutural das misturas asfálticas compactadas depende das propriedades e proporções relativas de seus componentes principais, ou seja, agregado mineral, ligante asfáltico e vazios, devendo a mistura asfáltica ser concebida a partir de um método de dosagem eficiente.

Airey e Collop (2016) apontam que a compactação é um fator essencial para a produção de pavimentos de alta qualidade e que a experiência tem demonstrado que diferentes formas de compactação criam corpos de prova volumetricamente idênticos, mas produzem misturas asfálticas com propriedades mecânicas significativamente diferentes e isso tem motivado estudos reconhecidos há muito tempo.

Leandro et al. (2014) descrevem que, para a dosagem das misturas asfálticas, existem diversos tipos de métodos que combinam tamanho e forma de corpos de prova diferentes, tipos distintos de compactação, mas sempre buscando satisfazer um dos principais objetivos da fase de projeto de uma mistura asfáltica, que é a obtenção de um produto final de elevada vida útil na condição compactada. O processo de dosagem exige uma determinada distribuição granulométrica e a respectiva quantidade de ligante asfáltico suficiente para produzir uma mistura asfáltica competente do ponto de vista de sua utilização em serviço.

Ainda segundo esses autores, a avaliação da volumetria dos corpos de prova tem papel importante para os métodos de dosagem, embora, para formas de compactação diferentes e volumetrias similares, tais métodos possam resultar em produtos com comportamentos mecânicos distintos, tendo em vista que estes também são função da distribuição dos agregados ou do arranjo destes no interior do corpo de prova.

Uma variedade de métodos de projeto de misturas asfálticas é praticada em todo o mundo, porém os métodos de projeto Marshall (DNER 043/1995), Superpave

(AASHTO M 323/ 2017) e Hveem (ASTM D 1560/2015a) são os mais amplamente praticados (ZUMRAWI e EDREES, 2016).

Os respectivos protocolos desses métodos evidenciam, a despeito de suas diferenças, que o objetivo principal de qualquer projeto de mistura asfáltica é determinar as proporções ideais entre os agregados e o ligante asfáltico, ou seja, realizar uma dosagem entre esses materiais que forneça uma estrutura com determinadas propriedades mecânicas e ainda uma previsão de seu desempenho em campo. Considerando-se tais diferenças, vários trabalhos foram executados comparando diferentes métodos de dosagem para o projeto de misturas asfálticas (RENKEN, 2000; HUNTER ET AL., 2004; MARQUES, 2004; ONOFRE ET AL., 2011).

Zumrawi e Edrees (2016) descrevem que o volume de vazios é o principal critério do método de dosagem Superpave, fixado em um valor igual a 4%, enquanto o método Marshall admite uma variação, para esse parâmetro, entre 3% e 5%, levando-se em consideração, ainda, o volume de Vazios no Agregado Mineral (VAM) e a Relação Betume-Vazios (RBV) para a obtenção do teor de ligante de projeto. Nesse trabalho de pesquisa, no qual se comparam os métodos de dosagem Marshall e Superpave, obtiveram-se as seguintes conclusões: o teor de ligante asfáltico é menor para os corpos de prova dosados pelo método Superpave, e, devido ao esforço e forma de compactação, obtém-se uma densidade maior para os corpos de prova dosados pelo método Superpave.

Almeida Júnior et al. (2017) concluíram em sua pesquisa que todas as misturas asfálticas dosadas pelo método Marshall apresentaram teores de ligante superiores aos das misturas Superpave. Leandro et al. (2014) também observaram que o método de dosagem Superpave apresenta um consumo de ligante asfáltico menor comparativamente ao Marshall, o que pode resultar em uma mistura asfáltica mais econômica e mais resistente ao afundamento em trilha de roda, patologia estrutural associada ao mecanismo de deformação permanente e que constitui um dos principais defeitos encontrados nos revestimentos asfálticos de pavimentos nas rodovias brasileiras.

O trabalho de Onofre et al. (2011) aponta que, quando comparados os métodos de dosagem Superpave e Marshall para as misturas asfálticas, uma das vantagens do primeiro é a obtenção do gráfico de compactação, destacando que determinadas áreas nesse gráfico podem diferenciar as misturas quanto à

trabalhabilidade, à resistência e à deformação permanente (SOUSA ET AL., 1991; TASHMAN ET AL., 2001; GOUVEIA ET AL., 2007; ALMEIDA JR. ET AL., 2017).

Dentro dessa perspectiva, considerando-se que os respectivos produtos estruturais fornecidos pelos métodos de dosagem Marshall e Superpave podem ser distintos em decorrência da reconhecida diferença entre seus protocolos, conforme evidenciado pelo estado da arte sobre o assunto, esta pesquisa objetiva comparar, em caráter secundário, os comportamentos mecânicos das misturas asfálticas dosadas por tais métodos, e em caráter primário, considerando-se tais propriedades, as respostas estruturais dos pavimentos-tipo investigados, empregando-se o programa de análise estrutural Elsym5.

No contexto dessa análise comparativa, é importante destacar que são poucas as pesquisas direcionadas para a avaliação estrutural das misturas asfálticas que compõem o pavimento em conjunto com as camadas estruturais subjacentes, visto que frequentemente é dada ênfase aos requisitos volumétricos e de desempenho mecânico das respectivas misturas asfálticas de projeto dosadas por diferentes métodos, sem que seja considerado o efeito das eventuais diferenças de suas propriedades mecânicas sobre o conjunto do pavimento estudado.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais utilizados

Os agregados empregados neste trabalho são de origem gnáissica, provenientes da pedreira de Ervália, localizada no município de Ervália, estado de Minas Gerais (MG), Brasil. Foram usados agregados graúdos (brita 0 e brita 1) e agregado miúdo (pó de pedra). Nas misturas asfálticas, empregou-se o cimento asfáltico de petróleo CAP 50/70, oriundo da refinaria Gabriel Passos (REGAP), localizada em Betim-MG, e fornecida pela empresa Stratura Asfalto S/A. Este ligante foi certificado pelo laboratório da Petrobrás sob o nº 2505-14G.

2.2 Produção dos corpos de prova

Os corpos de prova foram produzidos segundo o que determinam as respectivas especificações dos métodos de dosagem Marshall e Superpave.

2.2.1 Método de dosagem Marshall

Após a caracterização dos agregados, foram adotadas duas faixas granulométricas de trabalho contidas na especificação de serviço ES 031 (DNIT, 2006a), do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, a saber, a faixa granulométrica C, utilizada como camada de rolamento (capa asfáltica), e a faixa granulométrica B, utilizada como camada de ligação (binder).

Para a dosagem das misturas asfálticas atendendo às duas faixas granulométricas previamente definidas, seguiu-se o protocolo constante no método de ensaio ME 043 (DNER,1995). O teor de projeto de ligante asfáltico foi obtido mediante análise da variação do Volume de vazios (Vv) e da Relação Betume-Vazios (RBV), em função dos cinco teores de ligante adotados inicialmente, respeitando-se os limites inferiores e superiores prescritos pela especificação de serviço ES 031 (DNIT, 2006a) para cada um desses parâmetros (Vv e RBV).

2.2.2 Método de dosagem Superpave

Para a dosagem das misturas asfálticas segundo o método Superpave, obedeceu-se ao critério dos pontos de controle para as curvas granulométricas inicialmente adotadas (graúda, miúda e intermediária), visando à determinação das granulometrias de projeto. Adicionalmente aos limites estipulados pelo método Superpave, as granulometrias de projeto também atenderam aos limites da especificação de serviço ES 031 (DNIT, 2006a) para as faixas B e C.

Definido o teor de ligante inicial, adotou-se a curva granulométrica que atendessem aos parâmetros exigidos pelo método Superpave, conforme Tabela 4.1. No presente trabalho, o tamanho máximo nominal (TMN) do agregado foi de 19 mm.

Tabela 4.1 – Valores limites para o Tamanho Máximo Nominal (TMN) do agregado

Parâmetro	Valor Limite
TMN	19,0 mm
Vv (%)	4,0
VAM (%)	≥ 13
RBV (%)	65 – 75
P/A (relação pó/asfalto)	0,6 - 1,2

Fonte: Adaptado de Bernucci et al. (2008).

Em sequência, foram compactados dois corpos de prova no teor de ligante inicial (Pli), dois com $\pm 0,5\%$ e dois com $+1,0\%$ de ligante em relação ao Pli.

A determinação do Vv foi realizada após a compactação dos corpos de prova no compactador giratório Superpave (CGS), para os três esforços de compactação empregados, sendo:

- ✓ N_{inicial} : esforço de compactação inicial;
- ✓ N_{projeto} : esforço de compactação de projeto ($Vv = 4,0\%$); e
- ✓ $N_{\text{máximo}}$: esforço de compactação máximo (representa a condição de compactação da mistura asfáltica ao fim da sua vida de serviço).

O N_{projeto} foi empregado para definir o teor de ligante de projeto, obtendo-se uma mistura com volume de vazios igual a $4,0\%$, para o qual se determina o teor de ligante de projeto de cada mistura asfáltica estudada. Estes valores relacionam-se com o tráfego N, sendo neste trabalho adotada a compactação para um volume de tráfego de médio a alto (100 giros).

A Tabela 4.2 apresenta os critérios para o volume de vazios em relação à massa específica máxima medida (Gmm), sendo a Gmm obtida pelo ensaio ASTM D 2041 (2011), para as misturas asfálticas em seus respectivos teores de projeto.

Tabela 4.2 – Critérios volumétricos para escolha do teor de projeto

Esforço de Compactação (número de giros)	Relação entre Massa específica aparente e Gmm (%)	Vv (%)
N_{inicial}	< 89,0	>11,0
N_{projeto}	96,0	4,0
$N_{\text{máximo}}$	< 98,0	> 2,0

Fonte: Adaptado de Bernucci et al. (2008).

2.2.3 Ensaios mecânicos

Definidos os teores de projeto para cada faixa granulométrica adotada, foram determinadas as propriedades mecânicas das misturas asfálticas. Para o ensaio de estabilidade Marshall, foi utilizada a norma ME 043 (DNER, 1995). O ensaio de resistência à tração por compressão diametral (RT) seguiu o que preconiza a norma ME 136 (DNIT, 2010c). Para o ensaio de módulo de resiliência (MR), foi utilizado o método de ensaio ME 135 (DNIT, 2010b). Para a fadiga, foi tomado como base o método de ensaio ME 183 (DNIT, 2018).

Para estudar a deformação permanente neste trabalho, foi executado o ensaio de fluência por compressão uniaxial não confinada (creep estático), conforme protocolo descrito no relatório 465 (NCHRP, 2002). Foi aplicado um carregamento estático com tensão de 0,1 MPa durante um período de 60 minutos, com mais um período de 15 minutos para recuperação da amostra, e todo ensaio foi realizado com temperatura controlada de 40°C. Neste ensaio, são obtidos os parâmetros de deformação total média (Dt), módulo de fluência (Mf), inclinação da curva de deformação na fase secundária de seu desenvolvimento (Icurva) e ainda a recuperação da deformação ocorrida ao longo do ensaio de creep estático. No trabalho de Little et al. (1993), é descrito como o ensaio de fluência por compressão uniaxial possibilita verificar a sensibilidade de misturas asfálticas ao fenômeno de deformação permanente.

2.2.4 Análise estrutural

Neste trabalho, foi adotada uma estrutura de pavimento flexível e utilizado o programa computacional Elsym5 para a determinação das tensões e deslocamentos atuantes na mesma. O pavimento adotado foi constituído de capa asfáltica, camada de ligação, camada de base, camada de reforço de subleito e subleito. Foram testados três tipos de carregamento, para um eixo simples de rodas duplas (ESRD).

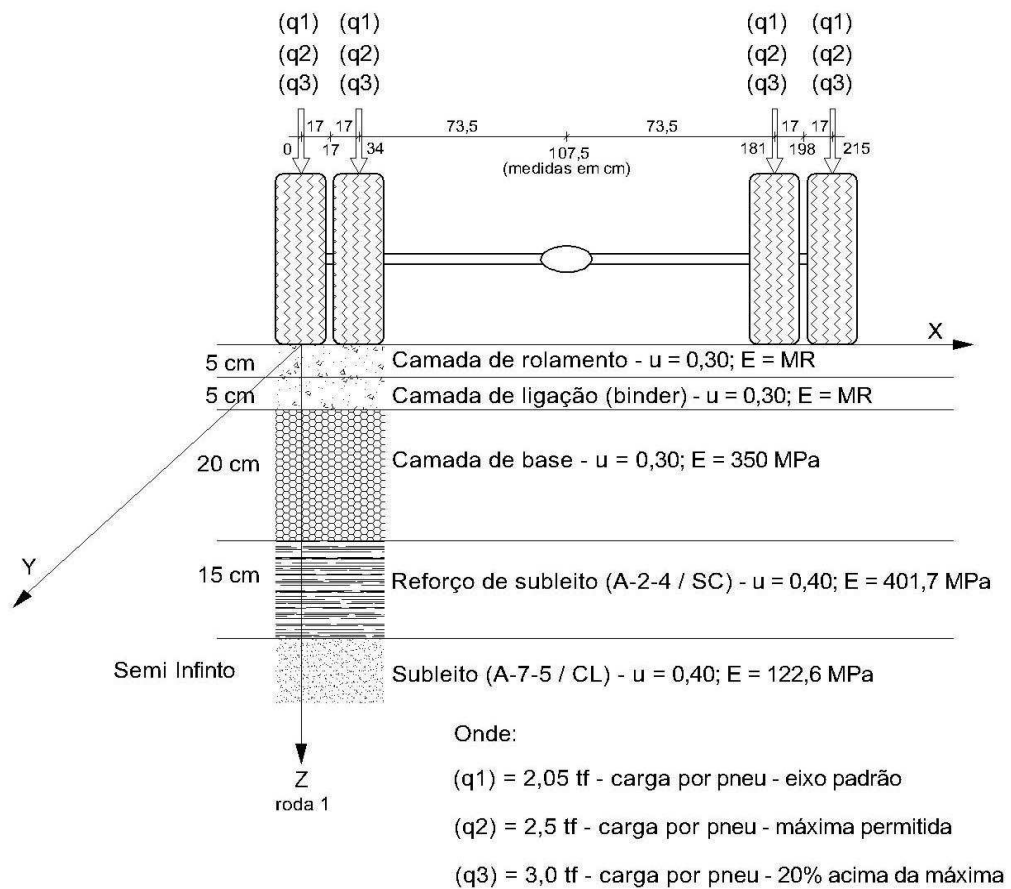
Para os dados de entrada no programa computacional Elsym5, o módulo de elasticidade (E) foi considerado igual ao módulo de resiliência (MR), admitindo-se um comportamento elástico linear para as camadas do pavimento.

Os níveis de carregamento foram determinados para: (i) Q_1 igual a 80kN (8,2tf), carga correspondente ao eixo padrão de 18.000lb, sendo considerada uma carga baixa; (ii) Q_2 igual a 98kN (10,0tf), carga máxima permitida pela legislação brasileira para eixo simples de rodas duplas; e (iii) Q_3 igual a 118kN (12,0tf), carga 20% acima da carga máxima permitida, sendo utilizada para demonstrar os danos causados pelo excesso de carga nos veículos que circulam nas estradas.

Acompanhando os três níveis de carregamento, trabalhou-se com as seguintes pressões de enchimento dos pneus: (i) P_1 igual a 563kPa (80psi), adotada para determinação da deflexão conforme o método de ensaio ME 024 (DNER, 1994a); (ii) P_2 igual a 633kPa (90psi), pressão considerada média; e (iii) P_3 igual a 703kPa (100psi), pressão considerada alta.

A Figura 4.1 ilustra as camadas estruturais, o pavimento adotado e o carregamento aplicado. As características dos materiais utilizados nas camadas de subleito e reforço de subleito (μ e E) foram extraídas do estudo de Carmo (1998), e, para as camadas de base (μ e E) e de revestimento (μ), foram adotados os parâmetros do estudo de Ponte et al. (2014). Os módulos de elasticidade (E) das camadas estruturais componentes do revestimento asfáltico (capa asfáltica e binder) corresponderam aos respectivos módulos de resiliência obtidos nessa pesquisa, segundo cada um dos métodos de dosagem adotados. A distribuição das cargas por roda correspondeu a: $q_1=2,05\text{tf}$ (eixo padrão); $q_2=2,5\text{tf}$ (carga máxima permitida pela legislação brasileira) e $q_3=3,0\text{tf}$ (20% acima da carga máxima permitida pela legislação brasileira).

Figura 4.1 – Eixo simples de roda dupla, carregamento aplicado, parâmetros e espessura das camadas do pavimento adotado



Fonte: Autor

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Agregados e ligante asfáltico

Na Tabela 4.3, têm-se os resultados referentes à caracterização dos agregados minerais empregados neste trabalho.

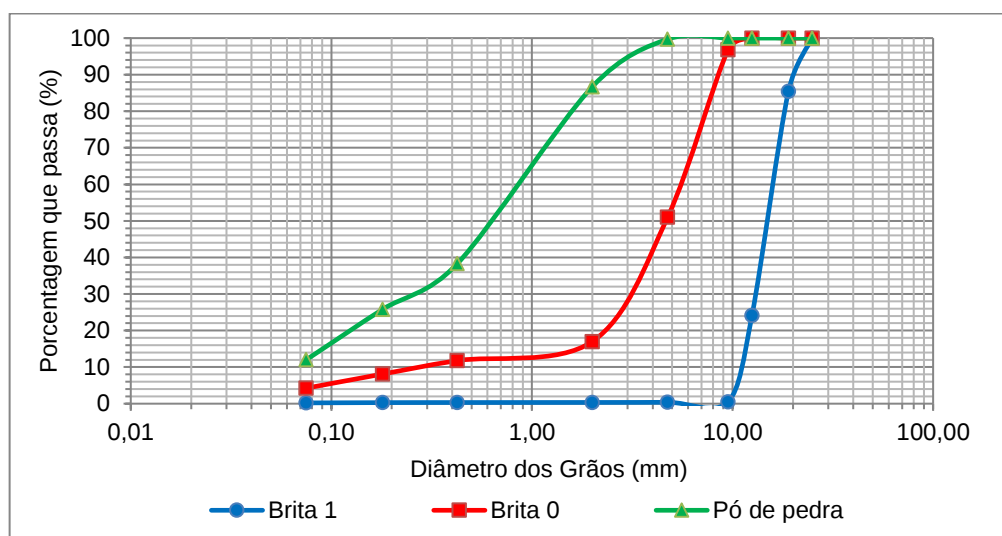
Tabela 4.3 – Resultados da caracterização dos agregados minerais empregados na pesquisa

ENSAIOS	NORMAS TÉCNICAS	RESULTADOS OBTIDOS
Índice de forma dos agregados graúdos	ME086 (DNER, 1994c)	0,68
% de material pulverulento	ME 266 (DNER, 1997)	16,66%.
Abrasão "Los Angeles" dos agregados graúdos	ME 035 (DNER, 1998a)	45%
Adesividade dos agregados graúdos ao ligante betuminoso	ME 078 (DNER, 1994b)	Satisfatório com a adição de 0,1% de material dopante
Absorção - Brita 0	ME 081 (DNER, 1998b)	1,14%
Massa específica real Brita 0	ME 081 (DNER, 1998b)	2,794 g/cm ³
Massa específica e aparente - Brita 0	ME 081 (DNER, 1998b)	2,722 g/cm ³
Absorção - Brita 1	ME 081 (DNER, 1998b)	1,14%
Massa específica real - Brita 1	ME 081 (DNER, 1998b)	2,794 g/cm ³
Massa específica e aparente - Brita 1	ME 081 (DNER, 1998b)	2,722 g/cm ³
Massa específica do agregado miúdo	ME 194 (DNER, 1998d)	2,798 g/cm ³
Análise granulométrica dos agregados	ME 083 (DNER, 1998c)	-

Fonte: Autor

No que se refere aos resultados apresentados para a caracterização dos agregados, ocorreu apenas uma não conformidade para a adesividade entre o ligante e os agregados. Essa não conformidade foi reparada, adicionando-se ao ligante 0,1% de um produto dopante em relação ao peso do cimento asfáltico de petróleo CAP 50/70. A Figura 4.2 apresenta as curvas granulométricas dos agregados utilizados neste trabalho de pesquisa.

Figura 4.2 – Curva granulométrica dos agregados minerais empregados nesta pesquisa



Fonte: Autor.

A Tabela 4.4 apresenta os resultados dos ensaios de caracterização do ligante asfáltico CAP 50/70 utilizado neste trabalho. Para todos os ensaios realizados, foram obtidos resultados que atenderam aos limites recomendados pelas normas vigentes.

Tabela 4.4 – Resultados da caracterização do ligante asfáltico CAP 50/70

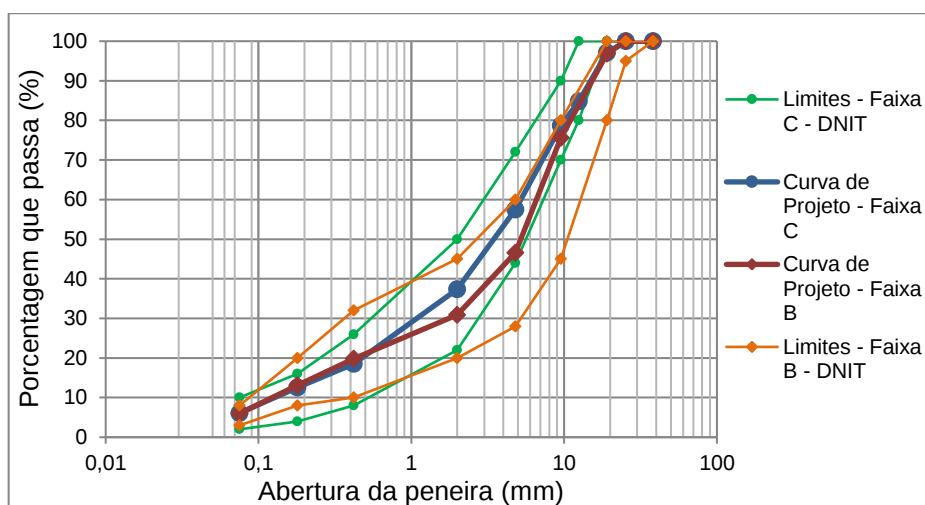
ENSAIOS	NORMAS TÉCNICAS	RESULTADOS OBTIDOS
Penetração	ME 155 (DNIT, 2010d)	56,93
Ponto de amolecimento	ME 131 (DNIT, 2010a)	51°C
Ponto de fulgor	ME 148 (DNER, 1994d)	343°C
Ponto de combustão	ME 148 (DNER, 1994d)	365 °C
Massa específica	ME 193 (DNER, 1996)	1,010 g/cm ³
Densidade relativa	ME 193 (DNER, 1996)	1,006
RTFOT Penetração Retida	D 5 (ASTM, 2013)	67%
RTFOT - Aumento do Ponto de Amolecimento	D 36 (ASTM, 2014)	
RTFOT - Ductilidade a 25GC	D 113 (ASTM, 2017)	>150 cm
RTFOT Variação em % Massa	D 2872 (ASTM, 2012)	-0,003%
Solubilidade no Tricloroetileno	D 2042 (ASTM, 2015b)	100 %massa
Viscosidade Rotacional Brookfield, 135 °C	NBR 15184 (2004)	318cP
Viscosidade Rotacional Brookfield, 155 °C		162cP
Viscosidade Rotacional Brookfield, 170 °C		51cP

Fonte: Autor.

3.2 Curvas granulométricas de projeto

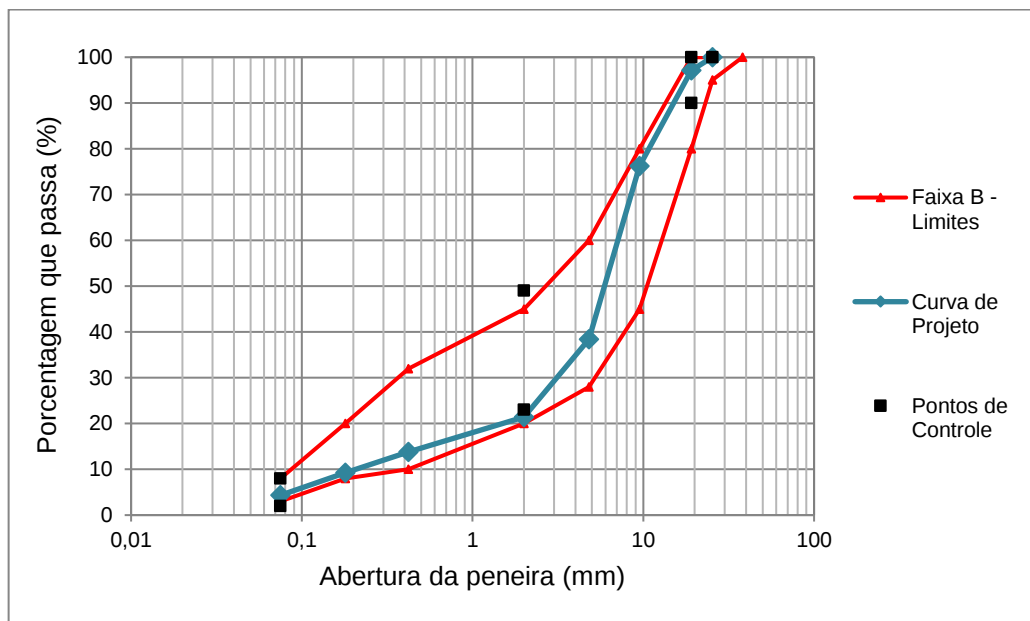
A Figura 4.3 mostra as curvas granulométricas de projeto que atenderam às faixas granulométricas de serviço B e C, para o método de dosagem Marshall, e as Figuras 4.4 e 4.5 trazem, respectivamente, as curvas granulométricas de projeto para o método de dosagem Superpave, enquadradas nas exigências dos pontos de controle e também das faixas granulométricas de serviço B e C.

Figura 4.3 – Curvas de projeto das Faixas granulométricas B e C – Marshall



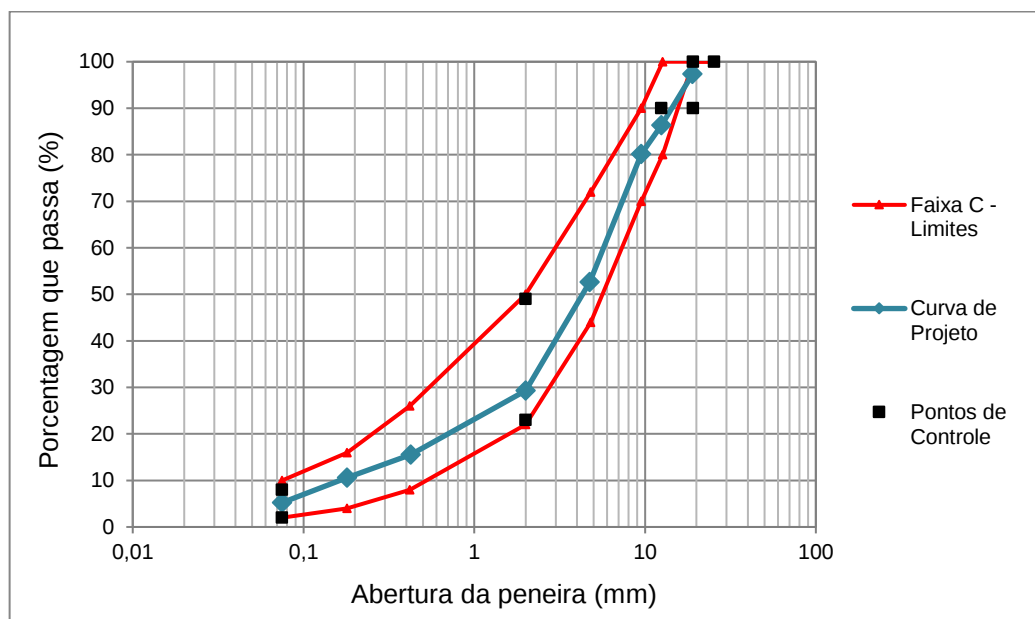
Fonte: Autor.

Figura 4.4 – Curva de projeto – Faixa granulométrica B – Superpave



Fonte: Autor

Figura 40.5 – Curva de projeto – Faixa granulométrica C – Superpave



Fonte: Autor.

3.3 Teores de projeto e resultados de ensaios mecânicos

Na Tabela 4.5, têm-se os teores de projeto de ligante asfáltico definidos para cada uma das curvas granulométricas de projeto, segundo cada um dos métodos de dosagem adotados no programa experimental.

Tabela 4.5 – Teores de projeto obtidos segundo os métodos de dosagem

MÉTODO DE DOSAGEM	TEOR DE PROJETO (%)	
	FAIXA GRANULOMÉTRICA B	FAIXA GRANULOMÉTRICA C
Marshall	4,20	4,70
Superpave	4,85	4,60

Fonte: Autor.

Definidos os teores de ligante asfáltico de projeto para as curvas granulométricas de projeto estudadas, foram realizados, preliminarmente, para as respectivas misturas asfálticas de projeto resultantes, os ensaios de estabilidade Marshall, resistência à tração por compressão diametral (RT) e de módulo de resiliência (MR). As Tabelas 4.6 e 4.7 apresentam os respectivos resultados.

Tabela 4.6 – Parâmetros volumétricos e mecânicos para as misturas asfálticas de projeto enquadradas na faixa granulométrica B

Parâmetro	Faixa granulométrica B - Marshall	Faixa granulométrica B – Superpave
Teor de Projeto (%)	4,20	4,85
Vv (%)	4,4	4,1
RBV (%)	70	75
Resistência à Tração por Compressão Diametral (RT) (MPa)	0,95	1,22
Estabilidade (kgf)	535	806
Módulo de Resiliência (MR) (MPa)	3948	3811

Fonte: Autor.

Tabela 4.7 – Parâmetros volumétricos e mecânicos para as misturas asfálticas de projeto enquadradas na faixa granulométrica C

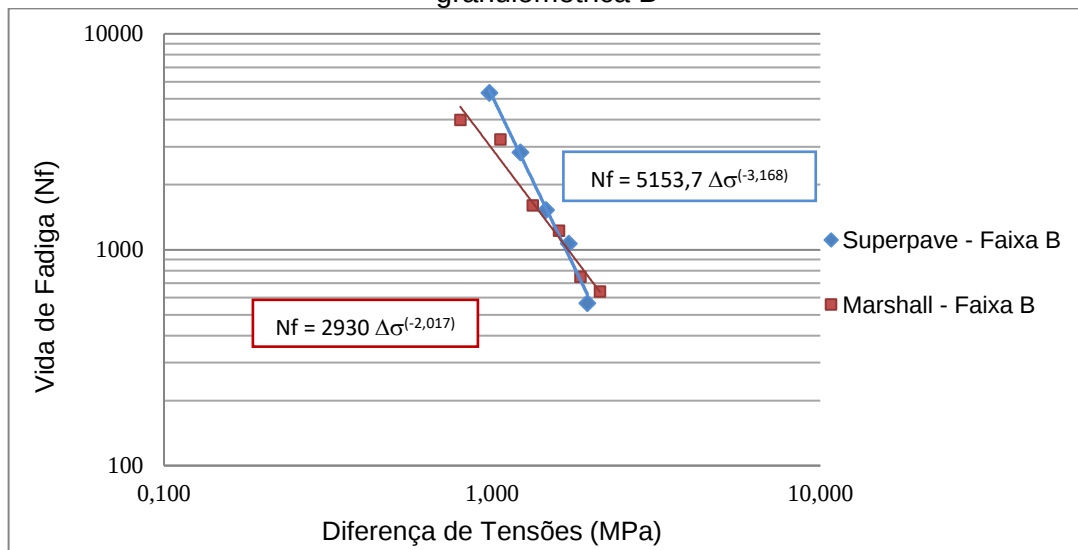
Parâmetro	Faixa granulométrica C - Marshall	Faixa granulométrica C - Superpave
Teor de Projeto (%)	4,70	4,60
Vv (%)	3,7	4,2
RBV (%)	76	74
Resistência à Tração por Compressão Diametral (RT) (MPa)	0,91	1,81
Estabilidade (kgf)	525	867
Módulo de Resiliência (MR) (MPa)	4073	5846

Fonte: Autor.

Avaliando-se os resultados obtidos das misturas para as duas faixas estudadas, em relação à estabilidade Marshall e à resistência à tração por compressão diametral, constata-se que todas as misturas atenderam aos respectivos valores mínimos exigidos e especificados pela ES 031 (DNIT, 2006a) (500kgf e 0,65MPa, respectivamente). Salienta-se que estes não constituem exigências para o método de dosagem Superpave.

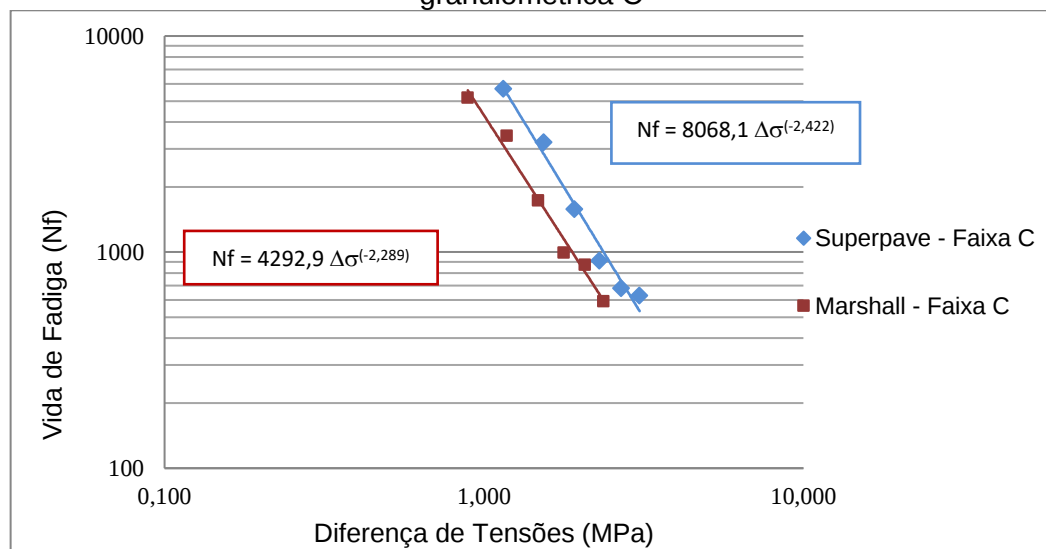
Para o ensaio de vida fadiga, as Figuras 4.6 e 4.7 apresentam graficamente o desempenho das misturas asfálticas dosadas pelos métodos Marshall e Superpave, para as faixas granulométricas B e C.

Figura 4.6 – Vida de Fadiga (N_{flab}) versus Diferença de tensões (Δσ) – Faixa granulométrica B



Fonte: Autor.

Figura 4.7 – Vida de Fadiga (N_{flab}) versus Diferença de tensões (Δσ) – Faixa granulométrica C



Fonte: Autor.

Outro parâmetro importante que deve ser observado na definição de uma mistura asfáltica para revestimento é a deformação permanente. Nas Tabelas 4.8 e 4.9, têm-se os resultados de ensaios de creep estático nas misturas asfálticas dosadas pelos métodos Marshall e Superpave, para as faixas B e C. Foram comparados os grupos de corpos de prova dosados pelo método Marshall com o grupo de corpos de prova dosados pelo método Superpave, sendo analisadas as médias dos resultados para as faixas estudadas.

Tabela 4.8 – Média dos resultados de creep estático das misturas asfálticas dosadas e compactadas pelos métodos Marshall e Superpave – Faixa granulométrica B.

Parâmetros	Marshall	Superpave
Tempo Final (s)	4500	4500
Dt – Deformação específica total (mm/mm)	0,0059	0,0015
Mf – Módulo de fluência (MPa)	19,88	67,55
I _{curva} – Inclinação da curva	0,012	0,027
Deslocamento máxima (mm)	0,442327	0,534011
Deslocamento final (mm)	0,381667	0,473023
Deslocamento recuperável (mm)	0,0607	0,0609

Fonte: Autor.

Tabela 4.9 – Média dos resultados de creep estático das misturas asfálticas dosadas e compactadas pelos métodos Marshall e Superpave – Faixa granulométrica C.

Parâmetros	Marshall	Superpave
Tempo Final (s)	4500	4500
Dt – Deformação específica total (mm/mm)	0,0045	0,0011
Mf – Módulo de fluência (MPa)	25,34	95,04
I _{curva} – Inclinação da curva	0,025	0,047
Deslocamento máxima (mm)	0,3443333	0,282301
Deslocamento final (mm)	0,2923333	0,232503
Deslocamento recuperável (mm)	0,0520	0,0498

Fonte: Autor.

Os dados das tabelas acima apontam uma deformação específica total (Dt) menor para os corpos de prova dosados pelo método Superpave para as duas faixas granulométricas estudadas, B e C. Isso quer dizer que a suscetibilidade à deformação permanente é menor para essas misturas asfálticas, fato que é corroborado por outro dado importante que é o módulo de fluência. Esse parâmetro (Mf) determina a capacidade de uma mistura asfáltica resistir à deformação permanente, neste caso, quanto maior o valor do módulo de fluência, menor será a deformação permanente; também nessa pesquisa as duas faixas granulométricas estudadas apresentaram desempenho superior para as misturas asfálticas dosadas pelo método Superpave. Quanto à recuperação elástica, esse dado é obtido em termos percentuais entre a deformação recuperável e a deformação total, apresentando a capacidade da mistura asfáltica se recuperar das deformações sofridas. Nos resultados obtidos, é possível observar que para as faixas granulométricas estudadas, B e C, tanto as misturas asfálticas dosadas pelo método Marshall como as misturas asfálticas dosadas pelo método Superpave tiveram percentuais de recuperação próximos.

3.4 Análise estrutural

A Tabela 4.10 apresenta os resultados das tensões verticais e horizontais obtidas para o pavimento adotado nesta pesquisa em variados pontos da estrutura. É possível observar que a capa asfáltica apresentou tensões horizontais e verticais de compressão, ao passo que a camada de ligação foi solicitada à tração (σ_h) e à compressão (σ_v), o que permite analisar o comportamento da mistura asfáltica nesta camada em relação à sua vida de fadiga. As tensões horizontais de tração atingem o seu maior valor em Z igual a 9,99cm, no bordo inferior da camada de ligação. Nessa profundidade, os pontos mais solicitados correspondem às posições X igual a 0cm e X igual a 34cm, que representam os pontos de aplicação das cargas debaixo das rodas, para o eixo simples de rodas duplas (ESRD).

Tabela 4.10 - Tensões horizontais e verticais atuantes na camada de rolamento (capa asfáltica) e na camada de ligação (binder)

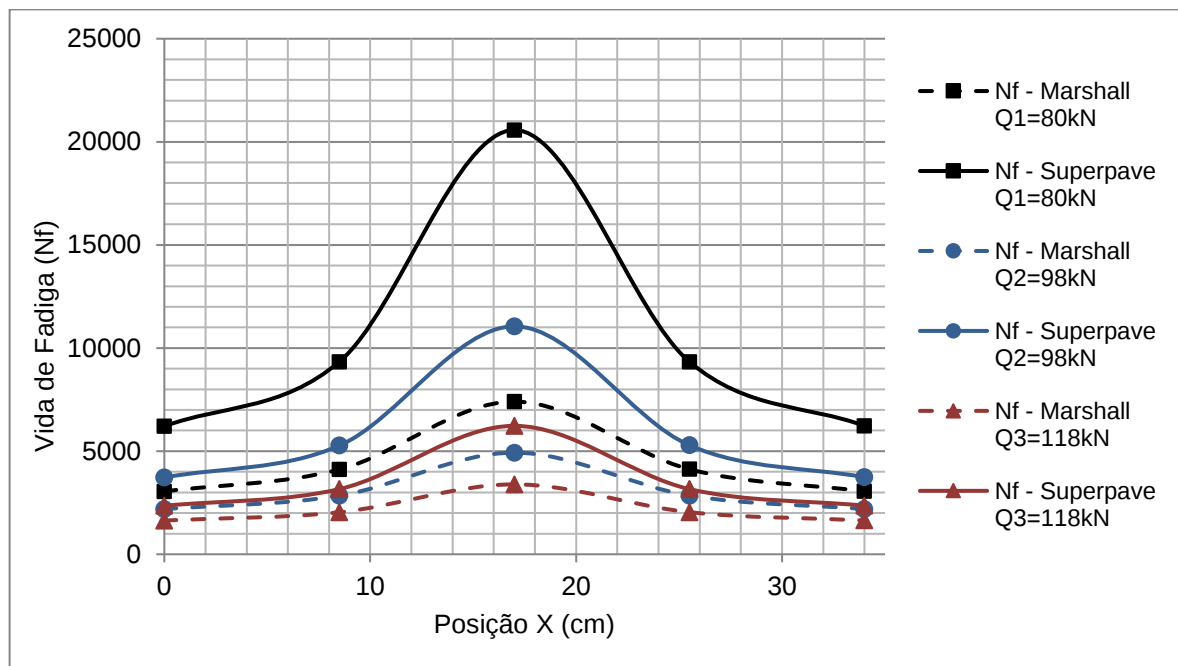
Posição (cm)			Tensão (kgf/cm²)					
Q ₁ = 8,2 t								
X	Y	Z	q ₁ = 2,05 tf					
Camada de rolamento			Marshall			Superpave		
			σ _h	σ _v	Δσ	σ _h	σ _v	Δσ
0,0	0,0	4,99	-1,8	-4,0	2,2	-0,2	-3,8	3,6
8,5			-1,5	-3,3	1,8	-0,7	-3,1	2,4
17,0			-1,2	-0,6	0,6	-2,3	-0,7	1,6
25,5			-1,5	-3,3	1,8	-0,7	-3,1	2,4
34,0			-1,8	-4,0	2,2	-0,2	-3,8	3,6
Camada de ligação			Marshall			Superpave		
			σ _h	σ _v	Δσ	σ _h	σ _v	Δσ
0,0	5,0	9,99	7,9	-1,9	9,8	7,7	-1,8	9,5
8,5			6,9	-1,6	8,5	6,7	-1,6	8,3
17,0			5,1	-1,3	6,4	5,3	-1,2	6,5
25,5			6,9	-1,6	8,5	6,7	-1,6	8,3
34,0			7,9	-1,9	9,8	7,7	-1,8	9,5
Q ₂ = 10,0 t								
X	Y	Z	q ₂ = 2,5 tf					
Camada de rolamento			Marshall			Superpave		
			σ _h	σ _v	Δσ	σ _h	σ _v	Δσ
0,0	0,0	4,99	-2,2	-4,6	2,4	-0,3	-4,4	4,1
8,5			-1,9	-3,9	2,0	-0,9	-3,7	2,8
17,0			-1,4	-0,7	0,7	-2,8	-0,8	2,0
25,5			-1,9	-3,9	2,0	-0,9	-3,7	2,8
34,0			-2,2	-4,6	2,4	-0,3	-4,4	4,1
Camada de ligação			Marshall			Superpave		
			σ _h	σ _v	Δσ	σ _h	σ _v	Δσ
0,0	5,0	9,99	9,3	-2,3	11,6	8,9	-2,1	11,0
8,5			8,2	-1,9	10,1	8,1	-1,9	10,0
17,0			6,3	-1,5	7,8	6,4	-1,5	7,9
25,5			8,2	-1,9	10,1	8,1	-1,9	10,0
34,0			9,3	-2,3	11,6	8,9	-2,1	11,0
Q ₃ = 12,0 t								
X	Y	Z	q ₃ = 3,0 tf					
Camada de rolamento			Marshall			Superpave		
			σ _h	σ _v	Δσ	σ _h	σ _v	Δσ
0,0	0,0	4,99	-2,6	-5,1	2,5	-0,5	-4,9	4,4
8,5			-2,3	-4,5	2,2	-1,0	-4,3	3,3
17,0			-1,7	-0,9	0,8	-3,4	-1,0	2,4
25,5			-2,3	-4,5	2,2	-1,0	-4,3	3,3
34,0			-2,6	-5,1	2,5	-0,5	-4,9	4,4
Camada de ligação			Marshall			Superpave		
			σ _h	σ _v	Δσ	σ _h	σ _v	Δσ
0,0	5,0	9,99	10,6	-2,6	13,2	10,4	-2,5	12,9
8,5			9,6	-2,3	11,9	9,5	-2,2	11,7
17,0			7,5	-1,8	9,3	7,6	-1,8	9,4
25,5			9,6	-2,3	11,9	9,5	-2,2	11,7
34,0			10,6	-2,6	13,2	10,4	-2,5	12,9

Fonte: Autor.

Nota: Para σ_h e σ_v (+ Tração; - Compressão).

Ao longo de diferentes posições para o eixo X, o gráfico da Figura 4.8 apresenta o comportamento da camada de ligação (binder) em relação à vida de fadiga (Nf).

Figura 4.8 – Vida de Fadiga (Nf) para diversas posições no eixo X



Fonte: Autor.

O gráfico apresentado na Figura 4.8 apresenta as variações que ocorrem para a vida de fadiga ($N_{f_{lab}}$) para os diferentes carregamentos Q_1 , Q_2 e Q_3 e ainda a variação para os diferentes métodos de dosagem. Observa-se que quanto menor o carregamento, maior o número de solicitações registradas, ou seja, maior a vida de fadiga da mistura asfáltica. Entre os métodos, pode-se constatar que os pavimentos que utilizaram as misturas dosadas pelo método Superpave apresentam um melhor desempenho em relação à vida de fadiga.

Como exemplo, cita-se o pavimento utilizando a dosagem pelo método Superpave e submetido ao carregamento Q_2 igual a 98 kN, que obteve uma vida de fadiga maior que o pavimento que utilizou a mistura dosada pelo método Marshall com carregamento Q_1 igual a 80kN. É possível observar ainda que as vidas de fadiga para as posições X igual a 0 cm e X igual a 34 cm são as menores, e que essas posições coincidem com o eixo de aplicação das cargas através das rodas. Para os demais pontos, pode ser verificado um número $N_{f_{lab}}$ maior, conduzindo a análise de vida de fadiga para esses pontos críticos. Foram calculados, então, os Nf de laboratório ($N_{f_{lab}}$),

ou seja, o número de solicitações ou de ciclos de carga na ruptura, obtido para uma dada diferença de tensões ($\Delta\sigma$) nos pontos de maior carregamento, utilizando-se as equações geradas nos ensaios de fadiga executados em laboratório. A Tabela 4.11 apresenta os resultados.

Tabela 4.11 – Vida de fadiga nos pontos de maior carregamento (Nflab)

Camada	Método	Equação de Vida de Fadiga	Nflab		
			q ₁ =2,05tf	q ₂ =2,5tf	q ₃ =3,0tf
Camada ligação (4,99 a 9,99 cm)	Marshall	$2.930,0(\Delta\sigma)^{-2,07}$	3.181	2.244	1.717
Camada ligação (4,99 a 9,99 cm)	Superpave	$5.153,7(\Delta\sigma)^{-3,168}$	6.450	4.053	2.447

Fonte: Autor.

Para os pontos críticos da camada de binder, verifica-se que a relação entre as vidas de fadiga das misturas Superpave e Marshall ($Nf_{\text{Superpave}}/Nf_{\text{Marshall}}$) é sempre maior que a unidade, evidenciando o melhor desempenho estrutural da camada de ligação obtida pelo método Superpave, porém com valores que gradativamente convergem para a unidade à medida que a carga por eixo Q é incrementada (Tabela 4.12).

Tabela 4.12 – Relação entre as vidas de fadiga obtidas por meio dos métodos Superpave e Marshall nos pontos de maior carregamento

X	Y	Z	Nf _{Superpave} /Nf _{Marshall}	Nf _{Superpave} /Nf _{Marshall}	Nf _{Superpave} /Nf _{Marshall}
			Q ₁ =80kN	Q ₂ =98kN	Q ₃ =118kN
0	0	9,99	2,0	1,7	1,4
34			2,0	1,7	1,4

Fonte: Autor.

Outra análise utilizando os dados obtidos no programa computacional Elsym5 refere-se à deflexão vertical recuperável que ocorre no topo da camada asfáltica. Esse deslocamento pode ser comparado com a deflexão recuperável admissível (D_{adm}) definida segundo o procedimento PRO-011 (DNER, 1979), que leva em consideração o volume de tráfego descrito no Manual de Pavimentação (DNIT, 2006b). Sendo esses volumes determinados em relação à espessura da camada de revestimento, para este trabalho, foi utilizada uma espessura de 10cm (5cm para camada de rolamento e 5cm

para a camada de ligação) que corresponde a $10^7 < N < 5 \times 10^7$, que são traduzidos pelo número N de solicitações do eixo padrão, e a carga aplicada à superfície do pavimento, correspondente ao carregamento do eixo padrão ($Q_1=80\text{kN}$). Ainda que a deflexão admissível seja calculada para o carregamento padrão, as deflexões verticais recuperáveis máximas, obtidas por meio do Elsym5 para carregamentos superiores ($Q_2=98\text{kN}$ e $Q_3=118\text{ kN}$), também foram quantificadas para fins de comparação com esse limite de referência.

A Tabela 4.13 apresenta os valores obtidos para a deflexão no ponto da superfície do pavimento e equidistante das rodas, para as cargas adotadas (Q_1 , Q_2 e Q_3), e a deflexão admissível para os volumes de tráfego N correspondentes.

Tabela 4.13 – Deflexões verticais recuperáveis no topo do pavimento adotado: comparativo com D_{adm} obtido para o carregamento padrão

Posição (cm)			N	D_{adm} (x0,01mm) PRO 011/79	Superpave (Deflexão x0,01mm)			Marshall (Deflexão x0,01mm)		
X	Y	Z			$Q_1=80\text{kN}$	$Q_2=98\text{kN}$	$Q_3=118\text{kN}$	$Q_1=80\text{kN}$	$Q_2=98\text{kN}$	$Q_3=118\text{kN}$
17	0	0	10^7	59,98	34,24	41,74	50,05	34,88	42,51	50,98
			5×10^7	45,18						

Fonte: Autor.

Analisando-se os dados obtidos para a deflexão, nota-se que, para um N igual a 5×10^7 , apenas os carregamentos de 80 kN e 98 kN atenderam ao critério de deflexão admissível. Já para N igual a 10^7 , as deflexões obtidas foram menores que a deflexão admissível para todos os carregamentos testados neste trabalho de pesquisa.

Os resultados evidenciam a necessidade de controle da carga por eixo, visando evitar a exposição de pavimentos a deflexões superiores à admissível e, conseqüentemente, a uma maior suscetibilidade aos mecanismos de fadiga. Observa-se, ainda, que as deflexões para as misturas asfálticas dosadas pelo método Superpave mostraram-se menores que as deflexões apresentadas pelas misturas asfálticas dosadas pelo método Marshall, realçando a importância do método de dosagem na concepção de produtos estruturais menos suscetíveis às patologias estruturais decorrentes desse mecanismo de deformação.

Os resultados das deflexões encontradas na análise estrutural do pavimento acompanham os resultados obtidos no ensaio de creep estático, constatando que, para as misturas asfálticas dosadas pelos métodos Marshall e Superpave, foram observados valores próximos para a parcela de deformação recuperável em ambos

os métodos. Esse fato ocorreu para as duas faixas granulométricas estudadas. Esta pequena diferença se deve aos valores próximos dos módulos de resiliência dessas misturas asfálticas.

4 CONCLUSÕES

Analisando os resultados estruturais para o pavimento adotado, observa-se que, para a aplicação de uma carga igual ao eixo padrão (Q_1 igual a 80kN), o $N_{f_{lab}}$ para as misturas asfálticas dosadas pelo método Superpave resultou em valores da ordem de duas vezes os encontrados para o $N_{f_{lab}}$ das misturas asfálticas dosadas pelo método Marshall, sendo que, para Q_2 igual a 98kN, esta diferença foi 75% maior, e para Q_3 igual a 118kN, esta diferença ficou em 47% acima. Estes valores apontam para um melhor desempenho em relação à vida de fadiga para as misturas asfálticas (capa asfáltica e binder) dosadas pelo método Superpave, constituindo um indicativo de uma maior vida de serviço destas misturas asfálticas quando aplicadas em campo.

Para as deflexões verticais recuperáveis encontradas, as misturas asfálticas dosadas pelos métodos Marshall e Superpave apresentaram valores próximos entre si, tanto para ensaios de creep estático, onde foram analisadas as composições de misturas asfálticas, como para a simulação do comportamento estrutural de um pavimento adotado utilizando o programa computacional Elsym5.

Grande parte dos indicadores estudados apontam que o método de dosagem Superpave fornece uma mistura asfáltica mais eficiente, devido a vários fatores, como observado por Ferreira et al. (2016), Marques (2004), Colpo et al. (2015), Santos et al. (2015) e Airey e Collop (2016), a saber: (i) a distribuição granulométrica, (ii) a quantidade de ligante asfáltico requerida para este tipo de dosagem e (iii) a forma de compactação por amassamento. Esses indicadores são válidos tanto para a camada de rolamento (capa asfáltica) como para a camada de ligação (binder) e ainda se analisado o conjunto estrutural do pavimento.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15184**. Materiais betuminosos - Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional. Rio de Janeiro, 2004.

AIREY, G. D. & COLLOP A. C. **Mechanical and structural assessment of laboratory – and field – compacted asphalt mixtures**. 17:1, 50-63. International Journal of Pavement Engineering, 2016.

ALMEIDA JÚNIOR, P. O. B.; BOEIRA, F. D.; SPECHT, L. P.; CERVO, T. C.; PEREIRA, D. S.; CENTOFANTE, R.; BARBOZA JÚNIOR, V.; SILVA, C. C. (2017). Avaliação laboratorial do tipo e teor de ligante e da granulometria na deformação permanente de misturas asfálticas. **Revista Transportes**, Rio de Janeiro, 2017. v. 26 n. 2, p. 1-15.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **M 323**: Standard Specification for Superpave volumetric mix design. Washington, D. C, 2017.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 5**: Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials, West Conshohocken, PA, 2013.

_____. **ASTM D 36**. Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus), West Conshohocken, PA, 2014

_____. **ASTM D 113**. Standard Test Method for Ductility of Asphalt Materials, West Conshohocken, PA, 2017.

_____. **ASTM D 1560**. Standard Test Methods for Resistance to Deformation and Cohesion of Asphalt Mixtures by Means of Hveem Apparatus, West Conshohocken, PA, 2015a.

_____. **ASTM D 2041**. Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures. USA, 2011.

_____. **ASTM D 2042**. Standard Test Method for Solubility of Asphalt Materials in Trichloroethylene, West Conshohocken, PA, 2015b.

_____. **ASTM D 2872**. Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test). West Conshohocken, PA, 2012.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica** – Formação básica para engenheiros. PETROBRÁS: ABEDA. Rio de Janeiro, 2008.

CARMO, C. A. T. **A avaliação do módulo de resiliência através de ensaios triaxiais dinâmicos de dois solos compactados e a sua estimativa a partir de ensaios rotineiros**. Dissertação de Mestrado. São Carlos: Escola de Engenharia, 1998.

COLPO, G. B.; BRITO, L. A. T.; CERATTI, J. A. P.; MEIRELLES, E.; HIRSCH, F.; CONTERATO, L.; VITORELLO, T. Caracterização da vida de fadiga de concreto asfáltico através do ensaio de flexão em viga quatro pontos. In: **9º Congresso Brasileiro de Rodovias e Concessões**, Brasília, 2015.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **PRO 011** – Avaliação estrutural dos pavimentos flexíveis. Procedimento de ensaio. Rio de Janeiro, 1979.

_____ **ME 024:** Pavimento - determinação das deflexões pela viga Benkelman. Rio de Janeiro, 1994a.

_____ **ME 078:** Agregado graúdo: adesividade a ligante betuminoso. Rio de Janeiro, 1994b.

_____ **ME 086:** Agregado: determinação do índice de forma. Rio de Janeiro, 1994c.

_____ **ME 148:** Material betuminoso - determinação dos pontos de fulgor e de combustão (vaso aberto cleveland) (ABNT - NBR 11341). Rio de Janeiro, 1994d.

_____ **ME 043:** Misturas betuminosas a quente – Ensaio Marshall para misturas betuminosas. Rio de Janeiro, 1995.

_____ **ME 193:** Produtos betuminosos líquidos e semi-sólidos – determinação da densidade 20 °C / 4 °C. Rio de Janeiro, 1996.

_____ **ME 266:** Agregados – determinação do teor de materiais pulverulentos. Rio de Janeiro, 1997.

_____ **ME 035:** Agregados: determinação da abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro, 1998a.

_____ **ME 081:** Agregados: determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo. Rio de Janeiro, 1998b.

_____ **ME 083:** Agregados: análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1998c.

_____ **ME 194:** Agregados - determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco chapman. Rio de Janeiro, 1998d.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **ES 031:** Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2006a.

_____ **Manual de Pavimentação.** 3ª Edição. Rio de Janeiro, 2006b.

_____ **ME 131:** Materiais asfálticos - determinação do ponto de amolecimento - método do anel e bola. Rio de Janeiro, 2010a.

_____ **ME 135:** Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010b.

_____ **ME 136:** Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010c.

_____**ME 155:** Material asfáltico – Determinação da penetração – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010d.

_____**ME 183:** Pavimentação asfáltica – Ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2018.

FERREIRA, J. L. S., SOARES, J. B., BASTOS, J. B. S. Métodos de seleção granulométrica com foco na resistência à deformação permanente. **Revista Transportes**, v. 24, n.2. p. 46-52, Rio de Janeiro, 2016.

GOUVEIA, L. T.; FERNANDES JÚNIOR, J. L.; SOARES, J. B. Influência da energia de compactação no comportamento volumétrico e mecânico de misturas asfálticas. **Revista Transportes**, volume XV, número 1. p. 34-41. Rio de Janeiro, 2007.

HUNTER, A.E., AIREY, G.D., and COLLOP, A.C., (2004). Aggregate orientation and segregation in laboratory compacted asphalt samples. 8–15 p. **Transportation Research Record**, 1891.

LEANDRO, R. P.; BERNUCCI, L. L. B.; BEJA, I. A.; CHAVES, J. M. Efeito do tipo de compactação no volume de vazios de uma mistura asfáltica densa. In: **43ª RAPv – Reunião Anual de Pavimentação e 17º ENACOR – Encontro Nacional de Conservação Rodoviária**. Maceió, 2014.

LITTLE, D. N.; BUTTON, J. W.; YOUSSEF, H. Development of criteria to evaluate uniaxial creep data and asphalt concret permanent deformation potential. p. 49-57. **Transportation Research Record** 1417, 1993.

MARQUES, G. L. O. **Utilização do Módulo de Resiliência como Critério de Dosagem de Mistura Asfáltica:** Efeito da Compactação por Impacto e Giratória. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2004.

NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM (NCHRP). **Simple performance test for Superpave mix design**. Relatório 465. Estados Unidos: 2002.

ONOFRE, F. C.; BESSA, I. S.; CASTELO BRANCO, V. T. F.; SOARES, J. B. Correlação entre variáveis de densificação do compactador giratório e resistência à deformação permanente de misturas asfálticas convencionais e com resíduos. v. 19, n. 1, p. 13-22. **Revista Transportes**, Rio de Janeiro: 2011.

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. v. 22, n. 2, p. 85-94. **Revista Transportes**, Rio de Janeiro, 2014.

RENKEN, P. Influence of specimen preparation onto the mechanical behaviour of asphalt mixtures. In: **2nd Eurasphalt & Eurobitume Congress**. p. 729–735. Breukelen, The Netherlands: Foundation Eurasphalt. Barcelona, 2000.

SANTOS, K. P.; LUCENA, A. E. F. L.; LUCENA, L. C. F. L.; SILVA, J. A. A.; COSTA, S. C. F. E. Estudo da incorporação de argilas montmorilonitas em cimentos asfálticos

de petróleo. v. 20, n. 2. p. 501-513. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, 2015.

SOUSA, J. B., DEACON, J. A., and MONISMITH, C. L. Effect of laboratory compaction on permanent deformation characteristics of asphalt-aggregate mixtures. v. 60, p. 533–585. **Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists**, 1991.

TASHMAN, L., MASAD, E., PETERSON, B., and SALEH, H. Internal structure analysis of asphalt mixes to improve the simulation of superpave gyratory compaction to field conditions. v. 70, p. 605–645. **Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists**: 2001.

ZUMRAWI, M. M. E.; EDREES, S. A. S. Comparison of marshall and superpave asphalt design methods for Sudan pavement mixes. **International Journal of Scientific and Technical Advancements**: 2016, v. 2, Issue 1, p. 29-35.

Capítulo 5

ANÁLISE ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS DE MISTURAS ASFÁLTICAS A QUENTE, DOSADAS PELO MÉTODO MARSHALL E SUBMETIDAS AO ENVELHECIMENTO DE CURTO PRAZO

RESUMO

Apresenta-se, neste estudo, uma avaliação comparativa entre os respectivos desempenhos estruturais de pavimentos flexíveis constituídos por revestimentos asfálticos resultantes da aplicação do método Marshall convencional e por misturas asfálticas dosadas por esse método submetidas ao envelhecimento de curto prazo, trabalhando-se com as faixas granulométricas B (camada de ligação ou binder) e C (camada de rolamento ou capa asfáltica) da atual especificação de serviço do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Após a definição da granulometria e do teor de ligante de projeto segundo o método Marshall, foram confeccionados corpos de provas, os quais foram ensaiados em laboratório, visando à determinação dos parâmetros mecânicos característicos de cada mistura asfáltica de projeto (estabilidade, resistência à tração por compressão diametral, módulo resiliente, fadiga e deformação permanente ou creep estático), para fins de comparação preliminar dos resultados. De posse dessas propriedades, utilizou-se o programa Elsym5 para a análise estrutural de um pavimento adotado, variando-se apenas as propriedades mecânicas da camada de revestimento, constituída pela capa asfáltica e pelo binder. Nas análises estruturais, cada pavimento adotado foi submetido a três níveis de carregamento (80kN, 98kN e 118kN) e a três níveis de pressão de enchimento dos pneumáticos (563kPa, 633kPa e 703kPa). Os resultados obtidos indicam que a inclusão do envelhecimento de curto prazo no método de dosagem interfere no comportamento mecânico das misturas asfálticas e, conseqüentemente, na resposta estrutural do pavimento flexível. Foi observado um melhor desempenho estrutural das misturas asfálticas dosadas pelo método Marshall e submetidas ao envelhecimento de curto prazo e, por conseguinte, dos pavimentos constituídos por tais misturas. Os resultados ressaltam que os corpos de prova submetidos ao envelhecimento de curto prazo obtiveram ganho no desempenho em suas propriedades mecânicas, se comparados aos corpos de prova que foram

confeccionados pelo método Marshall convencional, fornecendo mais um parâmetro passível de observação e estudo neste campo.

Palavras-chave: Mistura asfáltica; Método de dosagem Marshall; Envelhecimento de curto prazo; Análise estrutural de pavimento.

ABSTRACT

This study presents a comparative evaluation between the structural performances of two flexible pavements types, consisting of asphalt mixtures produced by the application of the conventional Marshall method and by asphalt mixtures dosed by this same method, after its subjection to a short-term aging. The granulometric bands B (bond layer) and C (bearing layer or asphalt layer) were used, classified according to the current service specification of the National Department of Transport Infrastructure. After the definition of the granulometry and the discovery of the asphalt binder content, according to Marshall method, the test bodies were made. The first laboratory tests aimed at determining the mechanical parameters characteristic of each asphalt mixture (stability, tensile strength by diametrical compression, resilient modulus, fatigue and permanent deformation) to obtain comparative parameters. From these initial results, the Elsym5 program was used for the structural analysis of a pavement-type, varying only the mechanical properties of the coating layer, consisting of the asphalt layer and the binder. In the structural analyzes, each pavement-type was subjected to three loading levels (80kN, 98kN and 118kN) and to three tire inflation pressure levels (563kPa, 633kPa and 703kPa). The final results indicate that the subjection to a short-term aging interferes in the mechanical behavior of the asphalt mixtures and, consequently, in the structural response of the flexible pavements. It was observed a better structural performance of the asphalt mixtures dosed by the Marshall method wich were subjected to a short-term aging and, therefore, a better performance of the pavements constituted by such mixtures. The results highlight the importance of improving Marshall method, providing another parameter that can be analyzed in this area.

Keywords: Asphalt mixtures, Marshall Method; Short-term aging; Structural pavement analyzis.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização do problema

O processo de envelhecimento de misturas asfálticas pode ser separado em duas fases: o envelhecimento de curto prazo, associado à exposição ao ar e ao calor durante a produção da mistura asfáltica, e o envelhecimento de longo prazo, que se desenvolve ao longo da vida útil da camada asfáltica. Dada a influência sobre as propriedades reológicas dos ligantes asfálticos, o envelhecimento tem sido objeto de estudos ao longo das últimas décadas, com o intuito de tentar incluir alguns critérios de controle nas especificações destes materiais (NASCIMENTO e FAXINA, 2017).

A metodologia Marshall não prescreve em seu método de ensaio, o ME 043 (DNER, 1995), o envelhecimento de curto prazo da mistura asfáltica, sendo este uma reprodução do efeito que ocorre quando uma mistura asfáltica a quente é usinada. Já a metodologia Superpave contempla este quesito e prescreve um envelhecimento de duas horas em estufa, com a mesma temperatura adotada para a compactação da mistura. Neste trabalho, o que se pretende é observar e comparar os efeitos desse envelhecimento de curto prazo para uma mistura asfáltica a quente, dosada pelo método Marshall.

Para Gigante et al. (2006) vários são os fatores que influenciam no comportamento mecânico de mistura asfáltica a quente, podendo citar: o tipo de ligante asfáltico utilizado; a faixa granulométrica adotada; o volume de vazios obtidos após a mistura dos materiais. Porém, existem alguns fatores que ocorrerão independentemente do tipo de ligante e agregados utilizados, dentre eles o envelhecimento da mistura asfáltica a quente, mais precisamente o envelhecimento do ligante asfáltico. Nascimento e Faxina (2017) complementam que a principal alteração do comportamento reológico dos materiais provocada pelo envelhecimento é o aumento da rigidez, tanto no curto prazo quanto no envelhecimento de longo prazo. A mesma observação é feita por Santos et. al. (2015) que apontam que o aumento no estado de rigidez das misturas asfálticas no campo está associado ao aumento adicional de viscosidade pelos efeitos do envelhecimento do material em serviço.

Araújo e Lins (2008) descrevem que o envelhecimento do ligante em uma mistura asfáltica ocorre em três etapas: a primeira, durante o processo de usinagem, representa 60% do envelhecimento total do ligante; a segunda, durante o transporte, espalhamento e compactação, representando 20% do envelhecimento total sofrido pelo ligante, sendo este período considerado como o envelhecimento de curto prazo; na terceira etapa, o envelhecimento ocorre durante a vida útil do revestimento, devido à ação do meio ambiente, e representa também 20% do envelhecimento total do ligante, sendo este período designado como envelhecimento de longo prazo.

Tanto o envelhecimento de curto prazo como o de longo prazo ocorrem pela oxidação do ligante asfáltico, porém para o primeiro caso esse envelhecimento acontece no processo de mistura, transporte e compactação, já para o segundo, a ocorrência do envelhecimento é percebida ao longo da vida útil do pavimento. Para Gigante et. al. (2006), uma vez que o envelhecimento é inevitável, e com ele o enrijecimento da mistura asfáltica, é importante o estudo e a pesquisa de como se dá o processo de envelhecimento e da tendência da mistura asfáltica apresentar alteração em sua rigidez e resistência. Para Balbo (2007), as consequências globais para o ligante asfáltico por conta do envelhecimento dos asfaltos são explicadas pelas seguintes características: aumento da consistência com consequente queda no valor da penetração a 25°C; aumento do ponto de amolecimento dado pelo ensaio de anel e bola; decréscimo da suscetibilidade térmica; e ainda o aumento do ponto de fragilidade Fraas; tais características advertem para que sejam observados com cuidado os limites de tempo e temperatura das misturas asfálticas a quente.

Bell e Sosnovske (1994) acreditam que a análise do envelhecimento do ligante asfáltico de forma isolada, sem levar em conta o tipo de agregado que está sendo utilizado para a confecção da mistura asfáltica, não é adequada nem suficientemente representativa. Após estudarem o envelhecimento de trinta e duas diferentes combinações de quatro tipos de agregados e oito tipos de ligantes asfálticos, chegaram a resultados que mostraram que os agregados têm considerável influência no envelhecimento.

Esses autores concluíram ainda que o envelhecimento das misturas asfálticas é influenciado pelo tipo de agregado e pelo tipo de ligante asfáltico e que testes de envelhecimento do ligante não parecem adequados para prever o desempenho da mistura, devido ao aparente efeito mitigador que o agregado tem sobre o

envelhecimento. O envelhecimento de certos ligantes asfálticos é fortemente diminuído por alguns agregados, mas não por outros. Esta variabilidade parece estar relacionada à força de ligação química (adesão) entre o ligante asfáltico e o agregado. Os autores constataram que a avaliação da interação ligante/agregado é muito mais influente do que a composição do ligante asfáltico para a adesão e a sensibilidade à água. Esta influência parece estar relacionada à interação química do agregado e do ligante asfáltico, a qual pode ser relacionada com a adesão: quanto maior a adesão, maior é o envelhecimento.

Marques (2004), estudando critérios de dosagem de misturas asfálticas, utilizando o módulo de resiliência, concluiu que a temperatura foi o fator mais importante para a variação dos módulos e de outros parâmetros. Desta forma, a temperatura é o fator preponderante que provoca o envelhecimento do ligante tanto no curto prazo (processo de mistura, transporte e compactação), como no longo prazo, quando este envelhecimento ocorre também por meio da exposição da mistura asfáltica aos efeitos da radiação solar.

Fernandes Júnior e Gouveia (2006) estudaram em laboratório a absorção de asfalto pelos agregados, em misturas asfálticas envelhecidas no curto e no longo prazo e concluíram que, para o envelhecimento de curto prazo, a absorção aumenta ao longo do período de exposição à temperatura de compactação, tendendo à estabilização, sendo esta absorção mais acentuada nas primeiras horas.

Babadopulos et al. (2016) observaram que o envelhecimento aumentou a resistência da mistura asfáltica à deformação permanente mais rapidamente para estados mais envelhecidos, indicando que a deformação permanente é um problema mais provável de ocorrer em idades precoces.

Observando as considerações acima, o objetivo dessa pesquisa foi comparar as mudanças de comportamento que ocorrem entre misturas asfálticas a quente dosadas pelo método Marshall convencional e misturas dosadas por esse mesmo método, porém, submetidas ao envelhecimento de curto prazo, simulando a fase de mistura, transporte, lançamento e compactação da mistura asfáltica em campo. Os efeitos que este envelhecimento provoca no comportamento mecânico das misturas são analisados através dos ensaios de estabilidade Marshall, tração por compressão diametral, resiliência e ainda ensaios de fadiga e deformação permanente (creep estático). Ainda foi analisado o comportamento estrutural das misturas asfálticas

utilizadas como camada de rolamento (faixa C) e camada de ligação (faixa B) utilizando o programa Elsym5, também no sentido de comparar o comportamento das misturas asfálticas dosadas pelo método Marshall convencional e misturas submetidas ao envelhecimento de curto prazo.

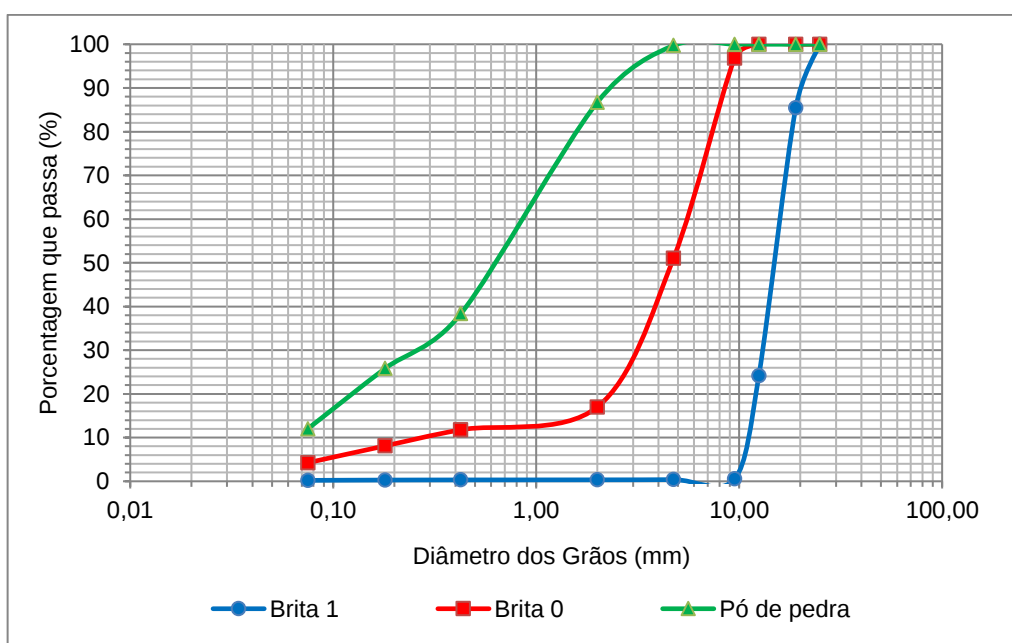
2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais utilizados

Os agregados empregados neste trabalho são de origem gnáissica, provenientes da pedreira de Ervália, localizada no município de Ervália-MG, Brasil. Foram usados agregados graúdos (brita 0 e brita 1) e agregado miúdo (pó de pedra). Nas misturas asfálticas, empregou-se o cimento asfáltico de petróleo CAP 50/70, oriundo da refinaria Gabriel Passos (REGAP), localizado em Betim-MG, e fornecido pela empresa Stratura Asfalto S/A. Este ligante foi certificado pelo laboratório da Petrobrás sob o nº 2505-14G.

Os agregados foram peneirados segundo a norma ME 083 (DNER, 1998c). Na Figura 5.1, pode-se observar a curva granulométrica do conjunto de agregados utilizados neste trabalho.

Figura 5.1 – Curva granulométrica dos agregados minerais empregados na pesquisa



Fonte: Autor.

2.2 Produção dos corpos de prova

Os corpos de prova foram produzidos segundo o que determina a especificação do método Marshall.

2.2.1 Método de dosagem Marshall

Após a caracterização dos agregados, foram adotadas duas faixas granulométricas contidas na especificação de serviço ES 031 (DNIT, 2006a), a saber, a faixa C, utilizada como camada de revestimento, e a faixa B, utilizada como camada de ligação.

Para a dosagem das misturas asfálticas correspondentes às duas faixas granulométricas previamente definidas, foi empregado o método Marshall, seguindo o que descreve o método de ensaio ME 043 (DNER, 1995).

O teor de ligante de projeto foi obtido mediante análise da variação do Volume de vazios (Vv) e da Relação Betume Vazios (RBV) em função dos cinco teores de ligante adotados inicialmente, obedecendo os limites inferiores e superiores para cada parâmetro (Vv e RBV).

2.2.2 Ensaio mecânicos para avaliar o comportamento das misturas asfálticas

Definidos os teores de projeto para cada faixa granulométrica adotada, foi avaliado o desempenho mecânico das misturas asfálticas mediante a realização dos ensaios de laboratório de resistência à tração por compressão diametral, módulo de resiliência, fadiga e deformação permanente (creep estático).

Para o ensaio de estabilidade Marshall, foi utilizado o ME 043 (DNER, 1995), sendo a estabilidade Marshall a resistência máxima à compressão radial apresentada pelo corpo de prova, quando moldado e ensaiado seguindo o que preconiza o método. A estabilidade é expressa em (kgf).

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral seguiu o que preconiza o ME 136 (DNIT, 2010c). Para o ensaio de módulo de resiliência (MR), foi utilizado o método de ensaio ME 135 (DNIT, 2010b) e para o ensaio de vida de fadiga, foi utilizado o método de ensaio ME 183 (DNIT, 2018).

Para estudar a deformação permanente neste trabalho, foi executado o ensaio de compressão uniaxial não confinada (creep estático), conforme a metodologia descrita no relatório 465 (NCHRP, 2002). Foi aplicado um carregamento estático com tensão de 0,1 MPa durante um período de 60 minutos, com mais um período de 15 minutos para recuperação da amostra e todo ensaio foi realizado com temperatura controlada em 40°C.

Do ensaio de creep estático são obtidos os parâmetros de deformação total média durante o ensaio (D_t), módulo de fluência (M_f), inclinação da curva de deformação na fase secundária de seu desenvolvimento (I_{curva}) e ainda a recuperação da deformação ocorrida ao longo do ensaio de creep estático.

2.2.3 Simulação do comportamento mecânico das misturas asfálticas utilizando o software Elsym5

Neste trabalho adotou-se uma mesma estrutura de pavimento, formada por uma camada de base, reforço de subleito e subleito para todas as situações estudadas, variando apenas a camada asfáltica e a de ligação. Foi utilizado o programa Elsym5 para a determinação das tensões e deslocamentos atuantes. Foram testados três tipos de carregamento, 80 kN, 98 kN e 118 kN, para um eixo simples de roda dupla (ESRD).

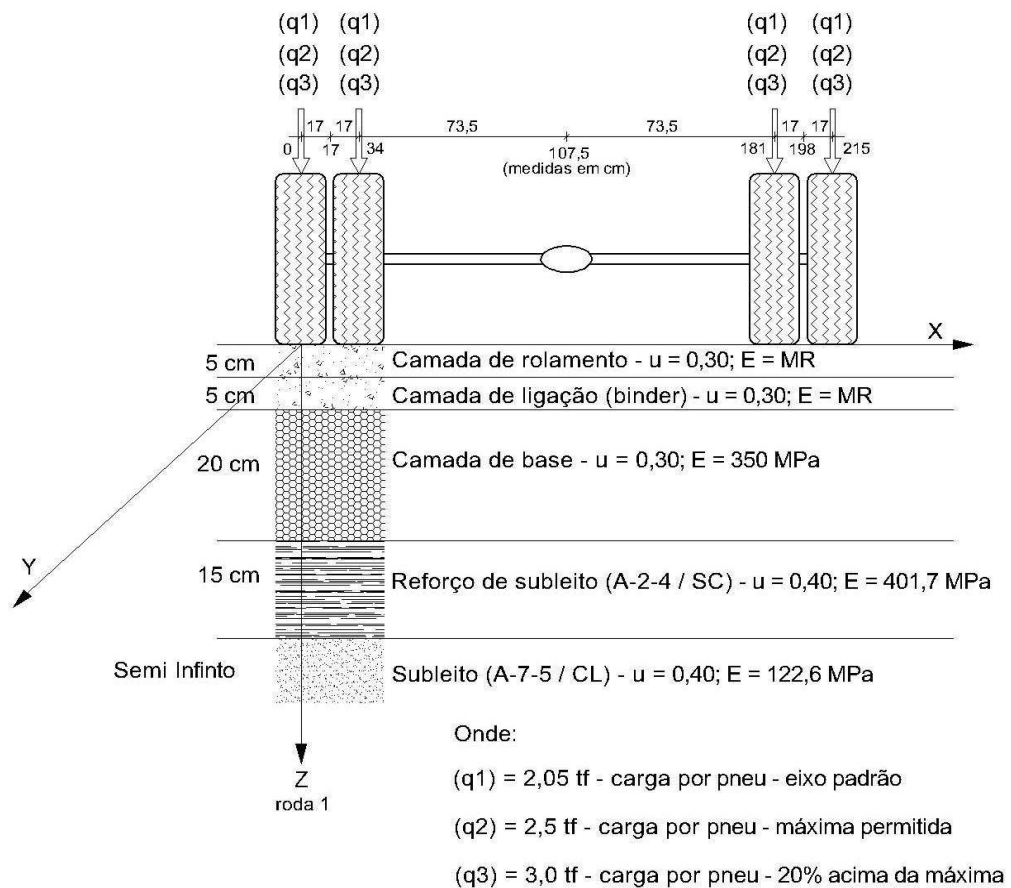
Para os dados de entrada no programa computacional Elsym5, foi adotado o módulo de resiliência (MR) para o módulo de elasticidade (E), admitindo-se um comportamento elástico linear para as camadas do pavimento. Segundo Ponte et al. (2014), outro dado de entrada é o coeficiente de Poisson, que deve ser admitido com valor igual a 0,30 para as camadas asfálticas (capa e ligação) e para a camada granular (base), caso não seja possível determinar este parâmetro.

Os níveis de carregamento foram determinados para: (i) Q_1 igual a 80 kN (8,2 tf), carga correspondente ao eixo padrão de 18.000 lb, sendo considerada uma carga baixa; (ii) Q_2 igual a 98 kN (10,0 tf), carga máxima permitida pela legislação brasileira para eixo simples de rodas duplas; e (iii) Q_3 igual a 118 kN (12,0 tf), carga 20% acima da carga máxima permitida, sendo utilizada para demonstrar os danos causados pelo excesso de carga nos veículos comerciais que circulam nas estradas. Acompanhando os três níveis de carregamentos, trabalhou-se com as seguintes pressões de

enchimento dos pneus: (i) P_1 igual a 563 kPa (80 psi), adotado para determinação da deflexão conforme o método de ensaio ME 024 (DNER, 1994a); (ii) P_2 igual a 633 kPa (90 psi), pressão considerada média; e (iii) P_3 igual a 703 kPa (100 psi), pressão considerada alta.

A Figura 5.2 ilustra as camadas, o pavimento adotado e o carregamento aplicado. As características dos materiais utilizados no subleito e reforço de subleito foram extraídas do estudo de Carmo (1998) e, para a camada de base, foram adotados os parâmetros do estudo de Ponte et al. (2014).

Figura 5.2 – Eixo simples de roda dupla, cargas aplicadas, parâmetros e espessura das camadas



Fonte: Autor.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Agregados e ligante asfáltico

Na Tabela 5.1 têm-se os resultados referentes à caracterização dos agregados minerais empregados neste trabalho.

Tabela 5.1 – Resultados da caracterização dos agregados minerais empregados nessa pesquisa

ENSAIOS	NORMAS TÉCNICAS	RESULTADOS OBTIDOS
Índice de forma dos agregados graúdos	ME086 (DNER, 1994c)	0,68
% de material pulverulento	ME 266 (DNER, 1997)	16,66%.
Abrasão "Los Angeles" dos agregados graúdos	ME 035 (DNER, 1998a)	45%
Adesividade dos agregados graúdos ao ligante betuminoso	ME 078 (DNER, 1994b)	Satisfatório com a adição de 0,1% de material dopante
Absorção - Brita 0	ME 081 (DNER, 1998b)	1,14%
Massa específica real Brita 0	ME 081 (DNER, 1998b)	2,794 g/cm ³
Massa específica e aparente- Brita 0	ME 081 (DNER, 1998b)	2,722 g/cm ³
Absorção - Brita 1	ME 081 (DNER, 1998b)	1,14%
Massa específica real - Brita 1	ME 081 (DNER, 1998b)	2,794 g/cm ³
Massa específica e aparente - Brita 1	ME 081 (DNER, 1998b)	2,722 g/cm ³
Massa específica agregado miúdo	ME 194 (DNER, 1998d)	2,798 g/cm ³
Análise granulométrica dos agregados	ME 083 (DNER, 1998c)	-

Fonte: Autor.

No que se refere aos resultados apresentados para a caracterização dos agregados, ocorreu apenas uma não conformidade para a adesividade entre o ligante e os agregados. Essa não conformidade foi reparada, adicionando-se ao ligante 0,1% de um produto dopante em relação ao peso do cimento asfáltico de petróleo CAP 50/70.

A Tabela 5.2 apresenta os resultados dos ensaios de caracterização, temperaturas de usinagem e compactação do CAP 50/70 utilizado neste trabalho de pesquisa.

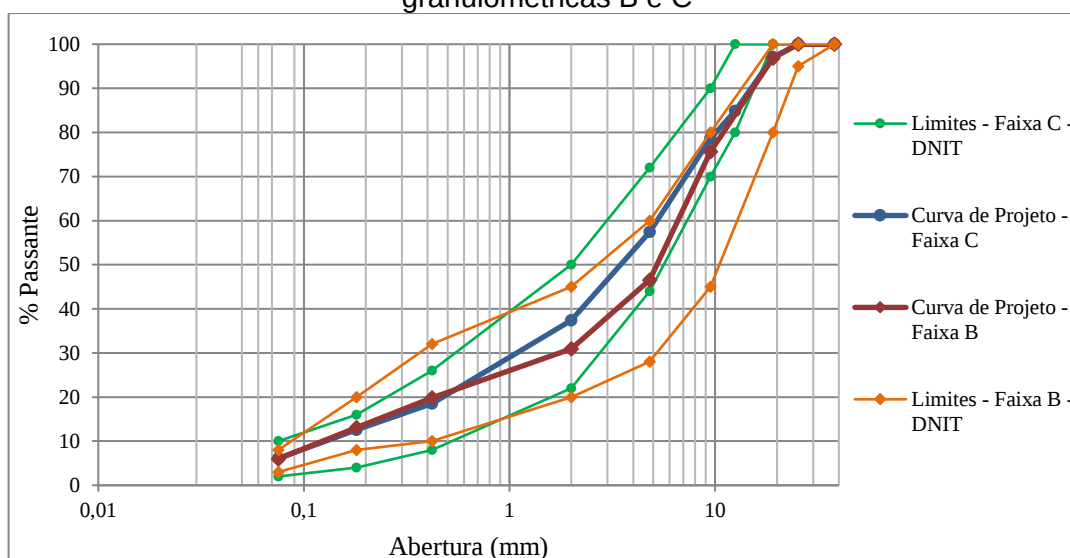
Tabela 5.2 – Resultados da caracterização do ligante asfáltico CAP 50/70

ENSAIOS	NORMAS TÉCNICAS	RESULTADOS OBTIDOS
Penetração	ME 155 (DNIT, 2010d)	56,93
Ponto de amolecimento	ME 131 (DNIT, 2010a)	51°C
Ponto de fulgor	ME 148 (DNER, 1994d)	343°C
Ponto de combustão	ME 148 (DNER, 1994d)	365 °C
Massa específica	ME 193 (DNER, 1996)	1,010 g/cm ³
Densidade relativa	ME 193 (DNER, 1996)	1,006 g/ cm ³
RTFOT Penetração Retida	D 5 (ASTM, 2013)	67%
RTFOT - Aumento do Ponto de Amolecimento	D 36 (ASTM, 2014)	3,8°C
RTFOT - Ductilidade a 25GC	D 113 (ASTM, 2017)	>150 cm
RTFOT Variação em % Massa	D 2872 (ASTM, 2012)	-0,003%
Solubilidade no Tricloroetileno	D 2042 (ASTM, 2015)	100 %massa
Viscosidade Rotacional Brookfield, 135 °C	NBR 15184 (2004)	318 cP
Viscosidade Rotacional Brookfield, 155 °C		162 cP
Viscosidade Rotacional Brookfield, 170 °C		51 cP

Fonte: Autor.

3.2 Curvas granulométricas para a dosagem

A Figura 5.3 mostra as curvas granulométricas de projeto que atenderam às faixas granulométricas de serviço B e C, para o método de dosagem Marshall, enquadradas nas especificações de serviço ES 031 (DNIT, 2006a).

Figura 5.3 – Curvas granulométricas para as misturas asfálticas de projeto das faixas granulométricas B e C

Fonte: Autor.

As curvas granulométricas definidas para as faixas granulométricas B e C, para o método Marshall atenderam aos requisitos especificados e aos limites

estipulados pela ES 031 (DNIT, 2006a), para a faixa B, foi utilizado 32% de brita 1, 41% de brita 0 e 27% de pó de pedra e para a faixa C, 20% de brita 1, 46% de brita 0 e 34% de pó de pedra.

3.3 Teor de projeto e resultados de ensaios mecânicos

3.3.1 Teor de projeto, Propriedades volumétricas, Estabilidade, RT e MR

Os teores de projeto para o ligante asfáltico definido para o método Marshall para cada curva granulométrica estudada são apresentados na Tabela 5.3. Os teores de projeto foram obtidos de acordo com o que prescreve o método e atenderam aos limites impostos pela ES 031 (DNIT, 2006a).

Tabela 5.3 – Teor de projeto para o método de dosagem Marshall

MÉTODO	TEOR DE PROJETO (%)	
	FAIXA GRANULOMÉTRICA B	FAIXA GRANULOMÉTRICA C
Marshall	4,20	4,70

Fonte: Autor.

Definidos os teores de ligante asfáltico de projeto para as duas faixas granulométricas estudadas e para o método de dosagem utilizado, foram realizados os ensaios de estabilidade Marshall, resistência à tração por compressão diametral (RT) e de módulo de resiliência (MR). A Tabela 5.4 apresenta os resultados.

Tabela 5.4 – Parâmetros e resultados mecânicos para as faixas granulométricas B e C

Parâmetro	FAIXA C		FAIXA B	
	Faixa C Marshall Convencional	Faixa C Marshall com Envelhecimento	Faixa B Marshall Convencional	Faixa B Marshall com Envelhecimento
Teor de Projeto (%)	4,7	4,7	4,2	4,2
V _v (%)	3,7	3,7	4,4	4,4
RBV (%)	75,99	75,99	70,39	70,39
R _T (MPa)	0,91	1,88	0,95	1,43
Estabilidade (kgf)	525	856	535	738
Módulo de Resiliência (MPa)	4073	6659	3948	5443
Relação MR/R _T (MPa)	4476	3542	4156	3806

Fonte: Autor.

Analisando os resultados acima, houve um ganho significativo nos parâmetros de resistência à tração por compressão diametral, estabilidade Marshall e módulo de resiliência para as amostras que foram submetidas ao envelhecimento de curto prazo, tanto para a faixa granulométrica C, como para a faixa granulométrica B.

Para estabilidade Marshall todas as misturas asfálticas atenderam ao limite mínimo estipulado pela ES 031 (DNIT, 2006a) que é de 500 kgf. Observa-se para este parâmetro o ganho de desempenho para as misturas asfálticas submetidas ao envelhecimento de curto prazo, da ordem de 63% maior para a faixa granulométrica C e 38% maior para faixa granulométrica B.

Também para a resistência à tração por compressão diametral (RT) houve um desempenho superior para as misturas envelhecidas, sendo o acréscimo neste parâmetro da ordem de 102% para a faixa C e 51% para a faixa B. Pode-se concluir que com a introdução do procedimento de envelhecimento de curto prazo nas misturas asfálticas estudadas, houve um aumento significativo da resistência à tração (RT) em relação às misturas dosadas pelo método Marshall convencional.

Para o módulo de resiliência (MR), as misturas asfálticas envelhecidas obtiveram valores superiores a 63% para a faixa C e 38%, para a faixa B, sendo estes percentuais os mesmos encontrados para a estabilidade Marshall. Porém, analisando os resultados obtidos para módulo de resiliência, percebe-se que todos os valores encontrados são valores típicos deste parâmetro, pois, de acordo com Bernucci et al. (2008), para concretos asfálticos a 25°C, valores numa faixa de 2000 a 80 00 MPa são valores típicos de módulo de resiliência (MR). Cavaleiro e Oliveira (2017) apontam que usinagem, estocagem e transporte influenciam sempre no sentido de aumentar o MR devido à oxidação do ligante. O envelhecimento de curto prazo adotado neste trabalho foi utilizado para simular o período em que a mistura asfáltica é usinada, transportada e lançada no pavimento para sua compactação, e isso realmente influenciou no aumento do módulo de resiliência das misturas aqui estudadas.

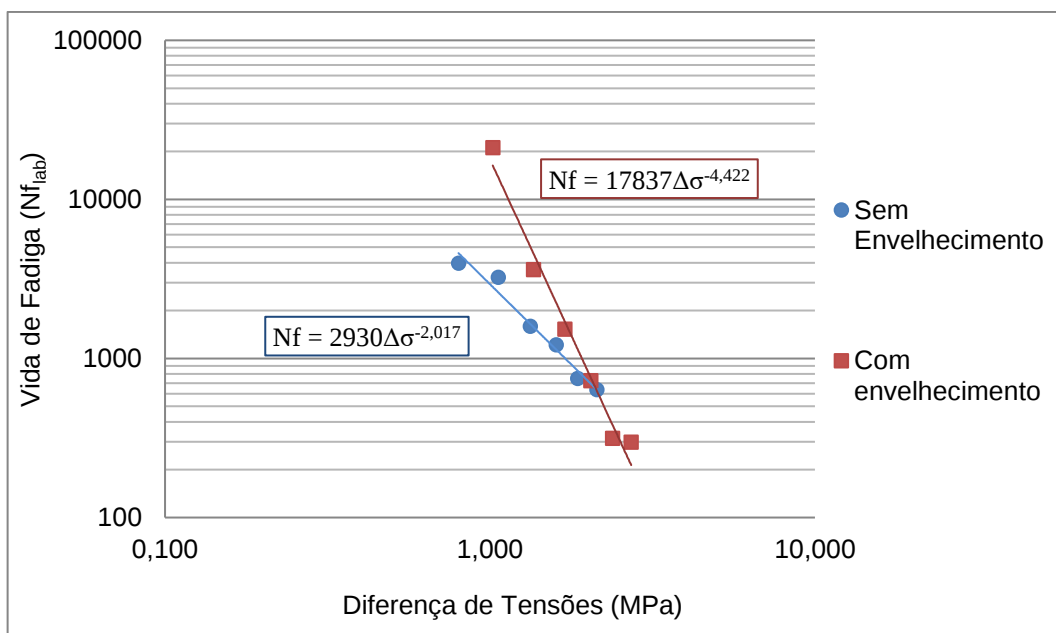
Segundo Santos et al. (2015) A relação entre MR e RT é um indicativo de vida de fadiga que agrega informações de rigidez e resistência mecânica, sendo que valores menores de MR/RT indicam melhor desempenho da mistura asfáltica, visto que é desejável uma baixa rigidez, para evitar a elevada absorção de tensões que levam ao trincamento prematuro do revestimento, e uma alta resistência à tração, uma vez que a mistura asfáltica vai resistir mais aos esforços de tração.

3.3.2 Ensaio de Fadiga

Para o ensaio de vida de fadiga, as Figuras 5.4 e 5.5 apresentam graficamente o desempenho das misturas asfálticas dosadas pelo método Marshall convencional e com o incremento de envelhecimento de curto prazo para as faixas C e B do DNIT.

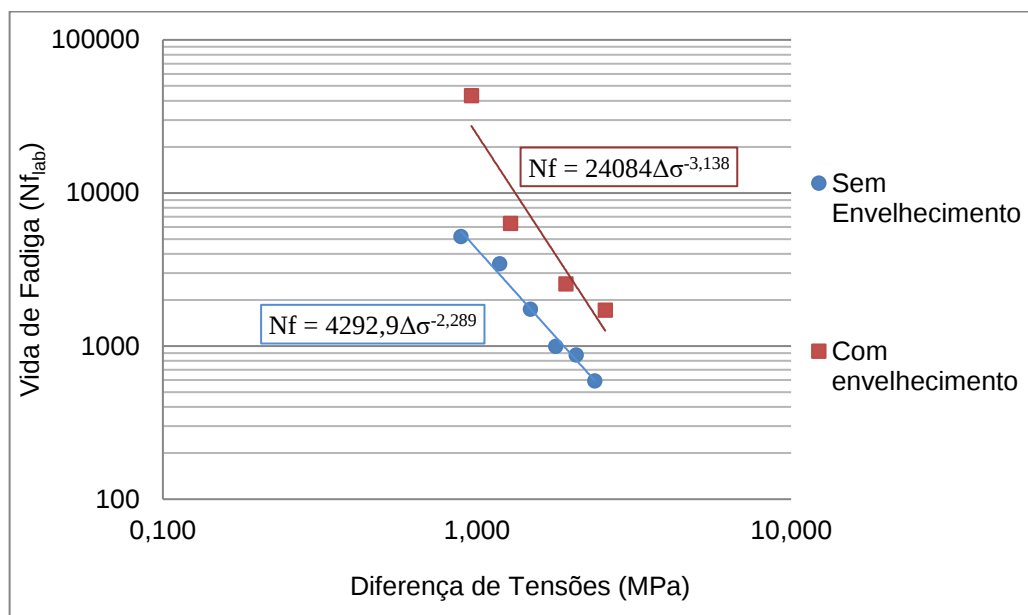
É possível observar, analisando os gráficos das Figuras 5.4 e 5.5, que os corpos de prova das misturas asfálticas estudadas, tanto da faixa C como os da faixa B, submetidos ao envelhecimento de curto prazo, apresentam um maior número de ciclos na ruptura para o ensaio laboratorial de vida de fadiga. É importante destacar que a fadiga é um parâmetro importante na concepção de um pavimento asfáltico, visto que está diretamente ligado à vida útil do revestimento.

Figura 5.4 – Vida de Fadiga ($N_{f_{lab}}$) versus Diferença de tensões ($\Delta\sigma$) – Faixa granulométrica B



Fonte: Autor.

Figura 5.5 – Vida de Fadiga (Nf) versus Diferença de tensões ($\Delta\sigma$) – Faixa granulométrica C



Fonte: Autor.

Para Motta et al. (2010), outro aspecto imediato de comparação entre as misturas asfálticas é a análise dos expoentes das equações geradas pelas curvas do ensaio de vida de fadiga, visto que quanto maior for este expoente mais sensível a mistura será a mudanças da estrutura do pavimento e das espessuras das camadas. Para as misturas asfálticas testadas nesta pesquisa é possível confirmar esta afirmação.

Pode-se admitir então, que para os materiais analisados nesta pesquisa, a incorporação ao método Marshall do procedimento de envelhecimento de curto prazo elevaram a vida de fadiga das misturas asfálticas, visto que os corpos de prova envelhecidos suportaram um número de ciclos superior aos corpos de prova não submetidos ao envelhecimento de curto prazo. Incorporando o envelhecimento de curto prazo ao método de ensaio Marshall, a mistura asfáltica produzida apresenta maior resistência ao trincamento por fadiga e estas características estariam mais próximas das aplicadas em campo, já que entre a fase de mistura em uma usina de asfalto e o lançamento desta mistura asfáltica na pista, há um espaço de tempo que deve ser considerado também na fase de ensaios em laboratório.

3.3.3 Ensaio de Fluência por Compressão Uniaxial Estática (Creep estático)

Outro parâmetro importante que deve ser observado na definição de uma mistura asfáltica para revestimento é a deformação permanente. Nas Tabelas 5.5 e 5.6, têm-se os resultados de ensaios de creep estático nas misturas asfálticas dosadas pelo método Marshall e também para misturas asfálticas submetidas ao envelhecimento de curto prazo, para as faixas granulométricas B e C. Foram comparados os grupos de corpos de prova dosados pelo método Marshall com o grupo de corpos de prova dosados pelo método Marshall e submetido ao envelhecimento de curto prazo, sendo analisadas as médias dos resultados para as faixas estudadas.

Tabela 5.5 – Média dos resultados de creep estático das misturas dosadas e compactadas pelo método Marshall – Faixa granulométrica B

Resultados Médios do Ensaio de CREEP ESTÁTICO – Faixa granulométrica B		
	Sem envelhecimento de curto prazo	Com envelhecimento de curto prazo
Tempo Final (s)	4500	4500
Dt – Deformação total (mm/mm)	0,0059	0,0020
Mf – Módulo de fluência (MPa)	19,88	50,55
I _{curva} – Inclinação da curva	0,012	0,017
Deslocamento máximo (mm)	0,442327	0,06832
Deslocamento final (mm)	0,381667	0,04799
Deslocamento recuperável (mm)	0,0607	0,0203

Fonte: Autor.

Tabela 5.6 – Média dos resultados de creep estático das misturas dosadas e compactadas pelo método Marshall – Faixa granulométrica C

Resultados Médios do Ensaio de CREEP ESTÁTICO – Faixa granulométrica C		
	Sem envelhecimento de curto prazo	Com envelhecimento de curto prazo
Tempo Final (s)	4500	4500
Dt – Deformação total (mm/mm)	0,0045	0,0007
Mf – Módulo de fluência (MPa)	25,34	175,96
I _{curva} – Inclinação da curva	0,025	0,059
Deslocamento máximo (mm)	0,3443333	0,17567
Deslocamento final (mm)	0,2923333	0,13233
Deslocamento recuperável (mm)	0,0520	0,0433

Fonte: Autor.

Iniciando as análises pelos valores das tabelas 5.5 e 5.6 e pelos resultados de deformação total (Dt), nota-se que para as faixas granulométricas B e C os corpos de prova dosados pelo método Marshall submetidos ao envelhecimento de curto prazo, indicam uma menor suscetibilidade ao fenômeno de deformação permanente.

Já para o módulo de fluência (M_f), seguindo o que descreve Little et al. (1993) para uma tensão de 0,1 MPa e um volume de tráfego de alta intensidade, o limite mínimo para o M_f deve ser de 31,0 MPa. Os dados das Tabelas 5.5 e 5.6 mostram que para os corpos de prova dosados pelo método Marshall convencional, essa condição não foi atendida para nenhuma das faixas, já para os corpos de prova dosados pelo método Marshall com envelhecimento de curto prazo, os valores encontrados atendem a esse critério para duas faixas citadas.

Outro parâmetro que deve ser analisado é a inclinação da curva (I_{curva}), no seu segundo estágio. Quanto maior o valor de inclinação da curva, mais suscetíveis estarão as misturas asfálticas à deformação permanente. Para este parâmetro, as misturas dosadas tanto pelo método Marshall convencional, quanto pelo método Marshall adotando em seu procedimento o envelhecimento de curto prazo, atendem aos limites apresentados por Little et al. (1993) para um tráfego de alta intensidade.

A deformação recuperável também apresenta um melhor desempenho para as misturas asfálticas que foram submetidas ao envelhecimento de curto prazo. Esse parâmetro indica que essas misturas asfálticas apresentam melhor desempenho ao se recuperar de uma deformação sofrida através da aplicação de cargas.

O conjunto de dados obtidos através do ensaio de fluência por compressão uniaxial estática aponta que as misturas asfálticas das faixas B e C, dosadas pelo método Marshall, só atendem aos parâmetros de deformação permanente, se adotado no processo de dosagem a inclusão do envelhecimento de curto prazo.

3.4. Análise estrutural

A Tabela 5.7 apresenta os resultados das tensões verticais e horizontais obtidas para o pavimento adotado neste trabalho em variados pontos da estrutura. É possível observar que a capa asfáltica apresentou tensões horizontais e verticais de compressão, ao passo que a camada de ligação foi solicitada à tração e à compressão, o que permite analisar o comportamento da mistura asfáltica nesta camada em relação à sua vida de fadiga. As tensões horizontais de tração atingem o seu maior valor em Z igual a 9,99cm, no bordo inferior da camada de ligação. Nessa profundidade, os pontos mais solicitados correspondem às posições X igual a 0cm e

X igual a 34cm, que representam os pontos de aplicação das cargas debaixo das rodas, para o eixo simples de rodas duplas (ESRD).

Tabela 5.7 – Tensões horizontais e verticais atuantes na camada de rolamento (capa asfáltica) e na camada de ligação (binder)

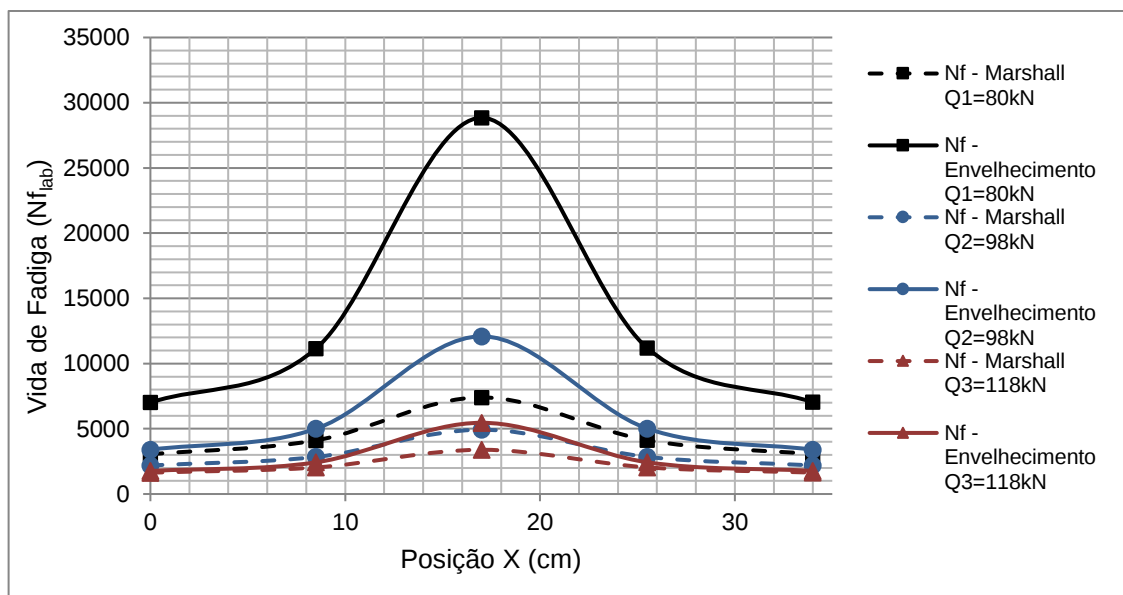
Posição (cm)			Tensão (kgf/cm²)					
Q ₁ = 8,2 t								
X	Y	Z	q ₁ = 2,05 tf					
Camada de rolamento			Marshall			Envelhecimento		
			σ _h	σ _v	Δσ	σ _h	σ _v	Δσ
0,0	0,0	4,99	-1,8	-4,0	2,2	-1,7	-3,8	2,1
8,5			-1,5	-3,3	1,8	-1,4	-3,1	1,7
17,0			-1,2	-0,6	0,6	-1,1	-0,5	0,6
25,5			-1,5	-3,3	1,8	-1,4	-3,1	1,7
34,0			-1,8	-4,0	2,2	-1,7	-3,8	2,1
Camada de ligação			Marshall			Envelhecimento		
			σ _h	σ _v	Δσ	σ _h	σ _v	Δσ
0,0	5,0	9,99	7,9	-1,9	9,8	10,8	-1,5	12,3
8,5			6,9	-1,6	8,5	9,7	-1,4	11,1
17,0			5,1	-1,3	6,4	7,8	-1,1	8,9
25,5			6,9	-1,6	8,5	9,7	-1,4	11,1
34,0			7,9	-1,9	9,8	10,8	-1,5	12,3
Q ₂ = 10,0 t								
X	Y	Z	q ₂ = 2,5 tf					
Camada de rolamento			Marshall			Envelhecimento		
			σ _h	σ _v	Δσ	σ _h	σ _v	Δσ
0,0	0,0	4,99	-2,2	-4,6	2,4	-2,0	-4,3	2,3
8,5			-1,9	-3,9	2,0	-1,8	-3,7	1,9
17,0			-1,4	-0,7	0,7	-1,3	-0,7	0,6
25,5			-1,9	-3,9	2,0	-1,8	-3,7	1,9
34,0			-2,2	-4,6	2,4	-2,0	-2,0	2,3
Camada de ligação			Marshall			Envelhecimento		
			σ _h	σ _v	Δσ	σ _h	σ _v	Δσ
0,0	5,0	9,99	9,3	-2,3	11,6	12,7	-1,8	14,5
8,5			8,2	-1,9	10,1	11,7	-1,7	13,4
17,0			6,3	-1,5	7,8	9,5	-1,4	10,9
25,5			8,2	-1,9	10,1	11,7	-1,7	13,4
34,0			9,3	-2,3	11,6	12,7	-1,8	14,5
Q ₃ = 12,0 t								
X	Y	Z	q ₃ = 3,0 tf					
Camada de rolamento			Marshall			Envelhecimento		
			σ _h	σ _v	Δσ	σ _h	σ _v	Δσ
0,0	0,0	4,99	-2,6	-5,1	2,5	-2,4	-4,9	2,5
8,5			-2,3	-4,5	2,2	-2,2	-4,4	2,2
17,0			-1,7	-0,9	0,8	-1,6	-0,8	0,8
25,5			-2,3	-4,5	2,2	-2,2	-4,4	2,2
34,0			-2,6	-5,1	2,5	-2,4	-4,9	2,5
Camada de ligação			Marshall			Envelhecimento		
			σ _h	σ _v	Δσ	σ _h	σ _v	Δσ
0,0	5,0	9,99	10,6	-2,6	13,2	14,7	-2,2	16,9
8,5			9,6	-2,3	11,9	13,7	-2,0	15,7
17,0			7,5	-1,8	9,3	11,4	-1,7	13,1
25,5			9,6	-2,3	11,9	13,7	-2,0	15,7
34,0			10,6	-2,6	13,2	14,7	-2,2	16,9

Fonte: Autor.

Nota: Para σ_h e σ_v (+ Tração; - Compressão).

Ao longo de diferentes posições para o eixo X, o gráfico da Figura 5.6 apresenta o comportamento da camada de ligação (binder) em relação à vida de fadiga (Nf).

Figura 5.6 – Vida de Fadiga (Nflab) para diversas posições no eixo X



Fonte: Autor.

O gráfico da Figura 5.6 apresenta as variações que ocorrem para a vida de fadiga (Nf) para os diferentes carregamentos Q_1 , Q_2 e Q_3 e ainda a variação entre as misturas asfálticas dosadas pelo método Marshall convencional e as misturas asfálticas dosadas pelo método Marshall e submetidas ao envelhecimento de curto prazo. Observa-se que quanto menor o carregamento maior o número de solicitações registradas, ou seja, maior a vida de fadiga da mistura asfáltica. Pode-se constatar ainda que os pavimentos que utilizaram as misturas dosadas pelo método Marshall e foram submetidas ao envelhecimento de curto prazo, apresentam um melhor desempenho em relação à vida de fadiga.

Como exemplo, cita-se o pavimento utilizando a dosagem Marshall com envelhecimento de curto prazo e submetido ao carregamento Q_2 igual a 98kN, que obteve uma vida de fadiga maior que o pavimento que utilizou a mistura dosada pelo método Marshall convencional com carregamento Q_1 igual a 80kN. É possível observar ainda que as vidas de fadiga para as posições X igual a 0cm e X igual a 34cm são as menores e que essas posições coincidem com o eixo de aplicação das cargas através das rodas. Para os demais pontos, pode ser verificado um número Nf maior, conduzindo a análise de vida de fadiga para esses pontos críticos. Foram

calculados, então, os Nf de laboratório (Nf_{lab}), ou seja, o número de solicitações ou de ciclos de carga na ruptura obtido para uma dada diferença de tensões ($\Delta\sigma$) nos pontos de maior carregamento, utilizando-se as equações geradas nos ensaios de fadiga executados em laboratório. A Tabela 5.8 apresenta os resultados.

Tabela 5.8 – Vida de fadiga – $Nf_{Laboratório}$

Camada	Método	Equação de vida de fadiga	Nf_{Lab}		
			$q_1=2,05tf$	$q_2=2,5tf$	$q_3=3,0tf$
Camada ligação (4,99 a 9,99 cm)	Marshall Convencional	$2.930,0(\Delta\sigma)^{-2,07}$	3.174	2.280	1.704
Camada ligação (4,99 a 9,99 cm)	Marshall c/ Envelhecimento	$17.837,0(\Delta\sigma)^{-4,422}$	7.646	3.704	1.925

Fonte: Autor.

Para os pontos críticos da camada de binder, verifica-se que a relação entre as vidas de fadiga das misturas Marshall com envelhecimento de curto prazo e Marshall convencional ($Nf_{Envelhecimento}/Nf_{Marshall}$) é sempre maior que a unidade, evidenciando o melhor desempenho estrutural da camada de ligação obtida com o envelhecimento de curto prazo de uma mistura asfáltica dosada pelo método Marshall, porém com valores que gradativamente convergem para a unidade à medida que a carga por eixo Q é incrementada (Tabela 5.9).

Tabela 5.9 – Relação entre as vidas de fadiga Marshall versus Marshall Envelhecimento nos pontos de maior carregamento

X	Y	Z	$Nf_{Envelhecimento}/Nf_{Marshall}$	$Nf_{Envelhecimento}/Nf_{Marshall}$	$Nf_{Envelhecimento}/Nf_{Marshall}$
			$Q_1=80kN$	$Q_2=98kN$	$Q_3=118kN$
0	0	9,99	2,3	1,6	1,1
34			2,3	1,6	1,1

Fonte: Autor.

Analisando-se os dados obtidos no programa computacional Elsym5 refere-se à deflexão vertical recuperável, que ocorre no topo da camada asfáltica. Esse deslocamento pode ser comparado com a deflexão recuperável admissível (D_{adm}), definida segundo o procedimento PRO-011 (DNER, 1979), que leva em consideração o volume de tráfego descrito no Manual de Pavimentação (DNIT, 2006b). Sendo esses volumes determinados em relação à espessura da camada de revestimento, para este trabalho foi utilizada uma espessura de 10cm (5cm para camada de rolamento e 5cm

para a camada de ligação) que corresponde a $10^7 < N < 5 \times 10^7$, que são traduzidos pelo número N de solicitações do eixo padrão, e a carga aplicada à superfície do pavimento, correspondente ao carregamento do eixo padrão ($Q_1=80\text{kN}$). Ainda que a deflexão admissível seja calculada para o carregamento padrão, as deflexões verticais recuperáveis máximas, obtidas por meio do programa computacional Elsym5 para carregamentos superiores ($Q_2=98\text{kN}$ e $Q_3=118\text{ kN}$), também foram quantificadas para fins de comparação com esse limite de referência.

A Tabela 5.10 apresenta os valores obtidos para a deflexão no ponto crítico, para as cargas adotadas (Q_1 , Q_2 e Q_3), e a deflexão admissível para os volumes de tráfego N correspondentes.

Tabela 5.10 – Deflexões verticais recuperáveis no topo do pavimento adotado: comparativo com D_{adm} obtido para o carregamento padrão

Posição (cm)			N	D_{adm} (x0,01mm) PRO 011/79	Marshall Convencional (Deflexão x0,01mm)			Marshall c/ Envelhecimento (Deflexão x0,01mm)		
X	Y	Z			$Q_1=80\text{kN}$	$Q_2=98\text{kN}$	$Q_3=118\text{kN}$	$Q_1=80\text{kN}$	$Q_2=98\text{kN}$	$Q_3=118\text{kN}$
17	0	0	10^7	59,98	34,88	42,51	50,98	33,34	40,63	48,72
			5×10^7	45,18						

Fonte: Autor.

Analisando-se os dados obtidos para a deflexão, nota-se que, para um N igual a 5×10^7 , apenas os carregamentos de 80kN e 98kN atenderam ao critério de deflexão admissível. Já para N igual a 10^7 , a deflexão obtida foi menor que a deflexão admissível para todos os carregamentos testados neste trabalho.

Os resultados evidenciam a necessidade de controle da carga por eixo, visando evitar a exposição de pavimentos a deflexões superiores à admissível e, conseqüentemente, a uma maior suscetibilidade aos mecanismos de fadiga. Observa-se, ainda, que as deflexões para as misturas asfálticas dosadas pelo método Marshall com envelhecimento de curto prazo mostraram-se menores que as deflexões apresentadas pelas misturas asfálticas dosadas pelo método Marshall convencional, realçando a importância de ser acrescentado ao método de dosagem o envelhecimento de curto prazo, o que leva à concepção de produtos estruturais menos suscetíveis às patologias estruturais decorrentes desse mecanismo de deformação.

Os resultados das deflexões encontradas na análise estrutural do pavimento acompanham os resultados obtidos no ensaio de creep estático, constatando que, para as misturas asfálticas dosadas pelo método Marshall com envelhecimento de

curto prazo, ocorreu um desempenho um pouco melhor em relação às misturas asfálticas dosadas pelo método Marshall convencional. Esse fato ocorreu para as duas faixas aqui estudadas, ou seja, faixa B e C do DNIT.

4 CONCLUSÕES

O objetivo desse estudo foi comparar uma mistura asfáltica a quente dosada pelo método Marshall, prescrito no ME 043 (DNER, 1995), submetendo essa mistura ao envelhecimento de curto prazo, ou seja, após a mistura dos materiais (agregados + ligante), a mistura é colocada em estufa por um período de duas horas, na temperatura definida para sua compactação. Foi possível notar que o grupo de corpos de prova envelhecido obteve desempenho superior para todos os parâmetros aqui estudados, tanto para a faixa B, como para a faixa granulométrica C do DNIT. Como já havia sido observado na literatura consultada, o envelhecimento de curto prazo faz com que a mistura asfáltica se aproxime da realidade, quando de sua aplicação em campo melhora o desempenho de misturas asfálticas a quente, visto que o cimento asfáltico de petróleo, utilizado como ligante, sofre ganho de rigidez com esse envelhecimento e também nesse curto período pode haver uma melhor absorção do ligante pelo agregado, melhorando assim o desempenho da mistura asfáltica.

Ganhos de desempenho nos ensaios de fadiga e deformação permanente (creep estático) chamam a atenção, visto que estes parâmetros estão diretamente ligados ao desempenho de uma mistura asfáltica a quente, quando utilizadas em revestimento nas pistas rodoviárias. Estes dois parâmetros são os principais critérios para a avaliação e aceitação, já que afetam a durabilidade e a serventia do pavimento.

Já para a deformação permanente, os corpos de prova submetidos ao envelhecimento de curto prazo se deformaram menos que os corpos de prova compactados logo após a mistura dos materiais. Para os parâmetros de deformação total (Dt) e módulo de fluência (Mf), é visível o melhor desempenho das misturas asfálticas que foram dosadas introduzindo o envelhecimento de curto prazo no processo.

Verificando o desempenho da estrutura do pavimento adotado após a aplicação das cargas Q_1 igual a 8,2tf, Q_2 igual a 10,0tf e Q_3 igual a 12,0tf para cada uma das configurações utilizando o programa Elsym5, temos: (i) para a aplicação de

uma carga igual ao eixo padrão (Q_1) observamos que o número N_{Lab} para as misturas asfálticas dosadas pelo método Marshall e submetidas ao envelhecimento de curto prazo, obtiveram valores da ordem de 2,4 vezes maior que os valores encontrados para o N_{Lab} dessas mesmas misturas asfálticas dosadas pelo método Marshall convencional; (ii) para Q_2 esta diferença observada foi de 62% maior e; (iii) para a carga Q_3 a diferença ficou em 13% maior, também para as misturas asfálticas dosadas pelo método Marshall com envelhecimento de curto prazo.

Já para as deflexões encontradas na avaliação do programa Elsym5 os valores para as misturas asfálticas dosadas pelo método Marshall com envelhecimento de curto prazo e também as misturas confeccionadas pelo método convencional Marshall, apresentaram um desempenho próximo, assim como ocorreu no ensaio de creep estático.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15184**. Materiais betuminosos - Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional. Rio de Janeiro, 2004.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 5**: Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials, West Conshohocken, PA, 2013.

_____. **ASTM D 36**. Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus), West Conshohocken, PA, 2014

_____. **ASTM D 113**. Standard Test Method for Ductility of Asphalt Materials, West Conshohocken, PA, 2017.

_____. **ASTM D 2042**. Standard Test Method for Solubility of Asphalt Materials in Trichloroethylene, West Conshohocken, PA, 2015b.

_____. **ASTM D 2872**. Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test). West Conshohocken, PA, 2012.

ARAUJO, M; LINS, V. F. C. Envelhecimento acelerado no concreto betuminoso usinado a quente – simulação da radiação. In: **Anais do 19 Encontro de Asfalto**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro do Asfalto IBP, 2008. v. 1. p. 09-16.

BABADOPULOS, L. F. A. L.; FERREIRA, J. L. S.; SOARES, J. B. (2016). An approach to couple aging to stiffness and permanent deformation modeling of asphalt mixtures. **Materials and Structures**, 1-17.10.1617/s11527-016-0834.

BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica**: materiais, projeto e restauração. Oficina de

textos, 560 p. São Paulo, 2007.

BELL, C. A.; SOSNOVSKE, D. **Aging**: Binder Validation. Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington-DC, 1994.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica** – Formação básica para engenheiros. PETROBRÁS: ABEDA. Rio de Janeiro, 2008.

CARMO, C. A. T. **A avaliação do módulo de resiliência através de ensaios triaxiais dinâmicos de dois solos compactados e a sua estimativa a partir de ensaios rotineiros**. Dissertação de Mestrado. São Carlos: Escola de Engenharia, 1998.

CAVALEIRO, E. A.; OLIVEIRA, F. H. L. **Transportes**, volume 26, número 1. Rio de Janeiro, 2017. p. 84-93.

COLPO, G. B.; BRITO, L. A. T.; CERATTI, J. A. P.; MEIRELLES, E.; HIRSCH, F.; CONTERATO, L.; VITORELLO, T. Caracterização da vida de fadiga de concreto asfáltico através do ensaio de flexão em viga quatro pontos. In: **9º Congresso Brasileiro de Rodovias e Concessões**, Brasília, 2015.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **PRO 011** – Avaliação estrutural dos pavimentos flexíveis. Procedimento de ensaio. Rio de Janeiro, 1979.

_____ **ME 024**: Pavimento - determinação das deflexões pela viga Benkelman. Rio de Janeiro, 1994a.

_____ **ME 078**: Agregado graúdo: adesividade a ligante betuminoso. Rio de Janeiro, 1994b.

_____ **ME 086**: Agregado: determinação do índice de forma. Rio de Janeiro, 1994c.

_____ **ME 148**: Material betuminoso - determinação dos pontos de fulgor e de combustão (vaso aberto cleveland) (ABNT - NBR 11341). Rio de Janeiro, 1994d.

_____ **ME 043**: Misturas betuminosas a quente – Ensaio Marshall para misturas betuminosas. Rio de Janeiro, 1995.

_____ **ME 193**: Produtos betuminosos líquidos e semi-sólidos – determinação da densidade 20 °C / 4 °C. Rio de Janeiro, 1996.

_____ **ME 266**: Agregados – determinação do teor de materiais pulverulentos. Rio de Janeiro, 1997.

_____ **ME 035**: Agregados: determinação da abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro, 1998a.

_____ **ME 081**: Agregados: determinação da absorção e da densidade de

agregado graúdo. Rio de Janeiro, 1998b.

_____ **ME 083:** Agregados: análise granulométrica. Rio de Janeiro 1998c.

_____ **ME 194:** Agregados - determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco chapman. Rio de Janeiro, 1998d.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **ES 031:** Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2006a.

_____ **Manual de Pavimentação.** 3ª Edição. Rio de Janeiro, 2006b.

_____ **ME 131:** Materiais asfálticos - determinação do ponto de amolecimento - método do anel e bola. Rio de Janeiro, 2010a.

_____ **ME 135:** Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010b.

_____ **ME 136:** Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010c.

_____ **ME 155:** Material asfáltico – Determinação da penetração – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010d.

_____ **ME 183:** Pavimentação asfáltica – Ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2018.

FERNANDES JÚNIOR, J. L.; GOUVEIA, L. T. Evaluation of short and long term asphalt absorption based on laboratory tests performed with gabbro aggregates. **International Journal of Pavements**, 2006, v. 05, p. 199-200.

FERREIRA, J. L. S., SOARES, J. B., BASTOS, J. B. S. Métodos de seleção granulométrica com foco na resistência à deformação permanente. **Revista Transportes**, v. 24, n.2. p. 46-52, Rio de Janeiro, 2016.

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**, Brasília, 2006. v. II. p. 1170-1181.

KA YAN NG, A.; FURLAN, A. P.; FABBRI, G. T. P.; PEREIRA FILHO, J. D.; GIGANTE, A. C. Estudo do efeito da temperatura e de algumas propriedades de misturas asfálticas densas na deformação permanente à luz de ensaios de fluência por compressão uniaxial estática e dinâmica. In: **41ª RAPv – Reunião anual de pavimentação**. Fortaleza, 2012.

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 1417, 1993, p. 49-57.

MARQUES, G. L. O. **Utilização do Módulo de Resiliência como Critério de Dosagem de Mistura Asfáltica**: Efeito da Compactação por Impacto e Giratória. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2004.

MOTTA, L. M. G.; RIBEIRO F. L. B.; ESTEFEN, S. F. **Estudo comparativo do Comportamento de Fadiga de Misturas Betuminosas com Diferentes Teores de Asfalto**. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2010.

MOURA, E.; CHAVES, J. M.; BERNUCCI, L. L. B.; CANDEIAS, C.M. Estudo de deformação permanente em trilha de roda de revestimentos asfálticos com simulador de tráfego de campo e de laboratório. In: **6º Congresso Nacional de Rodovias e Concessões CBR&C**, Florianópolis, 2009.

NASCIMENTO, T. C. B.; FAXINA, A. L. Avaliação dos efeitos da radiação ultravioleta sobre propriedades reológicas de ligantes asfálticos modificados com PPA e copolímeros SBS e SBR. **Revista Transportes**, Rio de Janeiro, 2017. v. 25, n. 1, p. 73-81.

NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM (NCHRP). **Simple performance test for Superpave mix design**. Relatório 465. Estados Unidos: 2002.

NOGUEIRA, M. G. **Comparação do comportamento em campo de concretos asfálticos com cap 30-45 e com cap 50-70 para revestimentos de pavimentos**. Dissertação de Mestrado. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2008.

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**, Rio de Janeiro, 2014. v. 22, n. 2, p. 85-94.

SANTOS, K. P.; LUCENA, A. E. F. L.; LUCENA, L. C. F. L.; SILVA, J. A. A.; COSTA, S. C. F. E. Estudo da incorporação de argilas montmorilonitas em cimentos asfálticos de petróleo. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, 2015. v. 20 n. 2. p. 501-513.

Capítulo 6

ANÁLISE ESTRUTURAL DE REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS DOSADOS PELO MÉTODO MARSHALL E COMPACTADOS EM ENERGIAS EQUIVALENTES

RESUMO

Este estudo avaliou comparativamente os desempenhos estruturais de pavimentos flexíveis, constituídos por revestimentos asfálticos resultantes da aplicação do método Marshall, para as faixas granulométricas B (camada de ligação ou binder) e C (camada de rolamento ou capa asfáltica) do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, compactados no compactador Marshall e no compactador giratório Superpave. Após a definição da granulometria e do teor de ligante, um grupo de corpos de prova foi compactado no compactador Marshall e outro grupo de corpos de prova, compactado no compactador giratório Superpave, em energia equivalente, para que fossem produzidas as mesmas características volumétricas. Após a definição da energia equivalente de compactação, foram confeccionados corpos de provas, ensaiados em laboratório com o objetivo de determinar os parâmetros mecânicos característicos de cada mistura asfáltica de projeto (estabilidade, resistência à tração por compressão diametral, módulo resiliente, fadiga e deformação permanente ou creep estático), para fins de comparação preliminar dos resultados. De posse dessas propriedades, utilizou-se o programa computacional Elsym5 para a análise estrutural de um pavimento adotado, variando-se apenas as propriedades mecânicas da camada de revestimento, constituídas pela capa asfáltica e pelo binder. Nas análises estruturais, cada pavimento adotado foi submetido a três níveis de carregamento (80kN, 98kN e 118kN) e a três níveis de pressão de enchimento dos pneumáticos (563kPa, 633kPa e 703kPa). Os resultados obtidos indicam que a forma de compactação interfere no comportamento mecânico das misturas asfálticas e, conseqüentemente, na resposta estrutural do pavimento flexível. Foi observado um melhor desempenho estrutural das misturas asfálticas dosadas pelo método Marshall, mas compactadas no compactador giratório Superpave e, por conseguinte, dos pavimentos constituídos por tais misturas.

Palavras-Chave: Misturas asfálticas; Métodos de dosagem; Métodos de compactação; Número de giros equivalente; Análise estrutural de pavimento flexível.

ABSTRACT

This study compared the structural performances of flexible pavements, consisting of asphalt coatings resulting from the application of the Marshall method, for the granulometric bands B (bonding layer or binder) and C (rolling layer or asphalt layer) of the National Department of Transport Infrastructure. The asphalt mixtures were compacted in both the Marshall compactor and the Superpave gyratory compactor. After the determination of the granulometry and the asphalt binder content, one group of specimens were compacted in the Marshall compactor and another group of specimens were compacted in the Superpave gyratory compactor, in equivalent energy, to produce the same volumetric characteristics. After setting the compaction equivalent energy, the test bodies were made. The first laboratory tests aimed at determining the mechanical parameters characteristic of each asphalt mixture (stability, tensile strength by diametrical compression, resilient modulus, fatigue and permanent deformation) to obtain comparative parameters. From these initial results, the Elsym5 program was used for the structural analysis of a pavement-type, varying only the mechanical properties of the coating layer, consisting of the asphalt layer and the binder. In the structural analyzes, each pavement-type was subjected to three loading levels (80kN, 98kN and 118kN) and to three tire inflation pressure levels (563kPa, 633kPa and 703kPa). The results indicate that the compacting form interferes with the mechanical behavior of the asphalt mixtures and, consequently, the structural response of the flexible pavement. It was observed a better structural performance of asphalt mixtures dosed by the Marshall method, but compacted in the Superpave gyratory compactor and, therefore, of the pavements constituted by such mixtures.

Keywords: Asphalt mixtures; Dosing methods; Compaction methods; Number of equivalent turns; Structural pavement analysis.

1 INTRODUÇÃO

A formação do esqueleto estrutural de uma mistura asfáltica está relacionada à quantidade de energia de compactação aplicada, assim como às características de superfície dos agregados, para misturas produzidas numa mesma granulometria. Também a elevação da energia de compactação é vista como uma maneira apropriada de vencer a resistência à compactação mais elevada, imposta por agregados mais angulares e rugosos (Gouveia et al. 2007).

Uma diferença importante entre o método Superpave e o método Marshall está no processo de compactação dos corpos de prova. Ao ser desenvolvido pelos pesquisadores do Strategic Highway Research Program (SHRP), estes desejavam um dispositivo que compactasse a amostra de mistura asfáltica de forma mais semelhante possível à compactação de campo, produzindo densidades finais correlatas às densidades obtidas no pavimento em condições reais de clima e carregamento, sendo a forma de compactação um dos principais diferenciais entre o método Superpave e o método Marshall. Desse modo, torna-se importante analisar o efeito da compactação em relação ao desempenho mecânico das misturas asfálticas estudadas, verificando o comportamento dessas misturas principalmente em ensaios de fadiga e deformação permanente (creep estático), já que estes parâmetros estão intimamente ligados ao desempenho e à serventia em relação à vida útil de um pavimento.

Segundo Vasconcelos e Soares (2005), o impacto na compactação das misturas durante a dosagem Marshall produz corpos de prova com densidades diferentes das densidades do pavimento em campo, já o método de dosagem Superpave utiliza a compactação por amassamento que se aproxima mais da compactação efetuada em campo.

Para Mampearachchi e Fernando (2012), os esforços de compactação determinados em métodos de dosagem de misturas asfálticas, são utilizados para reproduzir em laboratório as densidades que estas misturas devem apresentar em campo. O número de golpes ou a quantidade de giros é definido para atender um determinado volume de tráfego, tanto para o método Marshall, como para o método Superpave, sendo possível no método Superpave a captura de dados da densidade durante a compactação do corpo de prova.

Segundo Medina e Motta (2015), dois tipos de solicitações mecânicas são comumente observados nas estruturas do pavimento: a flexão repetida, que leva à fadiga do material e a um inevitável trincamento do revestimento asfáltico, e a compressão, que contribui para o acúmulo de deformações permanentes. Cumpre então, ao revestimento asfáltico, contribuir com sua parcela de suporte a tais esforços, o que deve ocorrer através de uma dosagem criteriosa e de uma compactação adequada e eficaz da mistura asfáltica.

Estudo realizado por Oliveira Filho (2007), para granulometrias com Tamanho Máximo Nominal (TMN) de 12,5 mm, mostrou que a compactação Marshall parece produzir misturas com rigidez inferior e com uma menor vida de fadiga, em comparação às produzidas com o compactador giratório Superpave (CGS). A pesquisa corrobora, portanto, os estudos de Vasconcelos e Soares (2005), que observam uma maior vida de fadiga para amostras compactadas no CGS em relação às misturas dosadas e compactadas pelo método Marshall, o que pode ter ocorrido, segundo os autores, por um melhor arranjo dos agregados após a compactação por amassamento do procedimento Superpave.

Não é possível comparar diretamente os teores de ligante asfáltico entre os métodos Marshall e Superpave, já que a definição desse teor de ligante asfáltico se dá em função da energia de compactação de cada método. Para um determinado teor encontrado na dosagem Marshall haverá uma energia equivalente no compactador giratório Superpave. Para se definir o teor de projeto de uma mistura asfáltica a quente nos dois tipos de dosagem estudados neste capítulo, um fator importante é a energia de compactação, admitindo que para um determinado teor de projeto encontrado na dosagem Marshall, haverá uma energia equivalente no Superpave, onde o mesmo teor será encontrado, ou seja, um número de giros equivalente (NASCIMENTO, 2008).

Nesse contexto, o objetivo do presente trabalho foi avaliar os efeitos produzidos pela forma de compactação de misturas asfálticas a quente dosadas pelo método Marshall, sendo compactadas no compactador mecânico Marshall e no compactador giratório Superpave (CGS). Essa avaliação baseou-se na comparação de propriedades mecânicas de misturas asfálticas das faixas granulométricas B e C da ES 031 (DNIT, 2006a) para as duas formas de compactação e em condições equivalentes de energia de compactação, produzindo corpos de prova com características volumétricas semelhantes.

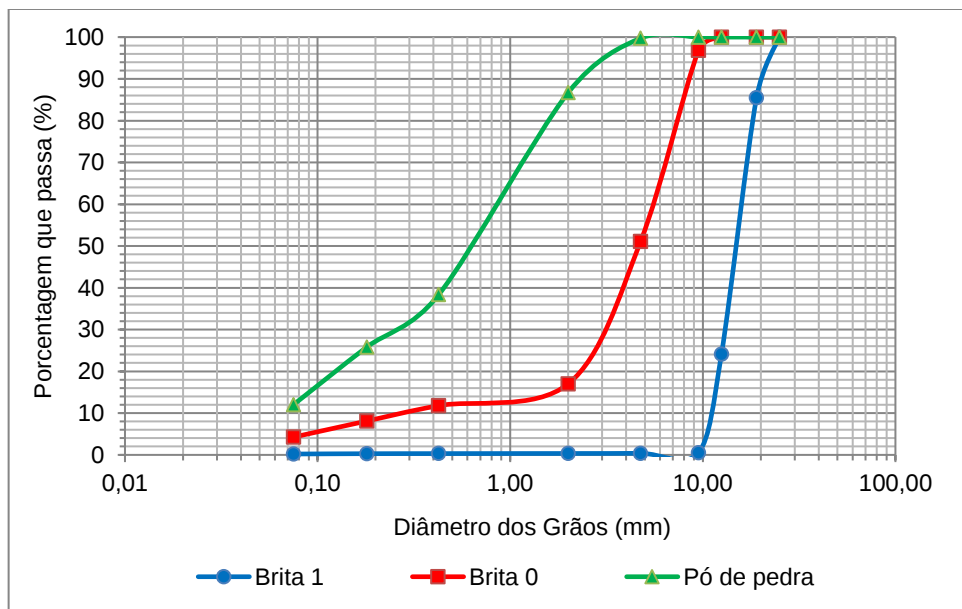
2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais utilizados

Os agregados empregados neste trabalho são de origem gnáissica, provenientes da pedreira de Ervália, localizada no município de Ervália em Minas Gerais, Brasil. Foram usados agregados graúdos (brita 0 e brita 1) e agregado miúdo (pó de pedra). Nas misturas asfálticas, empregou-se o cimento asfáltico de petróleo CAP 50/70, oriundo da refinaria Gabriel Passos (REGAP), localizado em Betim-MG, e fornecido pela empresa Stratura Asfalto S/A. Este ligante foi certificado pelo laboratório da Petrobrás sob o nº 2505-14G.

Os agregados foram peneirados segundo a norma ME 083/98 (DNER, 1998c). Na Figura 6.1, pode-se observar a curva granulométrica do conjunto de agregados utilizados neste trabalho.

Figura 6.1 – Curva granulométrica dos agregados minerais empregados na pesquisa



Fonte: Autor.

2.2 Produção de corpos de prova

Os corpos de prova foram produzidos segundo o que determina as especificações do método de dosagem Marshall.

2.2.1 Método de dosagem Marshall

Para a dosagem das misturas asfálticas correspondentes às duas faixas granulométricas previamente definidas, foi adotado o procedimento Marshall, segundo o método de ensaio ME 043 (DNER,1995).

Foram estudados cinco teores de ligante pelo método Marshall e analisado o desempenho de cada mistura asfáltica para o respectivo teor de ligante. Os teores adotados foram 4,0%; 4,5%; 5,0%; 5,5% e 6,0% para a Faixa C, baseando-se em experiências de misturas asfálticas já produzidas no Laboratório de Materiais Asfálticos e Misturas do Departamento de Engenharia Civil, da Universidade Federal de Viçosa – DEC/UFV –, para os mesmos materiais, agregados e CAP. Já para a faixa B, os teores adotados foram 3,5%, 4,0%; 4,5%; 5,0% e 5,5%, também admitidos a partir de experiências em misturas asfálticas já produzidas com esses materiais. Foram confeccionados três corpos de prova para cada teor.

O teor de projeto do ligante asfáltico foi obtido a partir da análise da variação do Volume de vazios (Vv) e da Relação Betume-Vazios (RBV) em função dos cinco teores de ligante adotados inicialmente, obedecendo aos limites inferiores e superiores para cada parâmetro (Vv e RBV).

2.2.2 Número de giros equivalente

Após definidos os respectivos teores de projeto das misturas asfálticas correspondentes às faixas B e C, através do método de dosagem Marshall, foram compactados no compactador giratório Superpave corpos de prova a 160 giros, adotando-se este número de giros para obter a relação entre o volume de vazios e o número de giros ($Vv \times n^\circ$ giros) e a partir dessa curva definir o número de giros equivalente (N_{eq}) ao volume de vazios encontrado nas misturas asfálticas compactadas pelo método de dosagem Marshall. De posse das curvas (Vv versus n° Giros) geradas pelo tratamento dos dados provenientes do procedimento de compactação Superpave, foi definido o número de giros equivalente (N_{eq}) para a

compactação das misturas asfálticas no CGS. Os corpos de prova compactados a um N_{eq} no CGS apresentaram as mesmas características volumétricas dos corpos de prova compactados no compactador mecânico Marshall, para o teor de ligante de projeto adotado para as faixas B e C do DNIT.

2.2.3 Ensaios mecânicos

Após a compactação dos corpos de prova no compactador Marshall e no compactador giratório Superpave, foram determinadas as propriedades mecânicas das misturas asfálticas. Para o ensaio de estabilidade Marshall, foi utilizado o ME 043 (DNER, 1995). O ensaio de resistência à tração por compressão diametral seguiu o que preconiza o ME 136 (DNIT, 2010c). Para o ensaio de módulo de resiliência (MR), foi utilizado o método de ensaio ME 135 (DNIT, 2010b). Para a fadiga, foi tomado como base o método de ensaio ME 183 (DNIT, 2018).

Neste trabalho foi executado o ensaio de fluência por compressão uniaxial não confinada (creep estático), conforme metodologia descrita no relatório 465 (NCHRP, 2002). Little et al. (1993) descreve como o ensaio de fluência por compressão uniaxial possibilita verificar a sensibilidade de misturas asfálticas ao fenômeno de deformação permanente. Para o teste foi aplicado um carregamento estático com tensão de 0,1MPa durante um período de 60 minutos, com mais um período de 15 minutos para recuperação da amostra e o ensaio foi realizado com temperatura controlada de 40°C. Neste ensaio foram obtidos os parâmetros de deformação total média (D_t), módulo de fluência (M_f), inclinação da curva de deformação na fase secundária de seu desenvolvimento (I_{curva}) e ainda a recuperação da deformação ocorrida ao longo do ensaio de creep estático.

2.2.4 Análise estrutural

Neste trabalho, adotou-se uma estrutura pré-dimensionada, utilizando o programa Elsym5 para a determinação das tensões, deformações e deslocamentos atuantes na mesma. O pavimento adotado foi constituído de capa asfáltica, camada de ligação, camada de base, camada de reforço de subleito e subleito. Foram testados três tipos de carregamento, para um eixo simples de roda dupla (ESRD).

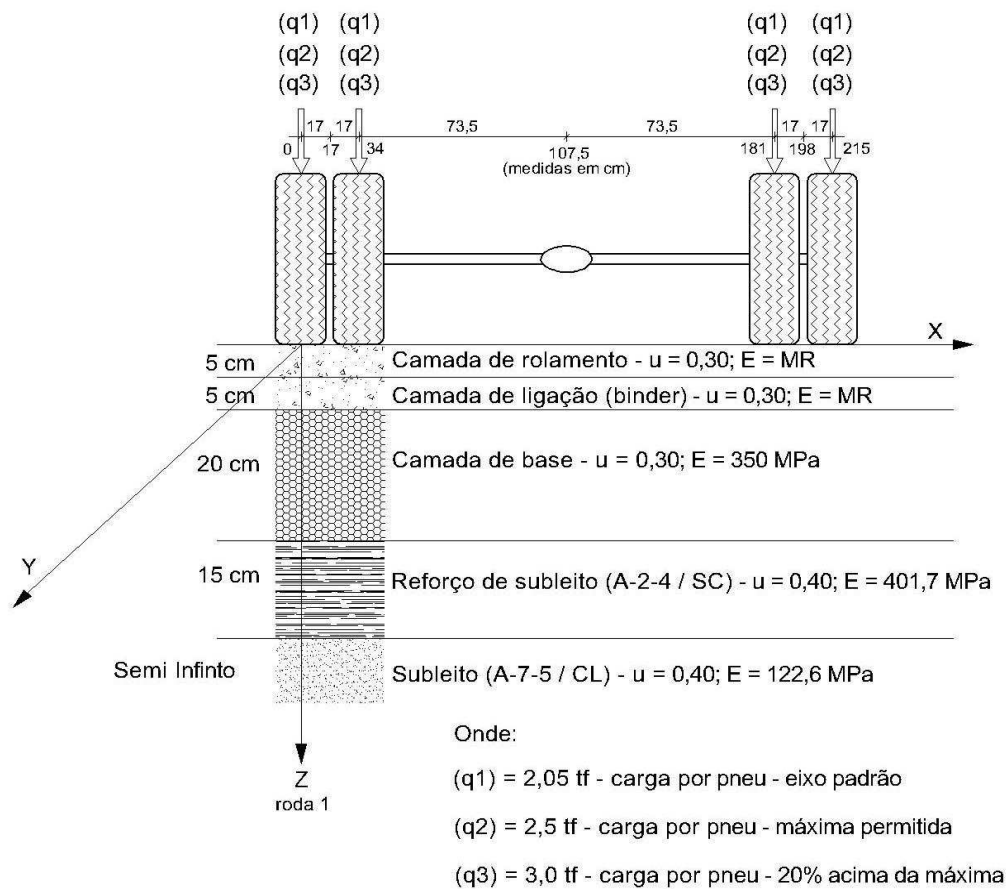
Para os dados de entrada no programa Elsym5, o módulo de elasticidade (E) foi considerado igual módulo resiliente (MR), admitindo-se um comportamento elástico linear para as camadas do pavimento.

Os níveis de carregamento foram determinados para: (i) Q_1 igual a 80kN (8,2tf), carga correspondente ao eixo padrão de 18.000lb, sendo considerada uma carga baixa; (ii) Q_2 igual a 98kN (10,0tf), carga máxima permitida pela legislação brasileira para eixo simples de rodas duplas; e (iii) Q_3 igual a 118kN (12,0tf), carga 20% acima da carga máxima permitida, sendo utilizada para demonstrar os danos causados pelo excesso de carga nos veículos que circulam nas estradas.

Acompanhando os três níveis de carregamentos, trabalhou-se com as seguintes pressões de enchimento dos pneus: (i) P_1 igual a 563kPa (80psi), adotado para determinação da deflexão conforme o método de ensaio ME 024 (DNER, 1994a); (ii) P_2 igual a 633kPa (90psi), pressão considerada média; e (iii) P_3 igual a 703kPa (100psi), pressão considerada alta.

A Figura 6.2 ilustra as camadas estruturais, o pavimento adotado e o carregamento aplicado. As características dos materiais utilizados nas camadas de subleito e reforço de subleito (μ e E) foram extraídos do estudo de Carmo (1998), e, para as camadas de base (μ e E) e de revestimento (μ), foram adotados os parâmetros do estudo de Ponte et al. (2014). Os módulos de elasticidade (E) das camadas estruturais componentes do revestimento asfáltico (capa asfáltica e binder) corresponderam aos respectivos módulos resilientes obtidos nessa pesquisa segundo cada um dos métodos de dosagem adotados.

Figura 0.2 – Eixo simples de roda dupla, cargas aplicadas, parâmetros e espessura das camadas



Fonte: Autor.

3 RESULTADOS E ANÁLISES

3.1 Agregados e ligante asfáltico

Na Tabela 6.1, têm-se os resultados referentes à caracterização dos agregados minerais empregados neste trabalho.

Tabela 6.1 – Resultados da caracterização dos agregados minerais empregados na pesquisa

ENSAIOS	NORMAS TÉCNICAS	RESULTADOS OBTIDOS
Índice de forma dos agregados graúdos	ME086 (DNER, 1994c)	0,68
Ensaio de material pulverulento	ME 266 (DNER, 1997)	16,66%.
Abrasão "Los Angeles" dos agregados graúdos	ME 035 (DNER, 1998a)	45%
Adesividade dos agregados graúdos ao ligante betuminoso	ME 078 (DNER, 1994b)	Satisfatório com a adição de 0,1% de material dopante
Absorção - Brita 0	ME 081 (DNER, 1998b)	1,14%
Massa específica real- Brita 0	ME 081 (DNER, 1998b)	2,794 g/cm ³
Massa específica e aparente- Brita 0	ME 081 (DNER, 1998b)	2,722 g/cm ³
Absorção - Brita 1	ME 081 (DNER, 1998b)	1,14%
Massa específica real - Brita 1	ME 081 (DNER, 1998b)	2,794 g/cm ³
Massa específica e aparente - Brita 1	ME 081 (DNER, 1998b)	2,722 g/cm ³
Massa específica agregado miúdo	ME 194 (DNER,1998d)	2,798 g/cm ³
Análise granulométrica dos agregados	ME 083 (DNER, 1998c)	-

Fonte: Autor.

No que se refere aos resultados apresentados para a caracterização dos agregados, ocorreu apenas uma não conformidade para a adesividade entre o ligante e os agregados. Essa não conformidade foi reparada, adicionando-se ao ligante 0,1% de um produto dopante em relação ao peso do cimento asfáltico de petróleo CAP 50/70. A Tabela 6.2 apresenta os resultados dos ensaios de caracterização, temperaturas de usinagem e compactação do CAP 50/70 utilizado neste trabalho.

Tabela 6.2 – Resultados da caracterização do ligante asfáltico CAP 50/70

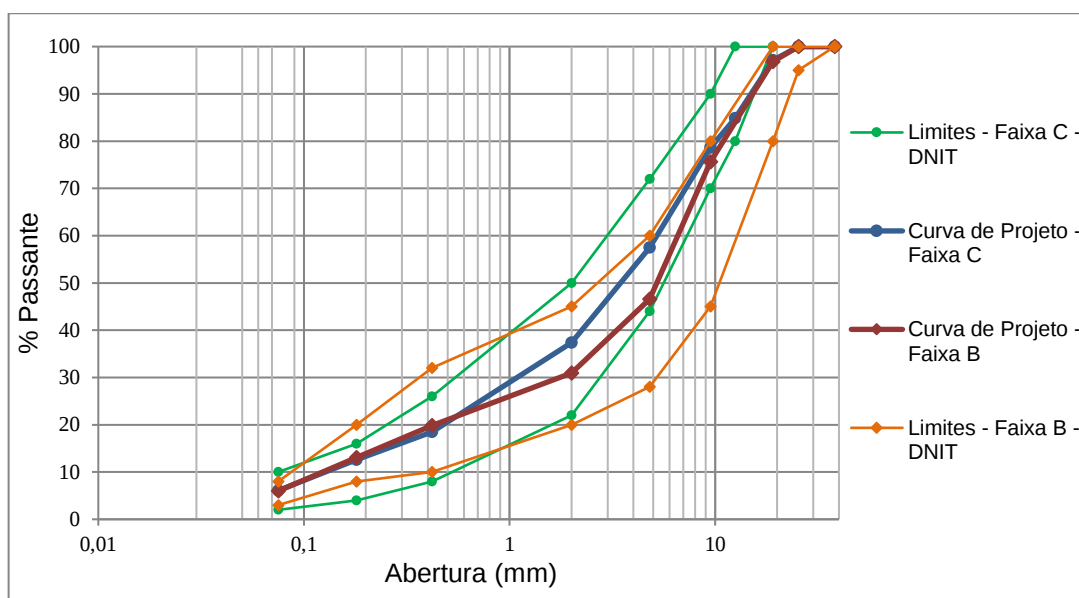
ENSAIOS	NORMAS TÉCNICAS	RESULTADOS OBTIDOS
Penetração	ME 155 (DNIT, 2010d)	56,93
Ponto de amolecimento	ME 131 (DNIT, 2010b)	51°C
Ponto de fulgor	ME 148 (DNER, 1994d)	343° C
Ponto de combustão	ME 148 (DNER, 1994d)	365°C
Massa específica	ME 193 (DNER, 1996)	1,010 g/cm ³
Densidade relativa	ME 193 (DNER, 1996)	1,006 g/ cm ³
RTFOT Penetração Retida	D 5 (ASTM, 2013)	67%
RTFOT - Aumento do Ponto de Amolecimento	D 36 (ASTM, 2014)	3,8°C
RTFOT - Ductilidade a 25GC	D 113 (ASTM, 2017)	>150 cm
RTFOT Variação em % Massa	D 2872 (ASTM, 2012)	-0,003%
Solubilidade no Tricloroetileno	D 2042 (ASTM, 2015b)	100 %massa
Viscosidade Rotacional Brookfield, 135 °C	NBR 15184 (2004)	318 cP
Viscosidade Rotacional Brookfield, 155 °C		162 cP
Viscosidade Rotacional Brookfield, 170 °C		51 cP

Fonte: Autor.

3.2 Curvas granulométricas dos agregados

A Figura 6.3 mostra as curvas granulométricas de projeto correspondentes às faixas de serviço B e C, para o método Marshall. Enquadradas nas especificações de serviço ES 031 (DNIT, 2006a).

Figura 6.3 – Curvas para as misturas asfálticas de projeto da faixa B e faixa C



Fonte: Autor.

3.3 Teor de projeto, parâmetros volumétricos, parâmetros mecânicos e número de giros equivalente

Os parâmetros obtidos para as faixas C e B do DNIT e os teores de projeto para o ligante asfáltico, definidos para os corpos de prova dosados e compactados segundo o que prescreve o método Marshall atenderam aos limites especificados na ES 031 (DNIT, 2006a). A Tabela 6.3 apresenta os resultados.

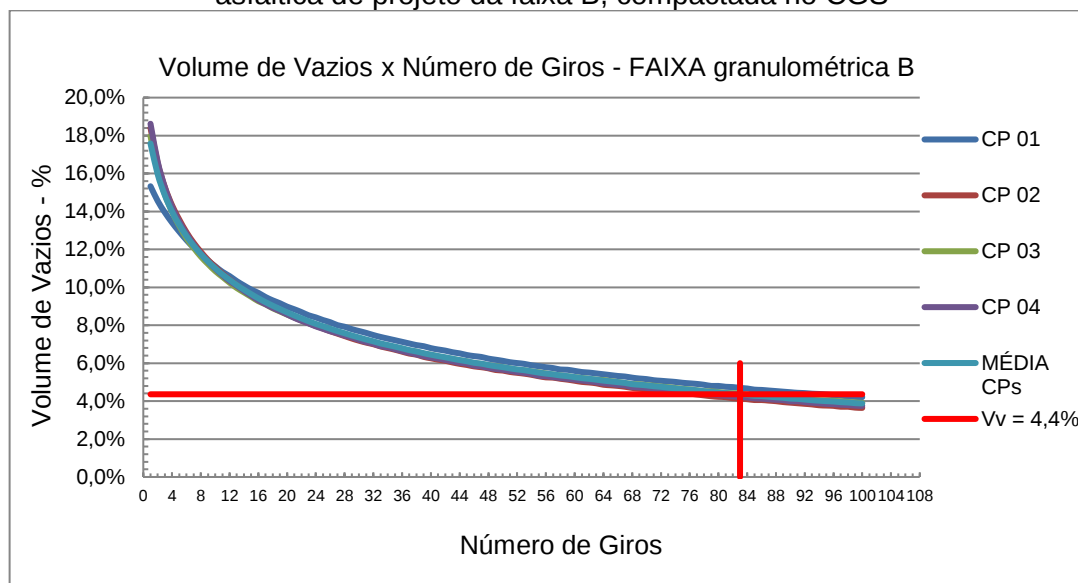
Tabela 6.3 – Teor de projeto, Vv, RBV, Estabilidade e Resistência à tração por compressão diametral para as misturas asfálticas de projeto – método de dosagem Marshall

Parâmetro	Faixa B	Faixa C
Teor de Projeto (%)	4,2	4,7
v (%)	4,4	3,7
RBV (%)	0,39	75,99
Estabilidade (kgf)	535	525
RT (MPa)	0,95	0,91

Fonte: Autor.

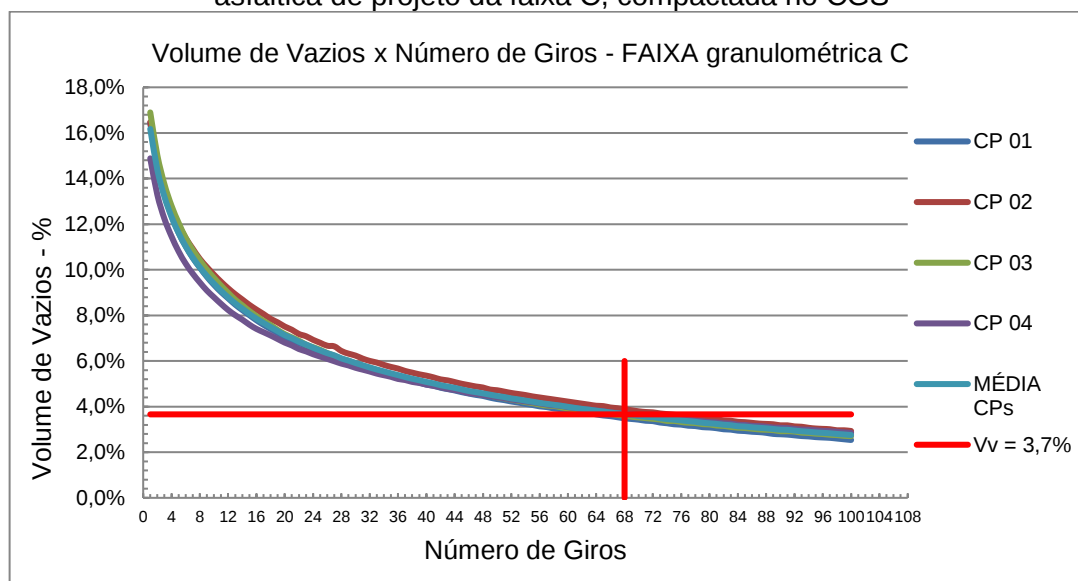
Definidos os teores de ligante asfáltico de projeto para as granulometrias estudadas e de posse do volume de vazios para cada uma delas (Faixa B: Vv igual a 4,4% e Faixa C: Vv igual a 3,7%), foram confeccionados grupos de corpos de prova com teor de ligante igual a 4,2%, para faixa B, e 4,7%, para a faixa C. As misturas asfálticas foram compactadas no CGS, a 160 giros, sendo adotado este número de giros para que fosse possível obter a curva (Vv versus nº de Giros), garantindo que ao final da compactação o volume de vazios (Vv) obtido nesta compactação seria menor que o volume de vazios encontrado na compactação Marshall. Após a compactação no compactador giratório Superpave, foi obtida uma curva média e, a partir dela, definido o número de giros correspondente para um volume de vazios (Vv) igual ao volume de vazios obtido na compactação Marshall para cada granulometria estudada. As Figuras 6.4 e 6.5 apresentam os resultados.

Figura 6.4 – Curvas representativas da relação Vv x Número de giros para a mistura asfáltica de projeto da faixa B, compactada no CGS



Fonte: Autor.

Figura 6.5 – Curvas representativas da relação Vv x Número de giros para a mistura asfáltica de projeto da faixa C, compactada no CGS



Fonte: Autor.

Analisando os gráficos obtidos após a compactação dos corpos de prova das misturas asfálticas de projeto, foram definidos, como número de giros equivalente (N_{eq}) no compactador giratório Superpave (CGS), os seguintes valores: N_{eq} igual a 68 giros, para a faixa C; N_{eq} igual a 83 giros, para a faixa B. Determinados esses números de giros, foram preparadas misturas asfálticas nos teores de ligante de projeto (4,7% para a faixa C e 4,2% para a faixa B), as quais foram compactadas no

CGS com os respectivos números de giros equivalentes para cada faixa (faixa B, 83 giros e faixa C, 68 giros). Após a moldagem e compactação, os corpos de prova foram submetidos aos seguintes ensaios: (i) estabilidade Marshall, (ii) resistência à tração por compressão diametral (RT), (iii) módulo de resiliência (MR), (iv) fadiga e (v) deformação permanente (creep estático).

3.4 Resultados de ensaios mecânicos e relação MR/RT

A Tabela 6.4 apresenta os resultados dos corpos de prova compactados no compactador Marshall, a 75 golpes por face e os resultados dos corpos de prova compactados no CGS a um número de giros equivalente (N_{eq}), para cada uma das faixas estudadas.

Tabela 6.4 – Resultados mecânicos e relação MR/RT após compactações, obtidos para as faixas B e C

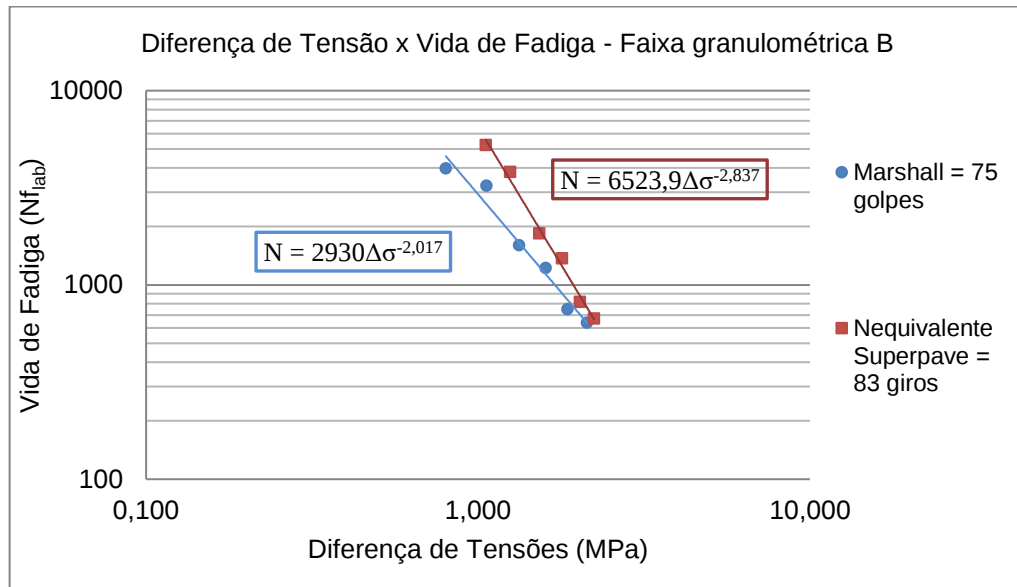
	Faixa C – 4,7% de Ligante		Faixa B – 4,2% de Ligante	
	Compactador Mecânico Marshall	Compactador Superpave (CGS)	Compactador Mecânico Marshall	Compactador Superpave (CGS)
Número de golpes ou de giros	75	68	75	83
Estabilidade Marshall (kgf)	525	683	535	722
RT (MPa)	0,91	1,16	0,95	1,22
MR (MPa)	4073	4496	3948	4725
MR/RT (MPa)	4475	3875	4155	3872

Fonte: Autor.

Avaliando-se os resultados obtidos das misturas asfálticas estudadas em relação à estabilidade Marshall e à resistência à tração por compressão diametral, constata-se que todas as misturas atenderam aos respectivos valores mínimos exigidos e especificados na ES 031 (DNIT, 2006a) para as duas formas de compactação.

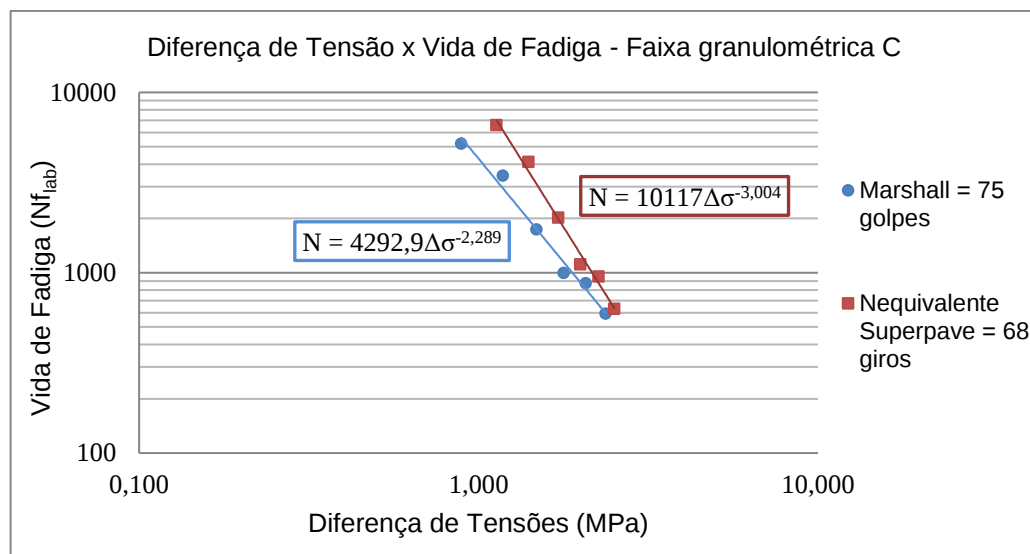
Para o ensaio de vida de fadiga, as Figuras 6.6 e 6.7 apresentam graficamente o desempenho das misturas asfálticas dosadas pelo método Marshall e compactadas no compactador Marshall e no compactador giratório Superpave, para as faixas B e C.

Figura 6.6 – Vida de Fadiga (N) versus Diferença de Tensão ($\Delta\sigma$) – Faixa granulométrica B



Fonte: Autor.

Figura 6.7 – Vida de Fadiga (N) versus Diferença de Tensão ($\Delta\sigma$) – Faixa granulométrica C



Fonte: Autor.

Outro parâmetro importante que deve ser observado na definição de uma mistura asfáltica para revestimento é a deformação permanente. Nas Tabelas 6.5 e 6.6, têm-se os resultados de ensaios de creep estático nas misturas asfálticas dosadas pelo método Marshall, compactadas pelo compactador mecânico Marshall e também pelo compactador giratório Superpave (CGS), para as duas faixas estudadas, faixa B e faixa C. Foram comparados grupos de corpos de prova dosados e

compactados pelo método Marshall com grupos de corpos de prova também dosados pelo método Marshall, porém compactados no compactador giratório Superpave.

Tabela 6.5 – Média dos resultados de creep estático das misturas dosadas pelo método Marshall e compactadas pelos métodos Marshall e Superpave – Faixa B

Resultados Médios do Ensaio de CREEP ESTÁTICO – Faixa B		
Parâmetros	Compactador Marshall	Compactador giratório Superpave
Tempo Final (s)	4500	4500
Dt – Deformação total (mm/mm)	0,0059	0,0045
Mf – Módulo de fluência (MPa)	19,88	22,29
I _{curva} – Inclinação da curva	0,012	0,009
Deslocamento máximo (mm)	0,442	0,338
Deslocamento final (mm)	0,381	0,292
Deslocamento recuperável (mm)	0,061	0,046

Fonte: Autor.

Tabela 6.6 – Média dos resultados de creep estático das misturas dosadas método Marshall e compactadas pelos métodos Marshall e Superpave – Faixa C

Resultados Médios do Ensaio de CREEP ESTÁTICO – Faixa C		
Parâmetros	Compactador Marshall	Compactador giratório Superpave
Tempo Final (s)	4500	4500
Dt – Deformação total (mm/mm)	0,0045	0,0035
Mf – Módulo de fluência (MPa)	25,34	28,33
I _{curva} – Inclinação da curva	0,025	0,022
Deslocamento máximo (mm)	0,344	0,268
Deslocamento final (mm)	0,292	0,227
Deslocamento recuperável (mm)	0,052	0,041

Fonte: Autor.

Os dados das tabelas acima apontam uma deformação específica total (Dt) menor para os corpos de prova compactados no compactador giratório Superpave para as duas faixas estudadas, faixa B e faixa C. Isso quer dizer que a suscetibilidade à deformação permanente é menor para essas misturas asfálticas, fato que é corroborado pelo módulo de fluência. Esse parâmetro (Mf) determina a capacidade de uma mistura asfáltica resistir à deformação permanente, neste caso, quanto maior o valor do módulo de fluência, menor será a deformação permanente, também aqui as duas faixas estudadas apresentaram desempenho um pouco superior para as misturas asfálticas compactadas no compactador giratório Superpave. Quanto à deformação recuperável que é a capacidade da mistura asfáltica em se recuperar das deformações sofridas, os resultados obtidos apontam que para as faixas estudadas B e C, tanto as misturas asfálticas compactadas no compactador mecânico Marshall como as misturas compactadas no compactador giratório Superpave, tiveram os

percentuais de recuperação em torno de 13 e 15%, sendo a faixa B com recuperação menor que a faixa C.

3.5 Análise estrutural

A Tabela 6.7 apresenta os resultados das tensões de tração e compressão obtidas para o pavimento adotado neste trabalho em variados pontos da estrutura. É possível observar que a camada asfáltica apresentou somente tensão de compressão, ao passo que a camada de ligação foi solicitada à tração e à compressão, o que permite analisar o comportamento da mistura asfáltica nesta camada em relação à sua vida de fadiga. As tensões horizontais de tração atingem o seu maior valor em Z igual a 9,99cm, no bordo inferior da camada de ligação. Nessa profundidade, os pontos mais solicitados correspondem as posições X igual a 0 e X igual a 34 cm, que representam os pontos de aplicação das cargas, através das rodas do eixo simples de rodas duplas (ESRD), para o pavimento.

Tabela 6.7 – Tensões atuantes na camada asfáltica e camada de ligação (Binder)

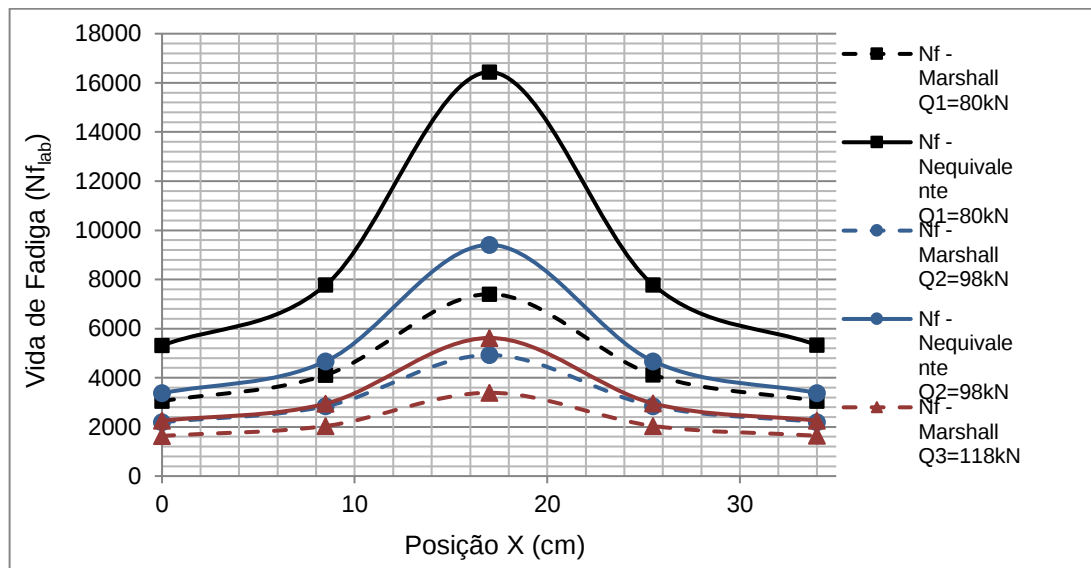
Posição (cm)			Tensão (kgf/cm²)					
Q ₁ = 8,2 t								
X	Y	Z	q ₁ = 2,05 tf					
Camada de rolamento			Marshall			Nequivalente		
			σ _h	σ _v	Δσ	σ _h	σ _v	Δσ
0,0	0,0	4,99	-1,8	-4,0	2,2	-2,0	-3,9	1,9
8,5			-1,5	-3,3	1,8	-1,7	-3,2	1,5
17,0			-1,2	-0,6	0,6	-1,3	-0,5	0,8
25,5			-1,5	-3,3	1,8	-1,7	-3,2	1,5
34,0			-1,8	-4,0	2,2	-2,0	-3,9	1,9
Camada de ligação			Marshall			Nequivalente		
			σ _h	σ _v	Δσ	σ _h	σ _v	Δσ
0,0	5,0	9,99	7,9	-1,9	9,8	9,0	-1,8	10,8
8,5			6,9	-1,6	8,5	7,8	-1,6	9,4
17,0			5,1	-1,3	6,4	6,0	-1,2	7,2
25,5			6,9	-1,6	8,5	7,8	-1,6	9,4
34,0			7,9	-1,9	9,8	9,0	-1,8	10,8
Q ₂ = 10,0 t								
X	Y	Z	q ₂ = 2,5 tf					
Camada de rolamento			Marshall			Nequivalente		
			σ _h	σ _v	Δσ	σ _h	σ _v	Δσ
0,0	0,0	4,99	-2,2	-4,6	2,4	-2,5	-4,5	2,0
8,5			-1,9	-3,9	2,0	-2,1	-3,9	1,8
17,0			-1,4	-0,7	0,7	-1,5	-0,7	0,8
25,5			-1,9	-3,9	2,0	-2,1	-3,9	1,8
34,0			-2,2	-4,6	2,4	-2,5	-4,5	2,0
Camada de ligação			Marshall			Nequivalente		
			σ _h	σ _v	Δσ	σ _h	σ _v	Δσ
0,0	5,0	9,99	9,3	-2,3	11,6	10,5	-2,1	12,6
8,5			8,2	-1,9	10,1	9,4	-1,9	11,3
17,0			6,3	-1,5	7,8	7,3	-1,5	8,8
25,5			8,2	-1,9	10,1	9,4	-1,9	11,3
34,0			9,3	-2,3	11,6	10,5	-2,1	12,6
Q ₃ = 12,0 t								
X	Y	Z	q ₃ = 3,0 tf					
Camada de rolamento			Marshall			Nequivalente		
			σ _h	σ _v	Δσ	σ _h	σ _v	Δσ
0,0	0,0	4,99	-2,6	-5,1	2,5	-2,9	-5,1	2,2
8,5			-2,3	-4,5	2,2	-2,6	-4,5	1,9
17,0			-1,7	-0,9	0,8	-1,9	-0,9	1,0
25,5			-2,3	-4,5	2,2	-2,6	-4,5	1,9
34,0			-2,6	-5,1	2,5	-2,9	-5,1	2,2
Camada de ligação			Marshall			Nequivalente		
			σ _h	σ _v	Δσ	σ _h	σ _v	Δσ
0,0	5,0	9,99	10,6	-2,6	13,2	12,1	-2,5	14,6
8,5			9,6	-2,3	11,9	11,0	-2,3	13,3
17,0			7,5	-1,8	9,3	8,7	-1,8	10,5
25,5			9,6	-2,3	11,9	11,0	-2,3	13,3
34,0			10,6	-2,6	13,2	12,1	-2,5	14,6

Fonte: Autor.

Nota: Para σ_h e σ_v (+ Tração; - Compressão).

Ao longo de diferentes posições para o eixo X, o gráfico da Figura 6.8 apresenta o comportamento da camada de ligação (binder) em relação à vida de fadiga (Nf).

Figura 6.8 – Vida de Fadiga (Nf) para diversas posições no eixo X



Fonte: Autor.

O gráfico da Figura 6.8 apresenta as variações que ocorrem para a vida de fadiga (N_f) para os diferentes carregamentos Q_1 , Q_2 e Q_3 e ainda a variação ocorrida entre os corpos de prova que foram compactados no compactador mecânico Marshall e os corpos de prova que foram compactados no compactador giratório Superpave. Observa-se que quanto menor o carregamento maior o número de solicitações registradas, ou seja, maior a vida de fadiga da mistura asfáltica. Entre as formas de compactação, pode-se constatar que os pavimentos que utilizaram as misturas compactadas no compactador giratório Superpave apresentam um melhor desempenho em relação à vida de fadiga. Como exemplo, cita-se o pavimento compactado no CGS (compactador giratório Superpave) e submetido ao carregamento Q_2 igual a 98kN, que obteve uma vida de fadiga maior que o pavimento que utilizou a compactação mecânica Marshall e carregamento Q_1 igual a 80kN.

É possível observar ainda que as vidas de fadiga para as posições X igual a 0cm e X igual a 34cm são as menores e que essas posições coincidem com o eixo de aplicação das cargas através das rodas. Para os demais pontos, pode ser verificado um número N_f maior, conduzindo a análise de vida de fadiga para esses pontos críticos. Foram calculados, então, os N_f de laboratório ($N_{f_{lab}}$), ou seja, o número de solicitações ou de ciclos de carga na ruptura obtido para uma dada diferença de tensões ($\Delta\sigma$) nos pontos de maior carregamento, utilizando-se as equações geradas

nos ensaios de fadiga executados em laboratório. A Tabela 6.8 apresenta os resultados.

Tabela 6.8 – Vida de fadiga – NfLaboratório

Camada	Método	Equação de Vida de Fadiga	Nf _{Lab}		
			8,2tf	10,0tf	12,0tf
Camada ligação (4,99 a 9,99 cm)	Marshall Convencional	$2.930,0(\Delta\sigma)^{-2,07}$	3.174	2.280	1.704
Camada ligação (4,99 a 9,99 cm)	Nequivalente	$6.524,9(\Delta\sigma)^{-2,837}$	5.616	3.563	2.379

Fonte: Autor.

Para os pontos críticos da camada de binder, verifica-se que a relação entre as vidas de fadiga das misturas compactadas no CGS e no compactador mecânico Marshall ($N_{f\text{Nequivalente}}/N_{f\text{Marshall}}$) é sempre maior que a unidade, evidenciando o melhor desempenho estrutural da camada de ligação obtida pela compactação giratória Superpave, porém com valores que gradativamente vai diminuindo à medida que a carga por eixo Q é incrementada (Tabela 6.9).

Tabela 6.9 – Relação entre as vidas de fadiga Nequivalente e Marshall nos pontos de maior carregamento

X	Y	Z	Nf _{Nequivalente} /Nf _{Marshall}	Nf _{Nequivalente} /Nf _{Marshall}	Nf _{Nequivalente} /Nf _{Marshall}
			Q ₁ =80kN	Q ₂ =98kN	Q ₃ =118kN
0	0	9,99	1,7	1,5	1,4
34			1,7	1,5	1,4

Fonte: Autor.

Para a camada de ligação (4,99 a 9,99cm), ocorreram esforços de tração na fibra inferior da camada. Através dos dados obtidos para o Nf_{Lab}, pode-se observar que as misturas asfálticas dosadas pelo método Marshall e compactadas no compactador giratório Superpave (CGS) apresentaram um desempenho superior para a vida de fadiga em relação as misturas dosadas e compactadas segundo o que prescreve o método Marshall.

Através dos dados obtidos para o N_{Lab}, podemos observar que a mistura asfáltica dosada pelo método Marshall e compactada no CGS com um número de giros equivalente (Neq), apresenta um melhor desempenho para vida de fadiga em relação a mistura dosada pelo mesmo método Marshall e compactada no compactador mecânico Marshall com 75 golpes por face, apontando que a forma de

compactação eleva a vida de serviço de um pavimento que utilize em sua técnica de dosagem a compactação por amassamento; que é uma característica do método Superpave.

Outra análise utilizando os dados obtidos no programa Elsym5 refere-se à deflexão vertical recuperável que ocorre no topo da camada asfáltica. Esse deslocamento pode ser comparado com a deflexão recuperável admissível (D_{adm}) definida segundo o procedimento PRO-011 (DNER, 1979), que leva em consideração o volume de tráfego descrito no Manual de Pavimentação (DNIT, 2006b), sendo esses volumes determinados em relação à espessura da camada de revestimento, para esse trabalho foi utilizada uma espessura de 10cm (5cm para camada de rolamento e 5cm para a camada de ligação) que corresponde a $10^7 < N < 5 \times 10^7$, que são traduzidos pelo número N de solicitações do eixo padrão, e a carga aplicada à superfície do pavimento, correspondente ao carregamento do eixo padrão ($Q_1=80\text{kN}$).

Ainda que a deflexão admissível seja calculada para o carregamento padrão, as deflexões verticais recuperáveis máximas, obtidas por meio do programa computacional Elsym5 para carregamentos superiores ($Q_2=98\text{kN}$ e $Q_3=118\text{ kN}$), também foram quantificadas para fins de comparação com esse limite de referência.

A Tabela 6.10 apresenta os valores obtidos para a deflexão no ponto crítico, para as cargas adotadas (Q_1 , Q_2 e Q_3), e a deflexão admissível para os volumes de tráfego N correspondentes.

Tabela 6.10 – Deflexões verticais recuperáveis no topo do pavimento adotado: comparativo com D_{adm} obtido para o carregamento padrão

Posição (cm)			N	D_{adm} (x0,01mm) PRO 011/79	Marshall Convencional (Deflexão x0,01mm)			Nequivalente (Deflexão x0,01mm)		
X	Y	Z			$Q_1=80\text{kN}$	$Q_2=98\text{kN}$	$Q_3=118\text{kN}$	$Q_1=80\text{kN}$	$Q_2=98\text{kN}$	$Q_3=118\text{kN}$
1	0	0	10^7	59,98	34,88	42,51	50,98	34,50	42,04	50,41
7			5×10^7	45,18						

Fonte: Autor.

Analisando-se os dados obtidos para a deflexão, nota-se que, para um N igual a 5×10^7 , apenas os carregamentos de 80kN e 98kN atenderam ao critério de deflexão admissível. Já para N igual a 10^7 , a deflexão obtida foi menor que a deflexão admissível para todos os carregamentos testados neste trabalho.

Os resultados evidenciam a necessidade de controle da carga por eixo, visando evitar a exposição de pavimentos a deflexões superiores à admissível e,

consequentemente, a uma maior suscetibilidade aos mecanismos de fadiga. Observa-se, ainda, que as deflexões para as misturas asfálticas compactadas no CGS mostraram-se menores que as deflexões apresentadas pelas misturas asfálticas compactadas no compactador mecânico Marshall, evidenciando que a forma de compactação adotada pelo método de dosagem influencia a estrutura das misturas asfálticas produzidas, tornando-as menos suscetíveis às patologias estruturais decorrentes dos mecanismos de deformação.

Para os resultados das deflexões encontradas na análise estrutural do pavimento, foram observados valores próximos para a parcela de deformação recuperável, tanto para as misturas asfálticas compactadas pelo CGS, como para as misturas asfálticas compactada pelo compactador mecânico Marshall. Esse fato ocorreu para as duas faixas aqui estudadas, ou seja, faixas granulométricas B e C do DNIT.

4 CONCLUSÕES

Os resultados estruturais encontrados para o pavimento adotado, onde se utilizou como capa asfáltica e camada de ligação misturas asfálticas dosadas pelo método Marshall, compactadas no compactador mecânico Marshall e também compactadas em energia equivalente no compactador giratório Superpave, pode-se observar que para a aplicação de uma carga igual ao eixo padrão (Q_1 igual a 80kN), o $N_{f_{Lab}}$ para as misturas compactadas no CGS foram superiores em 77% o valor encontrado para o $N_{f_{Lab}}$ das misturas compactadas no compactador mecânico Marshall.

Para (Q_2 igual a 98kN) esta diferença foi de 56% maior e para (Q_3 igual a 118kN) uma diferença também positiva da ordem de 40%, confirmando assim que apenas a modificação da forma de compactação das misturas asfálticas, foi suficiente para indicar uma maior vida de serviço e consequentemente uma maior durabilidade do revestimento quando utilizado em pistas de rolamento.

O desempenho superior para as misturas asfálticas do Nequivalente está relacionado unicamente à forma de compactação, já que as misturas asfálticas estudadas neste trabalho foram dosadas pelo método Marshall e estas mesmas misturas foram compactadas nos dois tipos de compactadores utilizados, a saber, o

compactador giratório Superpave (CGS) e o compactador mecânico Marshall. Obtiveram-se então as mesmas características volumétricas para os corpos de prova, porém, o desempenho mecânico e estrutural das misturas compactadas no CGS apontou resultados superiores.

Com um número de giros inferior a 100, que seria o número de giros indicado para misturas asfálticas dosadas pelo método Superpave para o tráfego considerado neste trabalho de pesquisa, pode-se observar através deste dado, às evidências já anotadas em trabalhos de Marques (2004), Vasconcelos e Soares (2005), Leandro et al. (2014), Zumrawi e Edrees (2016) onde o teor de ligante asfáltico para as misturas dosadas pelo método Superpave são inferiores ao teor de ligante das misturas dosadas pelo método Marshall, ou seja, a compactação por amassamento é mais eficiente, produzindo uma mistura asfáltica satisfatória com menos teor de ligante.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15184**. Materiais betuminosos - Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional. Rio de Janeiro, 2004.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 5**: Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials, West Conshohocken, PA, 2013.

_____. **ASTM D 36**. Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus), West Conshohocken, PA, 2014

_____. **ASTM D 113**. Standard Test Method for Ductility of Asphalt Materials, West Conshohocken, PA, 2017.

_____. **ASTM D 2042**. Standard Test Method for Solubility of Asphalt Materials in Trichloroethylene, West Conshohocken, PA, 2015b.

_____. **ASTM D 2872**. Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test). West Conshohocken, PA, 2012.

CARMO, C. A. T. **A avaliação do módulo de resiliência através de ensaios triaxiais dinâmicos de dois solos compactados e a sua estimativa a partir de ensaios rotineiros**. Dissertação de Mestrado. São Carlos: Escola de Engenharia, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **PRO 011** – Avaliação estrutural dos pavimentos flexíveis. Procedimento de ensaio. Rio de Janeiro, 1979.

_____ **ME 024:** Pavimento - determinação das deflexões pela viga Benkelman. Rio de Janeiro, 1994a.

_____ **ME 078:** Agregado graúdo: adesividade a ligante betuminoso. Rio de Janeiro, 1994b.

_____ **ME 086:** Agregado: determinação do índice de forma. Rio de Janeiro, 1994c.

_____ **ME 148:** Material betuminoso - determinação dos pontos de fulgor e de combustão (vaso aberto cleveland) (ABNT - NBR 11341). Rio de Janeiro, 1994d.

_____ **ME 043:** Misturas betuminosas a quente – Ensaio Marshall para misturas betuminosas. Rio de Janeiro, 1995.

_____ **ME 193:** Produtos betuminosos líquidos e semi-sólidos – determinação da densidade 20 °C / 4 °C. Rio de Janeiro, 1996.

_____ **ME 266:** Agregados – determinação do teor de materiais pulverulentos. Rio de Janeiro, 1997.

_____ **ME 035:** Agregados: determinação da abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro, 1998a.

_____ **ME 081:** Agregados: determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo. Rio de Janeiro, 1998b.

_____ **ME 083:** Agregados: análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1998c.

_____ **ME 194:** Agregados - determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco chapman. Rio de Janeiro, 1998d.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **ES 031:** Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2006a.

_____ **Manual de Pavimentação.** 3ª Edição. Rio de Janeiro, 2006b.

_____ **ME 131:** Materiais asfálticos - determinação do ponto de amolecimento - método do anel e bola. Rio de Janeiro, 2010a.

_____ **ME 135:** Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010b.

_____ **ME 136:** Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010c.

_____ **ME 155:** Material asfáltico – Determinação da penetração – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010d.

_____**ME 183:** Pavimentação asfáltica – Ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2018.

GOUVEIA, L. T.; FERNANDES JÚNIOR, J. L.; SOARES, J. B. Influência da energia de compactação no comportamento volumétrico e mecânico de misturas asfálticas. **Revista Transportes**, volume XV, número 1. p. 34-41. Rio de Janeiro, 2007.

KARACASU, M.; AKALIN, K. B.; KARA Ç. Investigation of the effects of compaction methods on performance properties of asphalt concrete. In: **International Conference on Civil and Environmental Engineering** – Digital proceeding ICOCEE – Cappadocia, 2017. p. 1-10.

LEANDRO, R. P.; BERNUCCI, L. L. B.; BEJA, I. A.; CHAVES, J. M. Efeito do tipo de compactação no volume de vazios de uma mistura asfáltica densa. In: **43ª RAPv – Reunião Anual de Pavimentação e 17º ENACOR – Encontro Nacional de Conservação Rodoviária**. Maceió, 2014.

LITTLE, D. N.; BUTTON, J. W.; YOUSSEF, H. Development of criteria to evaluate uniaxial creep data and asphalt concret permanent deformation potential. p. 49-57. **Transportation Research Record 1417**, 1993.

MARQUES, G. L. O. **Utilização do Módulo de Resiliência como Critério de Dosagem de Mistura Asfáltica**: Efeito da Compactação por Impacto e Giratória. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2004.

MAMPEARACHCHI, W. K.; FERNANDO, P. R. D. Evaluation of the effect of Superpave aggregate gradations on Marshall mix desing parameters of wearing course. **Journal of the National Science Foundation of Sri Lanka**, 2012. 40(3). p. 183-194.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. **Mecânica dos pavimentos**. 3. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2015.

MOTTA, L. M. G., TONIAL, I., LEITE, L. F. M.; CONSTANTINO, R., **Princípios do Projeto e Análise SUPERPAVE de Misturas Asfálticas**. Tradução Comentada. Instituto Brasileiro do Petróleo – IBP, 1996.

NASCIMENTO, L. A. **Nova abordagem da dosagem de misturas asfálticas densas com uso do compactador giratório e foco na deformação permanente**. Dissertação de Mestrado. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2008. 227p.

NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM (NCHRP). **Simple performance test for Superpave mix design**. Relatório 465. Estados Unidos: 2002.

OLIVEIRA FILHO, C. M. S. **Estudo de Diferentes Granulometria no Comportamento Mecânico das Misturas Asfálticas Densas e Descontínuas Tipo Stone Matrix Asphalt SMA**. Dissertação de Mestrado. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 2007. 122p.

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. v. 22, n. 2, p. 85-94. **Revista Transportes**, Rio de Janeiro, 2014.

VASCONCELOS, K. L.; SOARES, J. B. Efeito do procedimento de dosagem no teor de projeto e comportamento de misturas asfálticas. In: **Anais do XVIII Congresso Brasileiro de Pesquisa e Ensino em Transportes**. Recife, 2005. v. II. p. 1264-1273.

ZUMRAWI, M. M. E.; EDREES, S. A. S. Comparison of marshall and superpave asphalt design methods for Sudan pavement mixes. v. 2, Issue 1, p. 29-35. **International Journal of Scientific and Technical Advancements**: 2016.

Capítulo 7

1 CONCLUSÕES FINAIS

A partir das análises e resultados obtidos nos capítulos IV, V e VI, listam-se a seguir as principais conclusões e considerações resultantes deste trabalho.

1.1 Métodos de dosagem Marshall e Superpave

Os métodos de dosagem utilizados nesta pesquisa foram os métodos Marshall e Superpave, utilizados para definir as misturas asfálticas para as faixas B e C do DNIT. Constatou-se que as misturas asfálticas a quente, produzidas através da mistura de agregados minerais e ligante asfáltico, para ambas as faixas, dosadas e compactadas seguindo o que preconiza o método Superpave, obtiveram melhor desempenho nos ensaios mecânicos realizados e na simulação estrutural utilizando o programa Elsym5. É importante ressaltar que, na simulação, essas misturas asfálticas foram utilizadas em um pavimento composto por: (i) camada asfáltica, (ii) camada de ligação (binder), (iii) base, (iv) reforço de subleito e (v) subleito. Isso aponta que misturas asfálticas dosadas pelo método Superpave são mais eficientes que aquelas dosadas pelo método Marshall.

Quanto ao efeito do método de dosagem em relação ao teor de projeto de ligante asfáltico, foi observado um comportamento distinto para as faixas estudadas. Para a faixa B o volume de ligante asfáltico foi maior para a mistura dosada pelo método Superpave, o que ocorreu devido ao critério de determinação do volume de vazios neste método, que fixa um valor exato de 4% para este parâmetro, independente da faixa granulométrica. Já o método Marshall define uma faixa que varia de 4 a 6% para o volume de vazios na faixa B. Dessa forma, após os primeiros ensaios, obtivemos um Vv igual a 4,4%, para a dosagem pelo método Marshall, e um Vv igual 4,1%, pelo método Superpave, verificando-se, portanto, um consumo maior de ligante asfáltico para um volume de vazios menor.

Para a faixa C, obteve-se um teor de ligante asfáltico maior para a dosagem pelo método Marshall que pelo Superpave. De acordo com a norma, o volume de vazios para o método Marshall pode variar entre 3 e 5% e após os primeiros ensaios,

verificou-se que os corpos de prova dosados pelo método Marshall apresentaram um Vv igual a 3,7%, enquanto que os dosados pelo método Superpave demonstraram um Vv igual a 4,2%.

Outro ponto que colaborou para o melhor desempenho das misturas asfálticas foi a forma de compactação das misturas asfálticas, que no método Superpave é feita por amassamento, e no método Marshall, por impacto. A densificação promovida pela forma de compactação do método Superpave mostrou-se mais eficiente, produzindo misturas asfálticas mais resistentes, com formação de esqueleto pétreo mais rígido.

1.2 Envelhecimento de curto prazo

Outro ponto estudado foi a incorporação do envelhecimento de curto prazo no método de dosagem Marshall. Esse envelhecimento simula o tempo que a mistura leva para ser compactada em pista, ou seja, o intervalo entre a mistura dos agregados minerais e do ligante asfáltico e a compactação. Para o ensaio de envelhecimento, a mistura é acondicionada em estufa por um período de 2 horas, simulando o tempo decorrido para transporte, espalhamento e compactação da mistura asfáltica na pista de rolamento.

Após os ensaios mecânicos e a simulação estrutural do pavimento, os resultados das misturas que passaram pelo teste de envelhecimento demonstraram resultados superiores àqueles das misturas dosadas pelo método Marshall convencional. Esse fato indica que, para uma representação em laboratório, seria interessante adotar o envelhecimento de curto prazo para as misturas asfálticas que utilizam o método Marshall para sua dosagem, pois assim podemos obter misturas com desempenho superior, podendo-se ajustar o consumo de ligante asfáltico ou até diminuir a espessura da camada de revestimento, mantendo-se as mesmas características de flexibilidade e resistência. É importante ressaltar que o método de dosagem Superpave já prevê o envelhecimento de curto prazo em sua metodologia.

1.3 Energia de compactação equivalente

Foi observado neste trabalho que a energia de compactação necessária no compactador giratório Superpave (CGS), para que se obtenham as mesmas

características volumétricas de misturas asfálticas dosadas pelo método Marshall, foi inferior aos 100 giros recomendados para o $N_{projeto}$ no método Superpave. Durante os ensaios, o número de giros para a faixa B foi igual a 83, ficando 20% abaixo do que recomenda o método Superpave, e para a faixa C foi igual a 68 giros, ficando 47% abaixo do recomendado.

Isso aponta que a forma de compactação por amassamento, que é própria do método Superpave, conduz a resultados superiores aos das misturas asfálticas dosadas e compactadas pelo que preconiza o método Marshall. As misturas asfálticas que foram dosadas pelo método Marshall e compactadas no CGS obtiveram resultados superiores nos ensaios de resistência à tração por compressão diametral, de módulo de resiliência, de fadiga e de fluência por compressão uniaxial estática (creep estático). Todos os indicadores apontam que apenas por alterar a forma de compactação das misturas asfálticas é possível melhorar o desempenho delas.

1.4 Sugestões para trabalhos futuros

Algumas questões que nortearam este trabalho foram respondidas. Contudo, muitas outras surgiram. Como sugestão e recomendação para trabalhos futuros, indica-se a realização de estudos em pistas experimentais, utilizando misturas asfálticas com dosagem e compactação diferentes, preparadas em laboratório. Desse modo, pode-se avaliar, por exemplo, o nível de densificação e o desempenho das misturas asfálticas utilizadas, ao longo do tempo de operação da rodovia.

Ainda se pode analisar outros aspectos de forma mais específica: (i) ampliação dos estudos efetuados nesse trabalho, alterando as distribuições granulométricas, (ii) análise de estrutura interna das amostras compactadas no compactador mecânico Marshall e no compactador giratório Superpave, (iii) simulação de desempenho estrutural de pavimento utilizando outros programas, para comparação com os resultados obtidos com o programa Elsym5, (iv) Variação das camadas de base, reforço de subleito e subleito, analisando as possíveis implicações no modelo estrutural do pavimento.