

JULIANA DE PAULA REZENDE

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS
ASFÁLTICAS A QUENTE COMPOSTAS REFORÇADAS COM
GEOTÊXTIL**

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

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2019

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

T

R467a
2019
Rezende, Juliana de Paula, 1991-
Análise do comportamento mecânico de misturas asfálticas
a quente compostas reforçadas com geotêxtil / Juliana de Paula
Rezende. – Viçosa, MG, 2019.
xiv, 81f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Heraldo Nunes Pitanga.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.
Inclui bibliografia.

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

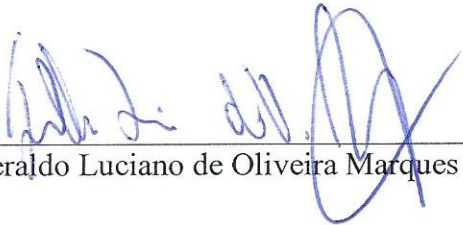
CDD 22 ed. 624.1

JULIANA DE PAULA REZENDE

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS
ASFÁLTICAS A QUENTE COMPOSTAS REFORÇADAS COM GEOTÊXTIL**

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

APROVADA: 28 de fevereiro de 2019



Geraldo Luciano de Oliveira Marques



Taciano Oliveira da Silva
(Coorientador)



Heraldo Nunes Pitanga
(Orientador)

AGRADECIMENTOS

A Deus, por estar comigo sempre, ser meu melhor amigo, por guiar meus passos e me dar forças para superar as dificuldades.

Aos meus pais Luiz Carlos e Adair, pelo amor, apoio, confiança, por serem meus exemplos de determinação e pela motivação incondicional. Às minhas queridas irmãs Jaqueline e Cristiane, pelo amor, carinho e apoio de sempre. Ao Maicon, pelo amor, apoio, compreensão e amizade. Vocês serão sempre as razões de todos os meus esforços e motivos das minhas vitórias. A vocês, dedico esse trabalho!

Ao meu orientador Heraldo, pela exemplar orientação, ensinamentos, dedicação e valiosa contribuição para a execução deste trabalho.

Aos professores Taciano e Dario, pela disponibilidade e apoio à pesquisa.

Aos meus amigos Gêssica e Mário, pela amizade, companheirismo e apoio ao longo dessa pesquisa.

Ao Giovani, pela disponibilidade e boa vontade na execução dos ensaios de laboratório. À Natália, pelo apoio no desenvolvimento desse trabalho. Ao Cássio, por auxiliar na aquisição de alguns materiais desse trabalho.

Ao Professor Geraldo Luciano de Oliveira Marques, pelo fundamental auxílio e disponibilidade demonstrados na realização dos ensaios no Laboratório de Pavimentação da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF).

À Universidade Federal de Viçosa, por permitir a realização deste trabalho e a obtenção do título.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e à FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais), pelo incentivo à pesquisa, pelas oportunidades concedidas e pela bolsa.

Às empresas Stratura Asfaltos S. A., pelo fornecimento dos ligantes asfálticos, Ober, pelo fornecimento do geotêxtil, e Pedreira Ervália, pelo fornecimento dos agregados empregados nesta pesquisa.

A todos os amigos que contribuíram de alguma forma para essa conquista, muito obrigada!

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE TABELAS	ix
RESUMO	xi
ABSTRACT	xiii
CAPÍTULO 1.....	1
1. INTRODUÇÃO GERAL.....	1
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	4
CAPÍTULO 2.....	5
ANÁLISE COMPARATIVA DOS EFEITOS DA IMPREGNAÇÃO DO GEOTÊXTIL NA RESPOSTA MECÂNICA DE MISTURAS ASFÁLTICAS A QUENTE COMPOSTAS	5
RESUMO	5
ABSTRACT	5
2.1. INTRODUÇÃO.....	6
2.2. MATERIAIS E MÉTODOS.....	8
2.2.1 Materiais	8
2.2.2 Métodos	9
2.3. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	12
2.3.1 Caracterização dos materiais	12
2.3.2 Granulometrias de projeto	14
2.3.3 Dosagem das misturas asfálticas de projeto	15
2.3.4 Ensaio mecânicos	19
2.4. CONCLUSÃO.....	22
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	23
CAPÍTULO 3.....	28

INFLUÊNCIA DA INSERÇÃO DE GEOTÊXTIL NA RESPOSTA MECÂNICA DE MISTURAS ASFÁLTICAS A QUENTE COMPOSTAS	28
RESUMO	28
ABSTRACT	29
3.1. INTRODUÇÃO.....	29
3.2. MATERIAIS E MÉTODOS.....	32
3.2.1. Materiais	32
3.2.2. Métodos	32
3.3. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	35
3.3.1. Caracterização dos materiais	35
3.3.2. Granulometrias de projeto	36
3.3.3. Dosagem das misturas asfálticas de projeto	37
3.3.4. Ensaios mecânicos	37
3.4. CONCLUSÃO.....	42
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	42
CAPÍTULO 4.....	47
ANÁLISE ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS REFORÇADOS COM GEOTÊXTIL	47
RESUMO	47
ABSTRACT	48
4.1. INTRODUÇÃO.....	49
4.2. MATERIAIS E MÉTODOS	52
4.2.1. Materiais utilizados.....	52
4.2.2. Métodos	52
4.3. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	57
4.3.1. Considerações iniciais.....	57
4.3.2. Caracterização dos materiais	57

4.3.3. Granulometrias de projeto	58
4.3.4. Dosagem das misturas asfálticas de projeto	59
4.3.5. Ensaios mecânicos	60
4.3.6. Análise estrutural do pavimento adotado.....	63
4.4. CONCLUSÃO.....	73
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74
CAPÍTULO 5.....	80
CONCLUSÃO GERAL	80

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: A) Mistura Faixa B; B) Mistura Faixa C; C) Mistura Faixa B + Geotêxtil com impregnação, D) Mistura Faixa B + Geotêxtil com impregnação + Mistura Faixa C	11
Figura 2.2: Esquema de corpos de prova moldados simultaneamente com as misturas asfálticas de projeto das duas faixas granulométricas (B e C) e com a inserção do reforço geossintético (geotêxtil).....	12
Figura 2.3: Curvas granulométricas dos agregados minerais empregados na pesquisa..	12
Figura 2.4: Granulometria de projeto correspondente à faixa B da ES 031.	14
Figura 2.5: Granulometria de projeto correspondente à faixa C da ES 031.	14
Figura 2.6: Resultados dos parâmetros de dosagem Marshall para a determinação do teor de ligante para a mistura asfáltica de projeto da faixa B.	15
Figura 2.7: Gráfico Teor de CAP versus Vv e RBV, para determinação do teor de ligante para a mistura asfáltica de projeto da faixa B.	16
Figura 2.8: Resultados dos parâmetros de dosagem Marshall para a determinação do teor de ligante da mistura asfáltica de projeto da faixa C.	17
Figura 2.9: Gráfico Teor de CAP versus Vv e RBV para determinação do teor de ligante para a mistura asfáltica de projeto da faixa C.	18
Figura 2.10: Gráfico comparativo dos resultados dos ensaios mecânicos de Resistência à Tração por Compressão Diametral e Estabilidade <i>Marshall</i> para os 4 cenários adotados nesse estudo.	21
Figura 3.1: A) Mistura Faixa B; B) Mistura Faixa C; C) Mistura Faixa B + Geotêxtil com impregnação, D) Mistura Faixa B + Geotêxtil com impregnação + Mistura Faixa C	34
Figura 3.2: Esquema de corpo de prova moldado simultaneamente com as misturas asfálticas de projeto das duas faixas granulométricas (B e C) e com a inserção do reforço geossintético (geotêxtil).....	35
Figura 3.3: Granulometria de projeto correspondente à faixa B da ES 031.	36
Figura 3.4: Granulometria de projeto correspondente à faixa C da ES 031.	37

Figura 3.5: Valores médios das propriedades mecânicas estáticas (Resistência à Tração e Estabilidade <i>Marshall</i>) e dinâmica (Módulo de Resiliência) das misturas asfálticas pesquisadas.....	38
Figura 3.6: Curvas de Fadiga das misturas asfálticas pesquisadas: a) Vida de Fadiga (Nf) versus Diferença de tensões; b) Vida de Fadiga (Nf) versus Deformação específica resiliente na ruptura.....	39
Figura 3.7: Curvas de fluência (<i>Creep</i> estático) das misturas asfálticas pesquisadas: a) Deformação Plástica versus Tempo; b) Deformação Plástica Específica versus Tempo.	41
Figura 3.8: Ilustração da exumação de um corpo de prova composto contendo o geotêxtil como elemento de reforço.....	41
Figura 4.1: A) Mistura Faixa B; B) Mistura Faixa C; C) Mistura Faixa B + Geotêxtil com impregnação, D) Mistura Faixa B + Geotêxtil com impregnação + Mistura Faixa C	54
Figura 4.2: Esquema de corpo de prova moldado simultaneamente com as misturas asfálticas de projeto das duas faixas granulométricas (B e C) e com a inserção do reforço geossintético (geotêxtil).....	55
Figura 4.3: Esquema da seção transversal do pavimento-tipo adotado nas análises estruturais.	56
Figura 4.4: Granulometria de projeto correspondente à faixa B da ES 031.	59
Figura 4.5: Granulometria de projeto correspondente à faixa C da ES 031.	59
Figura 4.6: Valores médios de Resistência à Tração por Compressão Diametral (RT) para corpos de prova da mistura asfáltica de projeto com e sem reforço geossintético..	60
Figura 4.7: Valores médios de Módulo de Resiliência (MR) para corpos de prova da mistura asfáltica de projeto com e sem reforço.....	61
Figura 4.8: Curvas de Fadiga das misturas asfálticas pesquisadas: a) Vida de Fadiga (Nf) versus Diferença de tensões; b) Vida de Fadiga (Nf) versus Deformação específica resiliente na ruptura.....	62
Figura 4.9: Tensões horizontais (σ_h) na estrutura do pavimento adotado para o revestimento asfáltico reforçado com geotêxtil: $Q_1=80$ kN e $P_1=563$ kPa.	64

Figura 4.10: Tensão horizontais (σ_h) na estrutura do pavimento analisado para o revestimento asfáltico sem inserção do elemento de reforço: $Q_1=80$ kN e $P_1=563$ kPa.....	65
Figura 4.11: Tensão verticais (σ_v) na estrutura do pavimento analisado para o revestimento asfáltico com inserção do elemento de reforço: $Q_1=80$ kN e $P_1=563$ kPa.....	68
Figura 4.12: Tensão verticais (σ_v) na estrutura do pavimento analisado para o revestimento asfáltico sem inserção do elemento de reforço: $Q_1=80$ kN e $P_1=563$ kPa.....	69
Figura 4.13: Deflexões verticais recuperáveis na estrutura do pavimento-tipo analisado para $Q_1=80$ kN e $P_1=563$ kPa: (a) revestimento asfáltico reforçado com geotêxtil e (b) revestimento asfáltico não reforçado.	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Ensaio realizados no programa experimental de pesquisa	9
Tabela 2.2: Resultados dos ensaios de caracterização dos agregados minerais empregados na pesquisa.....	13
Tabela 2.3: Resultados dos ensaios de caracterização do ligante asfáltico empregado na pesquisa	13
Tabela 2.4: Principais características técnicas do geossintético empregado na pesquisa.....	13
Tabela 2.5:Parâmetros de dosagem <i>Marshall</i> para o teor de ligante asfáltico de projeto de 4,2%: faixa B.....	16
Tabela 2.6: Parâmetros de dosagem <i>Marshall</i> para o teor de ligante asfáltico de projeto de 4,7%: faixa C.....	18
Tabela 2.7: Resultados dos ensaios de Resistência à Tração por Compressão Diametral (RT) para corpos de prova representativos dos 4 cenários de pintura de ligação analisados.....	19
Tabela 2.8: Resultados dos ensaios de Estabilidade <i>Marshall</i> para corpos de prova representativos dos 4 cenários de pintura de ligação analisados.....	20
Tabela 3.1: Ensaio de caracterização realizados no programa experimental de pesquisa.....	32
Tabela 3.2: Resultados dos ensaios de caracterização dos agregados minerais.....	35
Tabela 3.3: Resultados dos ensaios de caracterização do ligante asfáltico empregado ..	36
Tabela 3.4: Principais características técnicas do geossintético empregado na pesquisa.....	36
Tabela 4.1: Ensaio de caracterização realizados no programa experimental de pesquisa.....	52
Tabela 4.2:Resultados dos ensaios de caracterização dos agregados minerais.....	57
Tabela 4.3: Resultados dos ensaios de caracterização do ligante asfáltico empregado ..	58
Tabela 4.4: Principais características técnicas do geossintético empregado na pesquisa.....	58
Tabela 4.5: Equações de regressão derivadas das curvas de vida de fadiga das misturas asfálticas compostas reforçadas e não reforçadas com geotêxtil.....	63

Tabela 4.6: Tensões horizontais de tração (σ_{ht}) atuantes no bordo inferior da camada de revestimento asfáltico reforçado e coeficiente de segurança (FS), em função dos níveis de carregamento e de pressão dos pneus adotados.	64
Tabela 4.7: Tensões horizontais de tração (σ_{ht}) atuantes no bordo inferior da camada de revestimento asfáltico não reforçado e coeficientes de segurança (FS), em função dos níveis de carregamento e de pressão dos pneus adotados.	66
Tabela 4.8: Vida de fadiga do revestimento asfálticos reforçado pesquisado (Nf_{labRef}) para o bordo inferior do revestimento em função dos níveis de carregamento e de pressão dos pneus adotados.....	68
Tabela 4.9: Vida de fadiga do revestimento asfáltico não reforçado pesquisado ($Nf_{labNãoRef}$) para o bordo inferior do revestimento em função dos níveis de carregamento e de pressão dos pneus adotados.	70
Tabela 4.10: Relação de fadigas entre os Nf_{lab} dos revestimentos reforçado e não reforçado em função dos níveis de carregamento e de pressão dos pneus adotados.	70
Tabela 4.11: Deflexões verticais recuperáveis na estrutura do pavimento-tipo analisado para os revestimentos asfálticos reforçado e não reforçado em função dos níveis de carregamento e de pressão dos pneus adotados.....	73

RESUMO

REZENDE, Juliana de Paula, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2019. **Análise do comportamento mecânico de misturas asfálticas a quente compostas reforçadas com geotêxtil.** Orientador: Heraldo Nunes Pitanga. Coorientadores: Dario Cardoso de Lima e Taciano Oliveira da Silva.

O Brasil possui um sistema rodoviário de transporte envelhecido, cuja crescente demanda de tráfego pesado tem conduzido à acelerada degradação dos pavimentos, os quais, na maioria dos casos, possuem camadas asfálticas compostas por misturas asfálticas convencionais. Diante disso, o objetivo desse estudo foi investigar misturas asfálticas com desempenho estrutural capaz de retardar o aparecimento das principais patologias verificadas nos revestimentos asfálticos brasileiros, visando maior durabilidade dos pavimentos. Primeiramente, o efeito da impregnação do geotêxtil foi avaliado no comportamento mecânico de misturas asfálticas a quente compostas reforçadas por esse geossintético. Estas misturas asfálticas foram dosadas pelo método *Marshall*, empregando-se o ligante asfáltico CAP 50/70 para a mistura asfáltica e a impregnação. As faixas granulométricas “B” e “C” da especificação ES 031 do DNIT foram destinadas a compor a camada de revestimento asfáltico, simultaneamente (capa asfáltica e *binder*, respectivamente). Assim sendo, os parâmetros mecânicos derivados dos ensaios de Resistência à Tração por Compressão Diametral e Estabilidade *Marshall* foram analisados a fim de definir a condição de impregnação mais adequada para a mistura asfáltica composta reforçada. A configuração de impregnação em que o geotêxtil recebeu a pintura de ligação somente na face superior apresentou desempenho estrutural satisfatório, provavelmente devido à aderência mobilizada na interface reforço-camada superior do revestimento composto. A partir dessa configuração de impregnação, o desempenho estrutural da camada de revestimento asfáltico foi quantificado por meio de análises complementares do comportamento mecânico de misturas asfálticas a quente compostas reforçadas com geotêxtil impregnado. Os parâmetros mecânicos empregados para a referida análise foram derivados dos ensaios de Estabilidade *Marshall*, Resistência à Tração por Compressão Diametral (RT), Módulo de Resiliência (MR), Vida de Fadiga (VF) e *Creep* Estático. Constatou-se, experimentalmente, a capacidade do reforço geossintético de incrementar as propriedades mecânicas pesquisadas. Para as propriedades decorrentes de

solicitações estáticas, os resultados indicaram ganhos percentuais médios de 48% e 22% para a Estabilidade *Marshall* e a RT, respectivamente. A suscetibilidade à deformação permanente da mistura asfáltica compactada foi reduzida com a inserção do reforço. Para as propriedades dinâmicas, o MR foi incrementado de 56%, assim como a VF das misturas reforçadas. Por fim, a sensibilidade estrutural das misturas asfálticas reforçadas e não reforçadas com geotêxtil, considerando-se as propriedades mecânicas previamente determinadas, foi avaliada por meio de análises empírico-mecanísticas. Essas análises permitiram estimar o eventual efeito das propriedades mecânicas no desempenho estrutural do pavimento empregado. Para essa análise estrutural proposta, utilizou-se o software *me-PADS* (*Mechanistic-Empirical Pavement Analysis and Design Software*), adotando-se um modelo estrutural com quatro camadas: revestimento, base, reforço do subleito e subleito. Cada combinação estrutural foi solicitada por um eixo simples de rodas duplas (ESRD), variando-se o carregamento por eixo (80 kN, 98 kN e 118 kN) e também os níveis de pressão de enchimento dos pneus (563 kPa, 633 kPa e 703 kPa). Realizada a análise estrutural de todos os dados de interesse no software *me-PADS*, verificou-se que a inserção do elemento de reforço no revestimento asfáltico, ao proporcionar acréscimos de rigidez à camada asfáltica, trouxe, como consequência, menores magnitudes de deflexões verticais recuperáveis na superfície da camada, maior capacidade de suporte a cargas repetidas (maior Vida de Fadiga), porém propiciou altas tensões horizontais de tração concentradas em suas fibras inferiores. Os resultados evidenciam o potencial técnico da mistura asfáltica reforçada em suprir as necessidades estruturais da camada de revestimento asfáltico diante das solicitações impostas pelo tráfego e em prolongar o período de vida útil do pavimento asfáltico.

ABSTRACT

REZENDE, Juliana de Paula, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2019. **Analysis of the mechanical behavior of reinforced composite hot asphalt mixtures with geotextile.** Adviser: Heraldo Nunes Pitanga. Co-advisers: Dario Cardoso de Lima and Taciano Oliveira da Silva.

Brazil has an aging transport highway system whose increasing demand for heavy traffic has led to accelerated degradation of pavements, which in most cases have asphalt layers composed of conventional asphalt mixtures. Therefore, the aim of this study was to investigate asphalt mixtures with structural performance capable of delaying the appearance of the main pathologies verified in Brazilian asphalt wearing course, aiming at greater pavement durability. Firstly, the effect of impregnation of the geotextile was evaluated in the mechanical behavior of composite hot asphalt mixtures reinforced by this geosynthetic. These mixtures were dosed by the Marshall method, using the CAP 50/70 asphalt binder for the asphalt mixture and the impregnation. The grading envelopes "B" and "C" of the ES 031 specification of the DNIT were designed to compose the asphalt wearing course layer, simultaneously (asphalt layer and binder course, respectively). Thus, the mechanical parameters derived from the Tensile Strength by Diametral Compression and Marshall Stability tests were analyzed in order to define the most favorable impregnation condition for the reinforced composite asphalt mixture. The configuration of impregnation in which the geotextile received the tack coat only on the upper face presented satisfactory structural performance, this was probably due to the adhesion mobilized at the reinforcement/top layer interface of the composite wearing course. From this configuration of impregnation, the structural performance of the asphalt wearing course layer was quantified through of complementary analysis of the mechanical behavior of reinforced composite hot asphalt mixtures with impregnated geotextile. The mechanical parameters used for this analysis were derived from the tests of Marshall Stability (MS), Tensile Strength by Diametral Compression (TS), Resilience Modulus (RM), Fatigue Life (FL) and Static Creep. The capacity of the geosynthetic reinforcement to increase the mechanical properties investigated was experimentally verified. For properties resulting from static solicitations, the results indicated the average percentage gains of 48% and 22% for MS and TS, respectively. The susceptibility to permanent deformation of the compacted asphalt mixture was

reduced with the insertion of the reinforcement. For the dynamic properties, the RM increased by 56%, as well as the FL of the reinforced mixtures. Finally, the structural sensitivity of reinforced and non-reinforced asphalt mixtures with geotextile was evaluated by means of empirical-mechanistic analysis considering the previously determined mechanical properties. These analysis allowed to estimate the possible effect of the mechanical properties on the structural performance of the pavement used. For this structural analysis, the me-PADS software (Mechanistic-Empirical Pavement Analysis and Design Software) was used, in which a structural model with four layers was used: wearing course, base, subgrade reinforcement, and subgrade. Each structural combination was requested by a dual wheel single-axle (DWSA), varying the loading (80 kN, 98 kN, and 118 kN) and also the filling pressure levels of the tires (563 kPa, 633 kPa, and 703 kPa). After the structural analysis of all the data of interest in the me-PADS software, it was verified that the insertion of the reinforcement element in the asphalt wearing course provided greater stiffness in the asphalt layer, resulting in lower deflections in the layer, greater capacity to support repeated load (greater Fatigue Life), but caused high horizontal stresses concentrated on its lower fibers. The results demonstrate the technical potential of the reinforced asphalt mixtures in meeting the structural requirements of the asphalt wearing course layer of the demands imposed by the traffic and increasing the useful life of the asphalt pavement.

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO GERAL

A malha rodoviária brasileira possui, atualmente, 1.735.621 km de extensão, dos quais apenas 212.886 km são pavimentados, o que corresponde a apenas 12,3% da referida malha. Desta extensão pavimentada, 30,5% (64.825 km) correspondem a rodovias federais, e 69,5% (148.061 km) a rodovias estaduais e municipais (CNT, 2017).

Tendo em vista que 78,7% (1.365.426 km) das rodovias brasileiras não são pavimentadas e que mais 9% (157.309 km) estão planejadas para serem implantadas, constata-se que há um inequívoco *déficit* por tais obras civis. Conseqüentemente, existe um grande apelo pelo avanço tecnológico da engenharia de pavimentos para a aplicação de materiais e misturas asfálticas mais eficazes que os convencionais, visando à garantia de melhor desempenho estrutural e maior durabilidade dos pavimentos projetados e executados para o atendimento da demanda existente e a redução desse *déficit* (CNT, 2017).

Adicionalmente a essa demanda pelo incremento da malha viária nacional pavimentada, verifica-se que a já existente superestrutura viária do transporte rodoviário nacional encontra-se envelhecida, e seu estado é extremamente precário em muitas regiões do país (CNT, 2017), apontando para a necessidade de restauração da mesma.

A maioria das rodovias pavimentadas no Brasil é constituída de pavimentos com revestimentos asfálticos. Os esforços provocados pelas cargas atuantes nestes pavimentos induzem o desenvolvimento de deformações elásticas ou resilientes e de deformações irreversíveis ou permanentes. As deformações elásticas repetidas geradas pelo tráfego são responsáveis pela ruptura por fadiga da mistura asfáltica, que provoca o surgimento e a evolução das trincas observadas nos revestimentos. As deformações permanentes acumuladas são responsáveis pelo afundamento de trilhas de rodas que se manifesta na superfície de rolamento (MEDINA e MOTTA, 2015).

Segundo Bernucci et al. (2008), os revestimentos asfálticos são misturas asfálticas que combinam materiais minerais e ligantes asfálticos, em proporções adequadas definidas em laboratório. As misturas asfálticas do tipo Concreto

Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ) podem ser empregadas em revestimentos de pavimentos flexíveis, semi-rígidos e invertidos, recebendo diretamente as ações do tráfego e do clima. O CBUQ é um material para a construção de revestimentos de pavimentos, podendo constituir a camada de rolamento ou capa asfáltica e a camada de ligação ou *binder* imediatamente subjacente à capa asfáltica. Esse material é obtido a partir da mistura e homogeneização de agregados minerais, em geral bem graduados, de material fino de enchimento ou fíler e de cimento asfáltico de petróleo (CAP). Esta mistura é elaborada a quente, em usina misturadora, contínua ou descontínua, de grande, médio ou pequeno porte.

Para que confirmem à camada de revestimento asfáltico um desempenho estrutural aceitável, as misturas asfálticas devem ser submetidas a rigorosos controles nas operações de dosagem, usinagem e execução na pista. Essas devem satisfazer a critérios relacionados à resistência mecânica, à flexibilidade e à durabilidade para resistirem às solicitações sob condições de serviço, durante o período de vida útil para o qual a estrutura será projetada (PINTO e PREUSSLER, 2002).

Ao considerar as condições das rodovias brasileiras, vê-se a necessidade do estudo de revestimentos asfálticos e do desenvolvimento de novas soluções técnicas para contribuir com a melhoria de desempenho das misturas asfálticas quando submetidas às novas condições de solicitação do tráfego. Para sanar essa necessidade, estudos envolvendo inserção de reforços geossintéticos no pavimento vêm sendo realizados, e pode-se verificar a contribuição desses tipos de soluções dada a sua capacidade de proporcionar uma elevada resistência à tração dentro do revestimento asfáltico.

Esses elementos de reforço complementam as propriedades mecânicas da mistura asfáltica e permitem um maior controle do trincamento no pavimento, o que é fundamental para os bons desempenhos funcional e estrutural do mesmo (BASTOS et al., 2015; CORREIA e ZORNBERG, 2015; FONSECA et al., 2016; CARMO e MONTESTRUQUE, 2015; CARMO et al., 2015).

Sabendo-se que a escassez de recursos financeiros é um dos fatores preponderantes no planejamento dos investimentos públicos no Brasil, os grandes volumes de recursos exigidos na área de infraestrutura de transportes necessitam de técnicas inovadoras de construção. Essas devem ser incorporadas à prática de

engenharia rodoviária de maneira a reduzir custos e aumentar a durabilidade de nossas rodovias, garantindo o retorno do capital investido.

Nesse contexto, ressalta-se a necessidade de ampliação dos horizontes técnico- científicos relacionados à concepção, preparação e execução de misturas asfálticas produzidas no Brasil, buscando maximizar o desempenho estrutural da camada de revestimento asfáltico com o propósito de fornecer um pavimento de qualidade compatível com as exigências dos projetos de pavimentação rodoviária.

Dentro dessa perspectiva e considerando-se as particularidades dos materiais geossintéticos de reforço, justifica-se a realização de ensaios que contemplem a análise do comportamento mecânico de misturas asfálticas densas usinadas a quente, com e sem a inserção de geotêxtil não-tecido à sua composição, visando avaliar o eventual benefício desse elemento de reforço às propriedades mecânicas das misturas asfálticas investigadas.

O objetivo geral deste estudo consiste em efetuar, por meio dos resultados de ensaios de laboratório, uma comparação entre as propriedades mecânicas de misturas asfálticas densas usinadas a quente, com e sem reforço do geotêxtil, dosadas pelo método *Marshall*, utilizando simultaneamente as faixas granulométricas B e C da especificação de serviço ES 031 (DNIT, 2006) referente aos concretos asfálticos destinados a compor a camada de revestimento da estrutura de pavimentos asfálticos.

No que se refere aos objetivos específicos deste estudo, relacionados ao objetivo geral, destaca-se a análise comparativa das propriedades mecânicas de corpos de prova de misturas asfálticas densas, compostas pelas faixas granulométricas B e C, usinadas a quente, com e sem reforço de geotêxtil, dosadas pelo método *Marshall*, derivadas dos ensaios de Estabilidade, Resistência à Tração por Compressão Diametral, Módulo de Resiliência, Vida de Fadiga e Fluência. Destaca-se, também, a realização de análise computacional, usando como ferramenta o programa de dimensionamento estrutural mecanístico-empírico *me-PADS*, com o intuito de verificar a resposta estrutural do pavimento sem reforço e com o reforço geossintético em sua camada de revestimento asfáltico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BASTOS, G. A., CASAGRANDE, M.D.T., MOTTA, L. M. G., FOLLE, D. Ensaio de Tração em Disco Circular em Misturas Asfálticas Reforçadas com Geogrelhas. **Revista de Engenharia Civil Imed**, v. 2, n. 2, p.27-36, out. 2015. Complexo de Ensino Superior Meridional S.A.
- BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica para engenheiros**. Rio de Janeiro: Petrobrás: ABEDA, 2008.
- CARMO, C. A. T.; MONTESTRUQUE, G. **Restauração do Pavimento da Rodovia MG - 424 com Geogrelha de Poliéster**. 44^a Reunião Anual de Pavimentação (RAPv) e 18^o Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR), 2015, Foz do Iguaçu/PR. Anais CD-ROM.
- CARMO, C. A. T., RUIZ, E.F., PANDOLPHO, J. R.; MONSTESTRUQUE, G. **Utilização de Geogrelha de Poliéster na Restauração da Pista Auxiliar de Pouso e Decolagem do Aeroporto de Congonhas**. 44^a Reunião Anual de Pavimentação (RAPv) e 18^o Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR), Foz do Iguaçu/PR, 2015. Anais CD-ROM.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTE – CNT. **Plano CNT de Transporte e Logística**. Brasília, 2017. 406p.
- CORREIA, N. S., ZORNBERG, J. G. Mechanical response of flexible pavements enhanced with geogrid-reinforced asphalt overlays. **Geosynthetics International**, 2015.
- FONSECA, L. L., ALMEIDA, M. G. G., GRECO, J. A. S. **Avaliação da resistência a tração na flexão de camadas asfálticas reforçadas com geossintéticos**. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 18, 2016, Belo Horizonte. Anais... Belo Horizonte: ABMS, 2016.
- MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos pavimentos**. 3^a ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2015. 638p.
- PINTO, S.; PREUSSLER, E. **Pavimentação rodoviária – conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis**. Rio de Janeiro, Copiarte, 2002. 269p.

CAPÍTULO 2

ANÁLISE COMPARATIVA DOS EFEITOS DA IMPREGNAÇÃO DO GEOTÊXTIL NA RESPOSTA MECÂNICA DE MISTURAS ASFÁLTICAS A QUENTE COMPOSTAS

RESUMO

O desempenho estrutural da camada de revestimento asfáltico é função não só dos materiais que fazem parte da sua composição, mas também da sua interação. Diante disso o desempenho estrutural do revestimento asfáltico reforçado é influenciado pela interação entre a mistura asfáltica e o elemento de reforço. Nesse contexto, esse estudo avaliou o efeito da impregnação do geotêxtil no comportamento mecânico de misturas asfálticas a quente compostas reforçadas por esse geossintético. Estas misturas foram dosadas pelo método *Marshall*, empregando-se o ligante asfáltico CAP 50/70 para a mistura e a impregnação. As faixas granulométricas “B” e “C” da especificação ES 031 do DNIT foram destinadas a compor a camada de revestimento asfáltico, simultaneamente (capa asfáltica e *binder*, respectivamente). Desenvolveu-se uma análise dos parâmetros mecânicos derivados dos ensaios de Resistência à Tração por Compressão Diametral e Estabilidade *Marshall*, buscando-se definir a condição de impregnação mais favorável para a mistura composta reforçada. A configuração de impregnação em que o geotêxtil recebeu a pintura de ligação somente na face superior apresentou desempenho estrutural satisfatório, provavelmente devido à aderência mobilizada na interface reforço-camada superior do revestimento composto.

PALAVRAS-CHAVE: Geotêxtil, Reforço geossintético, Misturas asfálticas a quente compostas, Impregnação, Pintura de ligação, Aderência.

ABSTRACT

The structural performance of the asphalt wearing course layer is a function not only of the materials that are part of its composition but also of the interaction between them. Thus, the structural performance of the reinforced asphalt wearing course is influenced by the interaction between the asphalt mixture and the reinforcement

element. In this context, this study evaluated the effect of impregnation of the geotextile in the mechanical behavior of composite hot asphalt mixtures reinforced by this geosynthetic. These mixtures were dosed by the Marshall method, using the CAP 50/70 asphalt binder for the asphalt mixture and the impregnation. The grading envelopes "B" and "C" of the ES 031 specification of the DNIT were used to compose the asphalt wearing course layer, simultaneously (layer asphalt e binder course, respectively). The analysis of the mechanical parameters derived from the Tensile Strength by Diametral Compression, and Marshall Stability, was performed to define the most favorable impregnation condition for the reinforced composite mixture. The configuration of impregnation in which the geotextile received the tack coat only on the upper face presented a satisfactory structural performance, this was probably due to the adhesion mobilized at the reinforcement/top layer interface of the composite wearing course.

KEYWORDS: Geotextile, Geosynthetic reinforcement, Composite hot asphalt mixes, Impregnation, Tack coat, Adhesion.

2.1. INTRODUÇÃO

De acordo com a CNT (2017), 78,7% (1.365.426 km) das rodovias brasileiras não são pavimentadas e mais de 9% (157.309 km) estão planejadas para serem implantadas. Diante disso, constata-se que há um inequívoco déficit por tais obras civis e, conseqüentemente, uma necessidade de avanços tecnológicos da engenharia de pavimentos para a aplicação de materiais e misturas asfálticas mais eficazes que os convencionais. Essa medida visa à garantia de melhor desempenho estrutural e maior durabilidade dos pavimentos projetados e executados para o atendimento da demanda existente e a redução desse déficit.

As camadas constituintes da estrutura de um pavimento rodoviário podem ser construídas por meio de diversos materiais. A escolha desses materiais depende do tipo de estrutura a ser implantada, das características do perfil geotécnico da região, do tráfego que solicitará a estrutura e, principalmente, dos materiais disponíveis. Para a elaboração coerente de um projeto de pavimento, é necessário compreender o seu princípio de funcionamento, ou seja, a mecânica do pavimento, que, por sua vez, está intimamente relacionada com duas principais variáveis: o

tráfego e as características geotécnicas do subleito no qual o pavimento será assentado (CAVALEIRO e OLIVEIRA, 2018).

Estudos nacionais e internacionais evidenciam o quanto a inserção de geossintéticos em misturas asfálticas, seja em pavimentos novos ou restaurados, complementa suas propriedades mecânicas, conferindo um melhor desempenho estrutural ao revestimento asfáltico. Alguns exemplos disso são os trabalhos de Correia (2010) e Norambuena-Contreras e Gonzalez-Torre (2015), os quais envolveram a análise da inserção de geotêxtil em sistemas anti-reflexão de trincas, Litton (1989), o qual enfatizou a capacidade de reforço e o alívio de tensões em concretos asfálticos combinados com o geotêxtil, e Correia e Zornberg (2018), que destacou o uso de camadas reforçadas com geogrelhas propiciando a extensão da vida útil de revestimentos asfálticos.

A adequada aderência entre as camadas do revestimento interfere no funcionamento satisfatório da camada intermediária inserida em revestimentos asfálticos reforçados, utilizada como sistema anti-reflexão de trincas. Para isso, a aplicação do ligante asfáltico de impregnação deve ser homogênea e apropriada para cada tipo de geossintético utilizado. O geotêxtil não tecido proporciona uma devida aderência entre as camadas do revestimento conforme o teor de impregnação aplicado, bem como o tipo de impregnação efetuado devido às diferentes viscosidades dos ligantes utilizados (CORREIA, 2010).

Conforme Guimarães (2013), a aderência entre camadas asfálticas representa um fator essencial para o desempenho e a vida de serviço do pavimento. A análise dessa propriedade é importante para a compreensão da estrutura do pavimento multicamadas comportando-se como sistemas monolíticos.

A inclusão do elemento geossintético entre as camadas de misturas asfálticas pode implicar na variação da condição de aderência entre as mesmas e, com isso, interferir no desempenho do sistema de reforço. A perda de ligação entre as camadas ocasionaria danos prematuros no pavimento (VANELSTRAETE e COURARD, 1997; MONTESTRUQUE et al., 2011; RAAB e PARTL, 2004; BAZARRA et al., 2010).

A pintura de ligação é a aplicação de uma película delgada de um material asfáltico entre camadas asfálticas de pavimento. A aplicação dessa pintura é imprescindível para possibilitar a aderência entre duas camadas asfálticas e

aumentar a durabilidade dos revestimentos. Exemplos de ligantes asfálticos utilizados para pintura de ligação são emulsões asfálticas ou, em casos mais raros, o próprio cimento asfáltico de petróleo (CAP). As emulsões asfálticas, resultantes da mistura de CAP e água por meio de um agente emulsificante, possuem baixa viscosidade a baixas temperaturas, permitindo fácil aplicação em campo (CHEN e HUANG, 2010; MOHAMMAD et al., 2002; SALOMON, 2006).

A pintura de ligação é, portanto, um tratamento de interface, o qual é empregado com o objetivo principal de impedir problemas de trincamento precoce por fadiga ou de escorregamentos. Etapa simples e com custo relativamente baixo quando comparada ao valor total da execução de uma obra de pavimentação asfáltica, a pintura de ligação é essencial para o funcionamento adequado e o prolongamento da vida útil de pavimentos novos ou restaurados (SALOMON, 2006).

Sabendo-se que a escassez de recursos financeiros é um dos fatores preponderantes no planejamento dos investimentos públicos no Brasil, os grandes volumes de recursos exigidos na área de infraestrutura de transportes necessitam de técnicas inovadoras de construção que sejam incorporadas à prática de engenharia rodoviária. Essa medida tem como objetivo reduzir custos e aumentar a durabilidade de nossas rodovias, garantindo o retorno social do capital investido.

Nesse contexto, desenvolveu-se, nessa pesquisa, uma análise dos parâmetros mecânicos derivados dos ensaios de Resistência à Tração por Compressão Diametral (RT) e Estabilidade *Marshall*, buscando eleger o cenário de impregnação do geotêxtil mais favorável para a mistura composta reforçada por esse geossintético. O propósito principal desse estudo foi avaliar o eventual benefício desse elemento de reforço, em diferentes cenários de impregnação, às propriedades mecânicas das misturas asfálticas investigadas. Acredita-se que o desenvolvimento desta pesquisa poderá contribuir para incrementar o banco de dados nacionais referentes ao reforço geossintético de revestimentos asfálticos.

2.2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.2.1 Materiais

Os agregados minerais graúdos (brita 0 e brita 1) e miúdo (pó de pedra) que foram utilizados nesta pesquisa são de formação gnáissica e oriundos da pedreira

Ervália Ltda., localizada no município de Ervália-MG. As faixas granulométricas adotadas neste trabalho foram, simultaneamente, a “B” e a “C” da especificação de serviço ES 031 (DNIT, 2006c), constituindo uma camada composta de revestimento asfáltico. O ligante asfáltico empregado foi o CAP 50/70, oriundo da REGAP – Refinaria Gabriel Passos, localizada no município de Betim-MG. Este ligante foi certificado pelo laboratório da Petrobrás sob o nº 2505-14 G. O material geossintético de reforço das misturas asfálticas investigadas foi fornecido por uma empresa nacional, correspondendo a um geotêxtil não-tecido. As características tecnológicas desse geossintético foram fornecidas pelo fabricante.

2.2.2 Métodos

2.2.2.1 Caracterização tecnológica dos materiais e da mistura asfáltica

Na Tabela 2.1, apresentam-se a identificação dos ensaios realizados sobre os materiais e misturas asfálticas e as correspondentes normas adotadas. Os agregados foram coletados segundo os procedimentos prescritos pela norma DNER PRO 120 (DNER, 1997b).

Tabela 2.1: Ensaios realizados no programa experimental de pesquisa

Agregado graúdo	Material		Mistura asfáltica
	Agregado miúdo	Ligante asfáltico	
Análise granulométrica - ME 083 (DNER, 1998c)	Análise granulométrica - ME 083 (DNER, 1998c)	Penetração - ME 155 (DNIT, 2010b)	Resistência à Tração por compressão diametral - ME 136 (DNIT, 2018)
Abrasão <i>Los Angeles</i> - ME 035 (DNER, 1998b)	Massa específica e massa específica aparente - NBR NM 52 (ABNT, 2009)	Ponto de fulgor e combustão - ME 148 (DNER, 1994d)	Estabilidade <i>Marshall</i> - ME 043 (DNER, 1995)
Absorção e massa específica - ME 195 (DNER, 1997a)	Equivalente de areia - ME 054 (DNER, 1997c)	Ponto de amolecimento - ME 131 (DNIT, 2010a)	Dosagem <i>Marshall</i> - ME 043 (DNER, 1995)
Adesividade ao ligante betuminoso - ME 078 (DNER, 1994a)	Angularidade - C 1252 (ASTM, 2006)	Massa específica real - ME 009 (DNER, 1998a)	
Índice de forma - ME 086 (DNER, 1994b)		Solubilidade em tricloroetileno - NBR 14855 (ABNT, 2015)	
Partículas alongadas e achatadas - D 4791 (ASTM, 2010)		Viscosidade <i>Saybolt-Furol</i> - ME 004 (DNER, 1994e)	
Sanidade - ME 089 (DNER, 1994c)		pH - ME 149 (DNER, 1994f)	

2.2.2.2 Escolha da distribuição granulométrica de projeto para as faixas granulométricas B e C do DNIT

Foram utilizadas, nessa pesquisa, misturas asfálticas que se enquadraram nas faixas granulométricas “B” e “C”, conforme a especificação de serviço ES 031 (DNIT, 2006c) destinada aos concretos betuminosos usinados a quente (CBUQs). Para as referidas faixas, as curvas granulométricas de projeto foram escolhidas atendendo às especificações e aos limites impostos pela especificação de serviço mencionada, de acordo com o método de dosagem *Marshall*.

2.2.2.3 Dosagem experimental das misturas asfálticas

Os respectivos teores de ligante asfáltico de projeto correspondentes às faixas granulométricas B e C foram determinados com base no critério Volume de vazios (Vv) - Relação Betume-Vazios (RBV), conforme os limites máximo e mínimo para tais parâmetros, definidos pela especificação ES 031 (DNIT, 2006c).

2.2.2.4 Preparação das misturas asfálticas

Os corpos de prova das misturas asfálticas foram confeccionados utilizando o ligante asfáltico à 165°C e os agregados à 175°C, ambos aquecidos em estufa. Após a homogeneização dos materiais, as misturas foram colocadas nos moldes de compactação, sendo depositada, primeiramente, a mistura asfáltica correspondente à faixa “B”, equivalente ao *binder*, seguida da inserção do geotêxtil com/sem impregnação, e, por fim, a mistura asfáltica da faixa “C”, equivalente à capa asfáltica (Figura 2.1).

A mistura composta foi submetida ao esforço de compactação, a qual foi feita à 140°C para garantir que o CAP apresentasse a viscosidade proposta pela especificação de serviço ES 031 (DNIT, 2006c). Finalizada a compactação, o conjunto foi resfriado à temperatura ambiente, em uma superfície plana, por 24 horas, para posterior extração do corpo de prova compactado da mistura asfáltica composta reforçada.

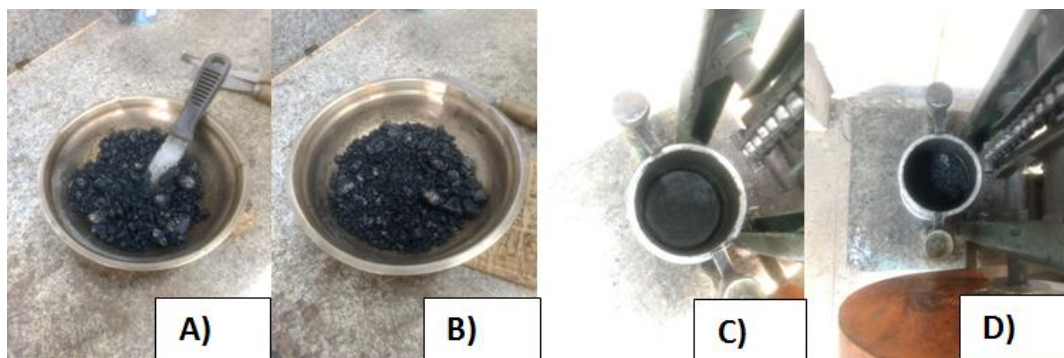


Figura 2.1: A) Mistura Faixa B; B) Mistura Faixa C; C) Mistura Faixa B + Geotêxtil com impregnação, D) Mistura Faixa B + Geotêxtil com impregnação + Mistura Faixa C

2.2.2.5 Impregnação do geotêxtil

Foram confeccionados corpos de prova de revestimentos asfálticos compostos, constituídos, simultaneamente, pelas misturas asfálticas de projeto correspondentes às faixas granulométricas “B” e “C”, reforçados com geotêxtil com/sem impregnação. Visando à determinação da viabilidade de impregnação do geotêxtil, foram adotados 4 cenários distintos: 1- sem impregnação, 2- impregnado nos dois lados, 3- impregnado superiormente e 4- impregnado inferiormente. Para a impregnação, foi utilizado o CAP 50/70, sendo adotado o teor de impregnação de $0,36 \text{ L/m}^2$ para cada pintura de ligação (impregnação). Conforme a ES 145 (DNIT, 2012), a taxa recomendada para a pintura de ligação é de $0,30$ a $0,40 \text{ L/m}^2$. Portanto, o valor adotado está dentro dos limites estabelecidos. A impregnação das faces do geotêxtil se deu através do procedimento denominado de “fio de ovos”, sendo, portanto, dispensado o uso do pincel para que não promovesse danos nas fibras do elemento de reforço.

2.2.2.6 Ensaios mecânicos

Considerando-se os respectivos teores de ligante asfáltico de projeto definidos pelo método de dosagem adotado nessa pesquisa para as faixas granulométricas B e C, foram confeccionados corpos de prova de revestimentos asfálticos compostos (Figura 2.2), constituídos, simultaneamente, pelas respectivas misturas asfálticas de projeto, com o reforço geossintético impregnado segundo os cenários previstos na pesquisa. Visando à determinação das propriedades mecânicas de interesse conforme as respectivas prescrições normativas, foram realizados os ensaios de Resistência à

Tração por Compressão Diametral e Estabilidade *Marshall* para o estudo da viabilidade da impregnação no reforço geossintético.

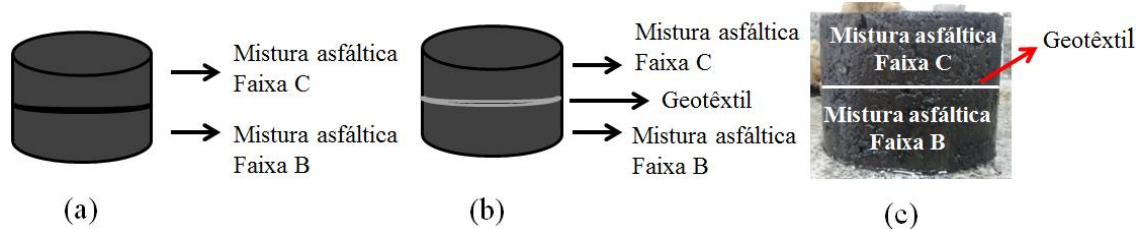


Figura 2.2: Esquema de corpos de prova moldados simultaneamente com as misturas asfálticas de projeto das duas faixas granulométricas (B e C) e com a inserção do reforço geossintético (geotêxtil).

2.3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

2.3.1 Caracterização dos materiais

As granulometrias dos agregados minerais empregados na pesquisa estão apresentadas na Figura 2.3. Os demais resultados referentes à caracterização tecnológica dos agregados minerais estão apresentados na Tabela 2.2. O ligante asfáltico utilizado nessa pesquisa foi o CAP 50/70, ressaltando-se que os resultados obtidos referentes à sua caracterização tecnológica (Tabela 2.3) estão em conformidade com a especificação EM 095 (DNIT, 2006b). As características tecnológicas do geotêxtil constam na Tabela 2.4.

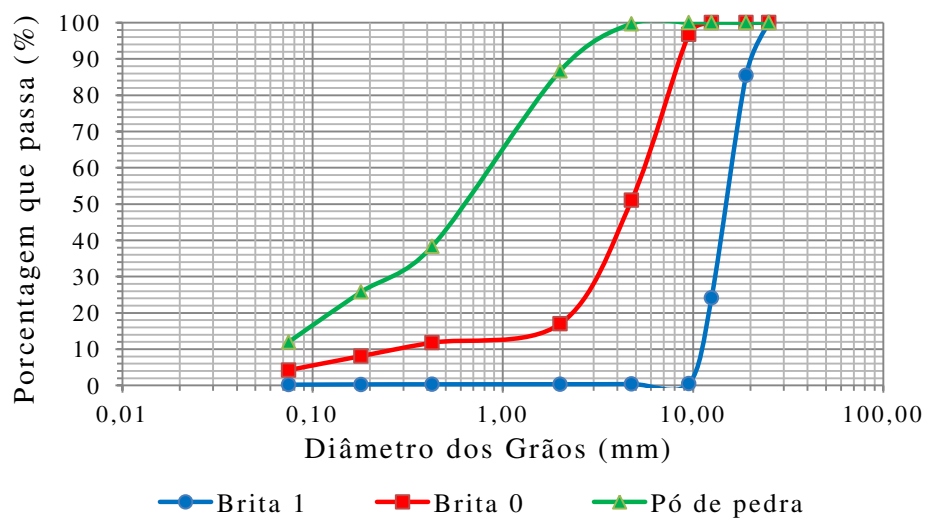


Figura 2.3: Curvas granulométricas dos agregados minerais empregados na pesquisa.

Tabela 2.2: Resultados dos ensaios de caracterização dos agregados minerais empregados na pesquisa

Propriedade	Magnitude		
	Brita 0	Brita 1	Pó de pedra
Abrasão <i>Los Angeles</i> (%)	45	45	-
Absorção (%)	1,14	1,14	-
Adesividade ao ligante betuminoso	Insatisfatória ⁽¹⁾	Insatisfatória ⁽¹⁾	-
Índice de forma	0,68	0,68	-
Massa específica real (g/cm ³)	2,794	2,794	2,794
Sanidade (%)	0,38	0,38	-
Equivalente de areia (%)	-	-	59
Angularidade	-	-	Classe subarredondada
Massa específica aparente (g/cm ³)	2,705	2,705	-
Partículas alongadas e achatadas	Classe Semialongada-Semicircular	Classe Semialongada-Semicircular	-

⁽¹⁾: satisfatória com 0,1%, em massa do ligante asfáltico, de aditivo Betudope.

Tabela 2.3: Resultados dos ensaios de caracterização do ligante asfáltico empregado na pesquisa

Propriedade	Magnitude
Penetração (dmm)	57
Massa específica real (g/cm ³)	1,010
Ponto de amolecimento (°C)	51
Densidade Relativa	1,006
Ponto de Fulgor (°C)	343
Ponto de combustão (°C)	365
Solubilidade no Tricloroetileno (%)	100
Viscosidade Saybolt-Furol	135°C – 172 segundos 150°C – 64 segundos

Tabela 2.4: Principais características técnicas do geossintético empregado na pesquisa

Propriedade	Unidade	
Matéria-prima principal	-	Poliéster
Gramatura	g/m ²	150
Resistência à tração		
Longitudinal	kN/m	7
Transversal		8
Deformação na resistência à tração		
Longitudinal	%	>70
Transversal		>70
Resistência ao rasgo trapezoidal		
Longitudinal	kN/m	220
Transversal		200

2.3.2 Granulometrias de projeto

Nesta pesquisa, foram utilizadas misturas asfálticas de projeto correspondentes a duas faixas granulométricas (B e C), simultaneamente, especificadas pela ES 031 (DNIT, 2006c). As Figuras 2.4 e 2.5 apresentam, respectivamente, para as faixas B e C, as granulometrias de projeto adotadas na pesquisa.

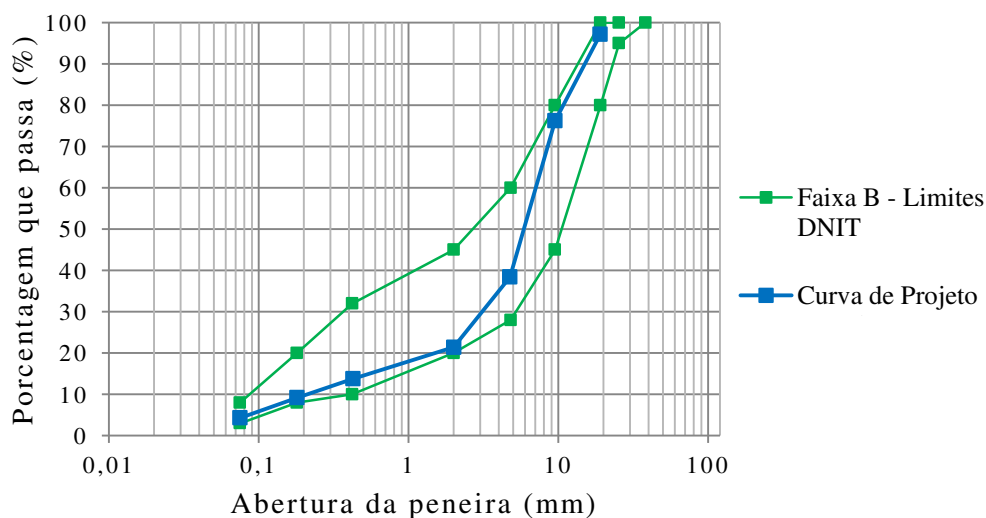


Figura 2.4: Granulometria de projeto correspondente à faixa B da ES 031.

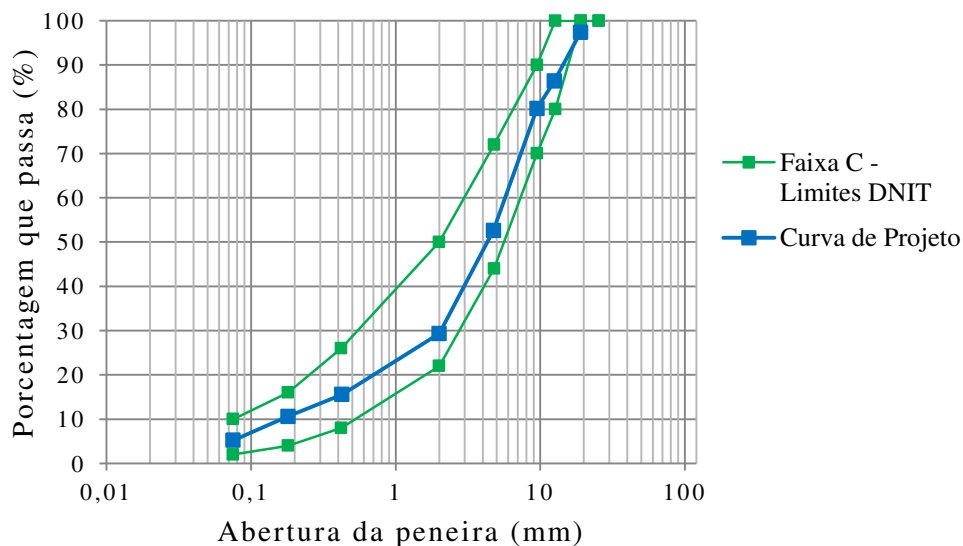


Figura 2.5: Granulometria de projeto correspondente à faixa C da ES 031.

2.3.3 Dosagem das misturas asfálticas de projeto

2.3.3.1 Dosagem da mistura asfáltica de projeto da faixa granulométrica B

Feita a verificação da curva granulométrica de projeto para a faixa granulométrica de serviço B, definiu-se o teor de projeto de CAP através do método de dosagem *Marshall*. Inicialmente, foram testadas misturas com os teores de CAP 50/70 de 3,5% a 5,5%. A Figura 2.6 mostra os valores dos parâmetros volumétricos [Volume de vazios (Vv) e Relação Betume-Vazios (RBV)] e mecânicos (Estabilidade) determinados a partir da dosagem *Marshall*, para a mistura dos agregados minerais que atendem à faixa granulométrica B da especificação ES 031 (DNIT, 2006c).

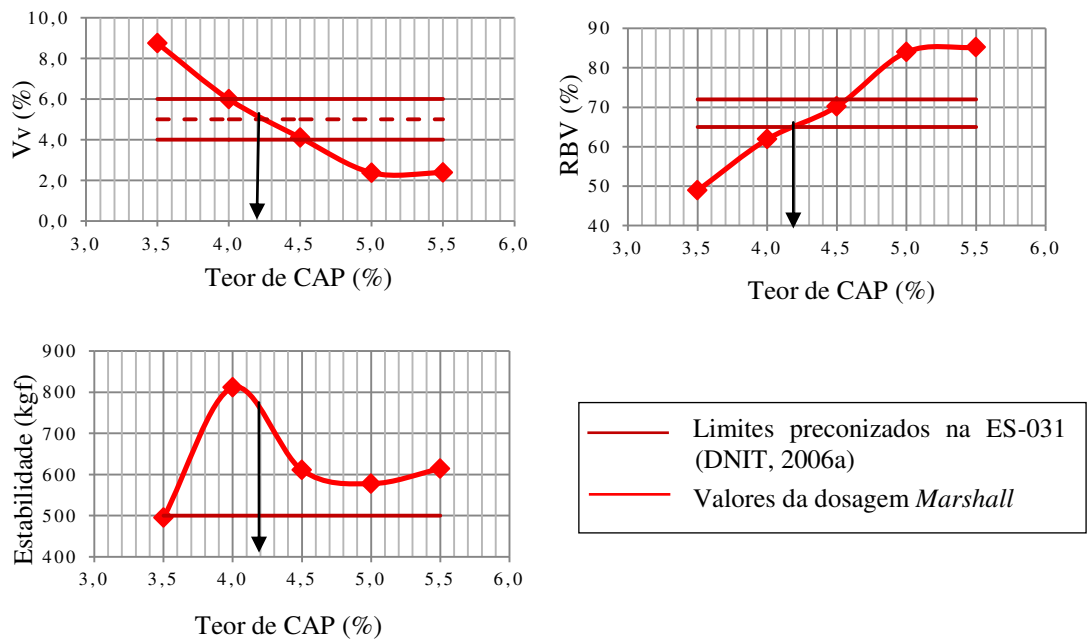


Figura 2.6: Resultados dos parâmetros de dosagem Marshall para a determinação do teor de ligante para a mistura asfáltica de projeto da faixa B.

Após serem obtidos os parâmetros de dosagem *Marshall*, construiu-se um gráfico, apresentado na Figura 2.7, com as respectivas relações entre o teor de ligante asfáltico e os valores médios de Volume de vazios (Vv) e da Relação Betume-Vazios (RBV). O teor de ligante foi, preliminarmente, determinado através da média aritmética de X2 e X4. A partir dessa média, foi obtido um teor de ligante de projeto de 4,40%. Segundo a especificação de serviço ES 031 (DNIT, 2006c), a escolha do

teor de ligante asfáltico de projeto baseia-se no Volume de vazios (Vv), que pode variar entre 4% e 6%, adotando-se, nessa pesquisa, Vv= 5% para a mistura de projeto. A partir dessas informações, verifica-se, pela Figura 2.6, que o teor de ligante asfáltico para tal condição foi de 4,2%.

Com o intuito de comprovar que o teor de projeto de 4,2% atendia aos limites da especificação de serviço para a dosagem *Marshall* da faixa B, foram moldados três corpos de prova com esse teor de ligante asfáltico, cujos resultados das médias dos parâmetros de dosagem *Marshall*, acrescidos do valor de RT, são apresentados na Tabela 2.5. Pode-se concluir que o teor de ligante asfáltico de 4,2% atendeu a todas as especificações estabelecidas pela norma, sendo adotado como teor de ligante asfáltico de projeto da mistura asfáltica correspondente à faixa B segundo a dosagem *Marshall*.

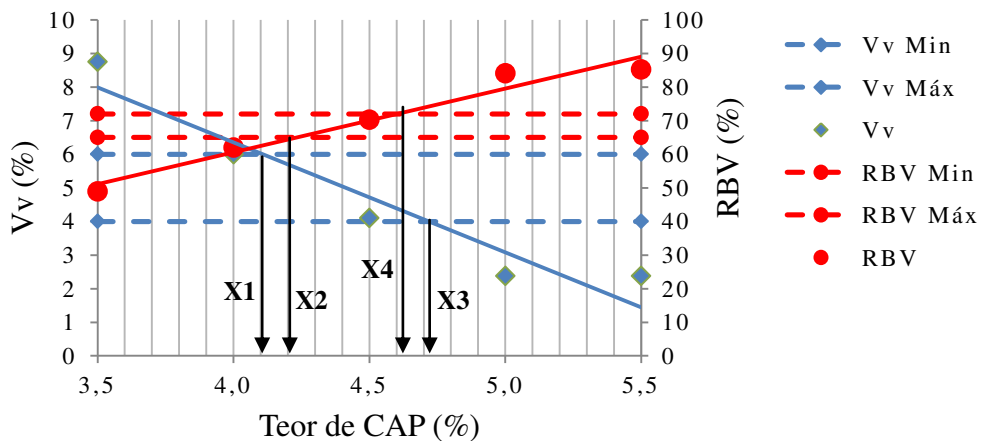


Figura 2.7: Gráfico Teor de CAP versus Vv e RBV, para determinação do teor de ligante para a mistura asfáltica de projeto da faixa B.

Tabela 2.5: Parâmetros de dosagem *Marshall* para o teor de ligante asfáltico de projeto de 4,2%: faixa B

Parâmetro	Valor para o teor de ligante de 4,20%	Limites prescritos pela ES 031 (DNIT, 2006c)
RT (MPa)	0,95	0,65
Estabilidade (kgf)	535	>500
Vv (%)	4,4	4 a 6
RBV (%)	70	65 a 72

2.3.3.2 Dosagem da mistura asfáltica de projeto da faixa granulométrica C

Após a verificação da curva granulométrica de projeto para a faixa de serviço C, definiu-se o teor de projeto de CAP através do método de dosagem *Marshall*. Inicialmente, foram testadas misturas com os teores de CAP 50/70 de 4,0% a 6,0%. A Figura 2.8 mostra os valores dos parâmetros volumétricos [Volume de vazios (Vv) e Relação Betume-Vazios (RBV)] e mecânicos (Estabilidade) determinados a partir da dosagem *Marshall*, para a mistura dos agregados minerais que atendem à faixa granulométrica C da especificação ES 031 (DNIT, 2006c).

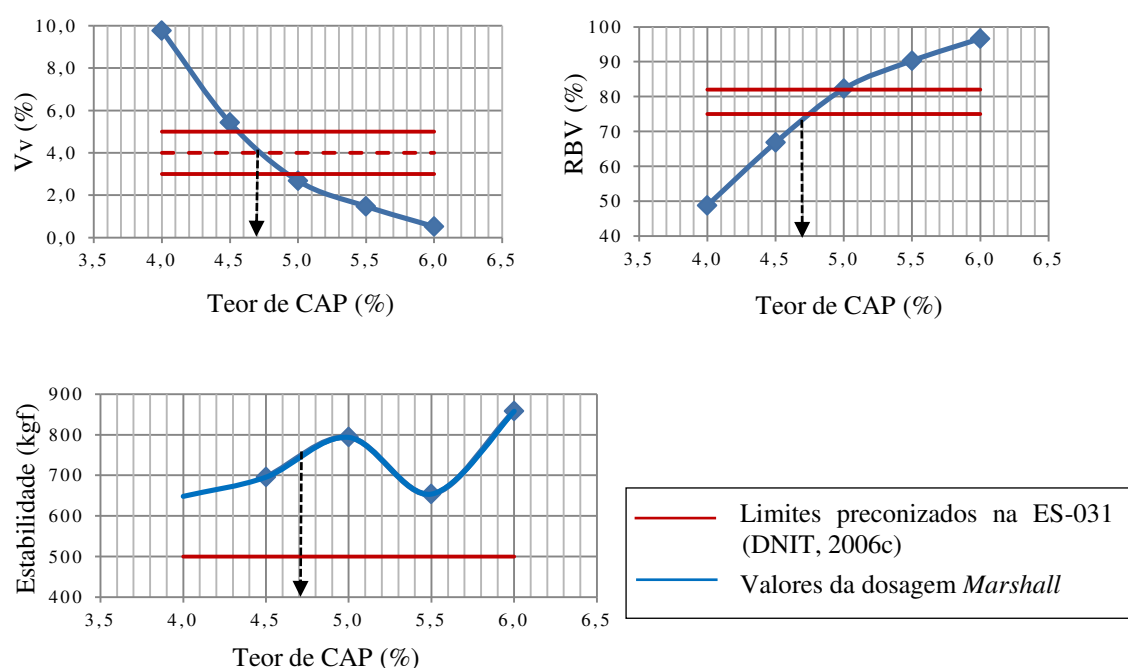


Figura 2.8: Resultados dos parâmetros de dosagem Marshall para a determinação do teor de ligante da mistura asfáltica de projeto da faixa C.

Após serem obtidos os parâmetros de dosagem *Marshall*, construiu-se um gráfico (Figura 2.9), com os valores médios de Volume de vazios (Vv) e da Relação Betume-Vazios (RBV). O teor de ligante asfáltico foi determinado, preliminarmente, através da média aritmética de X2 e X3. A partir dessa média, foi obtido um teor de ligante de 5,00%, porém, ao se observar a Figura 2.8, verifica-se que, para este teor de ligante asfáltico, o parâmetro Vv não se enquadra dentro dos limites da ES 031 (DNIT, 2006c), que estabelece um mínimo de Vv=3% para a faixa granulométrica C. Para a média da faixa especificada (Vv=4%), o teor de ligante asfáltico corresponde

a 4,7%, o qual foi adotado, preliminarmente, como teor de ligante asfáltico de projeto.

Com o intuito de comprovar que o teor de ligante asfáltico de projeto de 4,7% atendia aos limites da especificação de serviço para a dosagem *Marshall* da faixa granulométrica C, foram moldados três corpos de prova com esse teor de ligante asfáltico, cujos resultados das médias dos parâmetros de dosagem *Marshall*, acrescidos do valor de RT, são apresentados na Tabela 2.6. Pode-se concluir que o teor de ligante asfáltico de 4,7% atendeu a todas as especificações estabelecidas pela norma, sendo adotado como teor de ligante de projeto da mistura asfáltica correspondente à faixa granulométrica C segundo a dosagem *Marshall*.

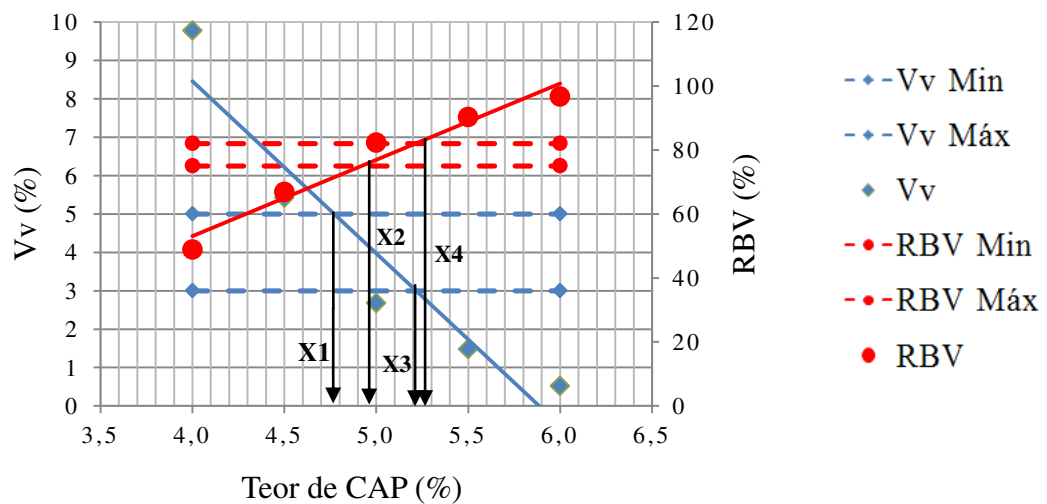


Figura 2.9: Gráfico Teor de CAP versus Vv e RBV para determinação do teor de ligante para a mistura asfáltica de projeto da faixa C.

Tabela 2.6: Parâmetros de dosagem *Marshall* para o teor de ligante asfáltico de projeto de 4,7%: faixa C

Parâmetro	Valor para o teor de ligante de 4,70%	Limites prescritos pela ES 031 (DNIT, 2006c)
RT (MPa)	0,91	0,65
Estabilidade (kgf)	525	>500
Vv (%)	3,7	3 a 5
RBV (%)	76	75 a 82

2.3.4 Ensaio mecânicos

As Tabelas 2.7 e 2.8 apresentam os valores de RT e Estabilidade *Marshall* correspondentes a cada um dos cenários de impregnação (pintura de ligação) do geotêxtil (definidos no item 2.2.2.5), para as misturas asfálticas compostas reforçadas definidas nesse programa experimental.

Em todos os cenários que envolveram a impregnação, para as duas propriedades mecânicas investigadas, a resposta mecânica da mistura asfáltica reforçada mostrou-se equivalente (caso da RT) ou superior (caso da Estabilidade) àquela apresentada pela condição não impregnada do reforço, realçando a importância técnica da impregnação.

Segundo Fonseca (2015), a pintura de ligação promove uma adequada condição de aderência entre as camadas asfálticas do revestimento, garantindo um ganho de resistência e, portanto, uma melhor distribuição de tensões na estrutura. Assim, apesar de parecer um serviço secundário na construção de pavimentos, a deficiência na pintura de ligação pode resultar em menor eficiência estrutural da camada de revestimento asfáltico, reduzindo seu desempenho e, conseqüentemente, sua vida útil.

Tabela 2.7: Resultados dos ensaios de Resistência à Tração por Compressão Diametral (RT) para corpos de prova representativos dos 4 cenários de pintura de ligação analisados

Cenário	Corpo de Prova	Carga de ruptura (kgf)	Diâmetro (cm)	Altura (cm)	RT (MPa)	RT média (MPa)	Desvio padrão médio (MPa)	Coefficiente de variação (%)
1	1	1139	10,17	6,51	1,07	1,11	0,03	2,70
	2	1161	10,14	6,53	1,10			
	3	1196	10,16	6,53	1,13			
2	1	1000	10,16	6,51	0,94	1,03	0,08	7,78
	2	1062	10,17	6,46	1,03			
	3	1151	10,17	6,48	1,09			
3	1	1181	10,17	6,51	1,11	1,11	0,03	2,70
	2	1163	10,15	6,48	1,10			
	3	1211	10,14	6,48	1,15			
4	1	1132	10,18	6,48	1,07	1,11	0,05	4,50
	2	1162	10,15	6,45	1,11			
	3	1220	10,18	6,42	1,17			

Tabela 2.8: Resultados dos ensaios de Estabilidade *Marshall* para corpos de prova representativos dos 4 cenários de pintura de ligação analisados

Cenário	Corpo de Prova	Diâmetro (cm)	Altura (cm)	Estabilidade (kgf)	Estabilidade média (kgf)	Desvio padrão médio (kgf)	Coefficiente de variação (%)
1	1	10,18	6,50	690	653	31	4,75
	2	10,18	6,57	653			
	3	10,15	6,52	629			
2	1	10,16	6,49	794	779	70	8,99
	2	10,17	6,48	779			
	3	10,16	6,52	666			
3	1	10,17	6,43	869	828	64	7,73
	2	10,17	6,49	828			
	3	10,17	6,48	744			
4	1	10,18	6,53	675	728	36	4,95
	2	10,17	6,48	728			
	3	10,14	6,50	744			

Analisando os resultados dos ensaios de Resistência à Tração por Compressão Diametral, verificou-se que não houve diferença significativa entre eles, não representando, portanto, um fator decisivo na escolha do cenário mais favorável de impregnação. Já para o ensaio de Estabilidade *Marshall*, o valor médio encontrado para o cenário 3, em que apenas a face superior do geotêxtil recebeu a impregnação/pintura de ligação, apresentou magnitude 27% maior em relação ao cenário sem impregnação, sendo também superior aos demais cenários analisados. Vale destacar que todos os cenários estão de acordo com a norma ES 031 (DNIT, 2006c), que determina 0,65 MPa como valor mínimo de Resistência à Tração por Compressão Diametral e 500 kgf como valor mínimo de Estabilidade *Marshall*.

A Figura 2.10 ilustra, de maneira comparativa, as médias dos resultados dos 4 cenários adotados no estudo para ambos ensaios realizados, bem como o desvio padrão dos valores obtidos para cada cenário.

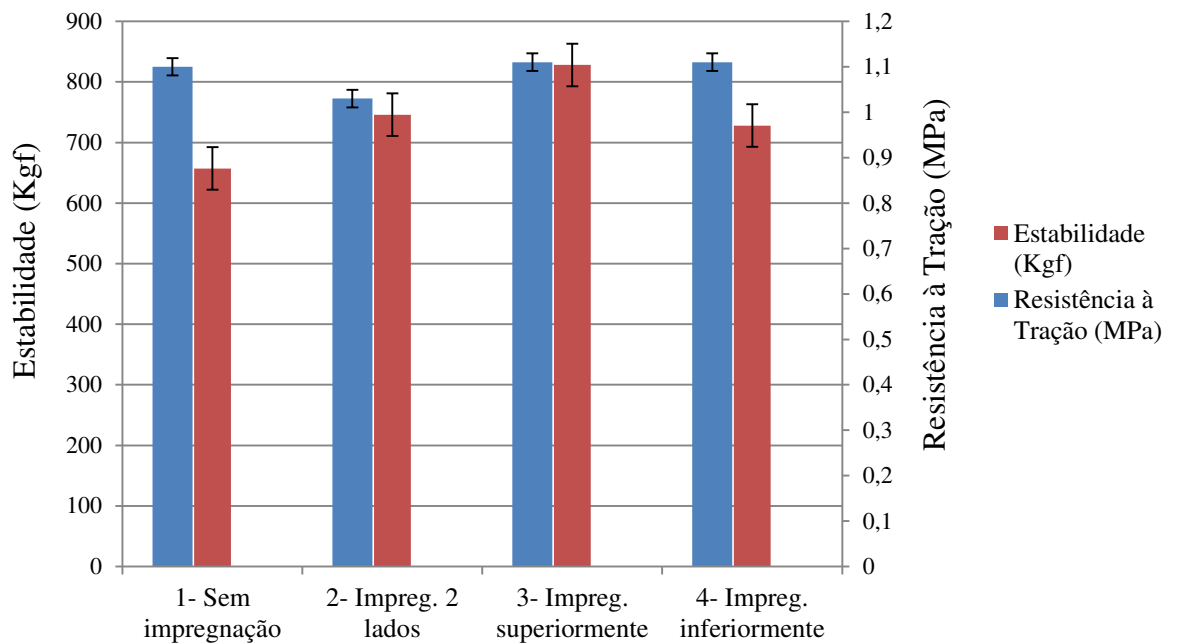


Figura 2.10: Gráfico comparativo dos resultados dos ensaios mecânicos de Resistência à Tração por Compressão Diametral e Estabilidade *Marshall* para os 4 cenários adotados nesse estudo.

No que se refere ao cenário 3, para as particularidades da configuração do ensaio de Estabilidade *Marshall*, supõe-se que, para a camada superior do corpo de prova composto, correspondente à faixa granulométrica C, houve necessidade da pintura de ligação para que fosse garantida a adesão entre as camadas, ou seja, entre o elemento de reforço e a mistura asfáltica faixa C. Esse comportamento é diferente para a camada inferior do corpo de prova composto, correspondente à faixa granulométrica B, em que a pintura de ligação poderia contribuir com a perda de atrito na ligação reforço/mistura asfáltica faixa B e, conseqüentemente, com a perda do desempenho estrutural do conjunto. Isso pode ser observado comparando-se os cenários de impregnação 2 e 3.

Ainda segundo essa perspectiva, a pintura de ligação promove condições de aderência entre a mistura asfáltica faixa C e o geotêxtil ao proporcionar coesão na superfície dessa camada, propiciando melhor adesão entre a mesma e o elemento de reforço. Já na ligação entre a camada da mistura asfáltica faixa B e o elemento de reforço, a aderência não carece de pintura de ligação pelo fato da superfície dessa

camada já apresentar coesão necessária à adesão da mistura asfáltica faixa B e o geotêxtil.

A hipótese levantada, relacionada à análise acima, decorreria do fato de a faixa granulométrica C corresponder a uma camada granulometricamente mais densa, ou seja, com o tamanho dos agregados constituintes e Volume de vazios da mistura compactada inferiores em relação à faixa granulométrica B. Portanto, acredita-se que houve necessidade da pintura de ligação na superfície de contato da mistura asfáltica faixa C para promover esse acréscimo de aderência devido à maior área/superfície de contato dessa mistura asfáltica em função da sua textura superficial.

De forma análoga às hipóteses levantadas nessa pesquisa, segundo Guimarães (2013), a textura superficial das misturas asfálticas tem influência significativa na aderência entre camadas. Para essa autora, a mistura deve apresentar uma textura superficial suficientemente rugosa para propiciar a devida aderência entre as camadas asfálticas, sendo essa rugosidade função da granulometria e da quantidade de ligante presente na mistura asfáltica. Diante disso, julga-se que tanto a granulometria quanto a pintura de ligação na superfície de contato da camada influenciam no intertravamento bem como na aderência entre as camadas e o reforço.

Portanto, a pintura de ligação representa um tratamento superficial eficiente que interfere diretamente nas propriedades mecânicas da mistura. Nesse contexto, segundo Shahin et al. (1986), quando a aplicação da pintura de ligação ocorre em quantidade insuficiente para garantir boa aderência entre as camadas asfálticas, surgem tensões de tração de elevada magnitude na fibra inferior da camada superficial, interferindo negativamente no desempenho mecânico do revestimento.

2.4. CONCLUSÃO

O propósito desse estudo foi avaliar o eventual benefício da impregnação do geotêxtil às propriedades mecânicas de misturas asfálticas reforçadas. Sua motivação decorreu da necessidade de incorporação de técnicas inovadoras de construção à prática de engenharia rodoviária, visando reduzir custos e aumentar a durabilidade de nossas rodovias, garantindo o retorno social do capital investido. Para as particularidades dessa pesquisa, observou-se que:

- A configuração correspondente à impregnação superior do geotêxtil mostrou-se a mais eficiente em relação às demais analisadas;
- Constatou-se, porém, que todos os cenários de impregnação resultaram em respostas mecânicas superiores às daquelas das misturas reforçadas não impregnadas;
- Acredita-se que a impregnação do elemento de reforço proporcionou ganhos na aderência entre as camadas asfálticas, sendo responsável pelo intertravamento entre essas camadas e o reforço;
- Supõe-se que a pintura de ligação promova condições de aderência entre a mistura asfáltica faixa C e o geotêxtil ao proporcionar coesão na superfície dessa camada, propiciando melhor adesão entre a mesma e o elemento de reforço. Já na ligação entre a camada da mistura faixa B e o elemento de reforço, a aderência não carece de pintura de ligação pelo fato da superfície dessa camada já apresentar coesão necessária à adesão da mistura faixa B e o geotêxtil;
- Acredita-se que houve necessidade da pintura de ligação na superfície de contato da mistura faixa C para promover esse acréscimo de aderência devido à maior área/superfície de contato dessa mistura em função da sua textura superficial;
- Julga-se que tanto as granulometrias que compõem as camadas asfálticas quanto a pintura de ligação na superfície de contato da camada influenciam no intertravamento bem como na aderência entre as camadas asfálticas e o reforço;
- A pintura de ligação representa um tratamento superficial eficiente que interfere diretamente nas propriedades mecânicas da mistura asfáltica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR NM 52:** Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente, Rio de Janeiro, 2009. 6p.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 14855**: Materiais betuminosos – Determinação da solubilidade em tricloroetileno, Rio de Janeiro, 2015. 5p.
- ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – **ASTM C 1252** – Standard test method for uncompacted void content of fine aggregate (as influenced by particle shape, surface texture and grading). USA, 2006. 5p.
- ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – **ASTM D 4791** – Standard test method for flat particles, elongated particles, or flat and elongated particles in coarse aggregate. USA, 2010. 6p.
- BAZARRA, D.Z.; PERÉZ, M.C.; FRESNO, D.C.; ZAMANILLO, A.V. New procedure for measuring adherence between a geosynthetic material and a bituminous mixture. In: **Geotextiles and Geomembranes**. 28. Elsevier. pp. 483-489. 2010.
- CAVALEIRO, E. A., OLIVEIRA, F. H. L. A interferência do módulo de resiliência do concreto asfáltico no período de projeto de pavimentos rodoviários, **Revista Transportes**, 26, Número 1, 2018, 10 p.
- CHEN, J. ; HUANG, C. Effect of Surface Characteristics on Bonding Properties of Bituminous Tack Coat. Transportation Research Record: **Journal of the Transportation Research Board**, No. 2180, pp142-149, 2010. Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2010.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTE – CNT. **Plano CNT de Transporte e Logística**, Brasília, 2017. 406p.
- CORREIA, N. S. **Comportamento de geotêxteis não tecidos impregnados com emulsão asfáltica usados como sistema anti-reflexão de trincas**. Dissertação de mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Paulo, SP, 2010. 131 p.
- CORREIA, N. S., ZORNBERG, J. G. Strain distribution along geogrid-reinforced asphalt overlays under traffic loading. **Journal of Geotextile and Geomembranes** 46, 2018. 111–120.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **ME 078**: Agregado graúdo – adesividade a ligante betuminoso: método de ensaio. Rio de Janeiro, 1994a. 3p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **ME**
086: Agregado: determinação do índice de forma. Rio de Janeiro, 1994b. 5p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **ME**
089: Agregados: avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio. Rio de Janeiro, 1994c. 6p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **ME**
148: Material betuminoso – determinação dos pontos de fulgor e de combustão (vaso aberto de Cleveland). Rio de Janeiro, 1994d. 2p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - DNER. **ME**
004: Material betuminoso – determinação da viscosidade Saybolt-Furol a alta temperatura - método da película delgada. Rio de Janeiro, 1994e. 2p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - DNER. **ME**
149: Emulsões asfálticas – determinação do pH. Rio de Janeiro, 1994f. 2p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **ME**
043: Misturas betuminosas a quente – ensaio *Marshall*. Rio de Janeiro, 1995. 11p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **ME**
195: Agregados – determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo. Rio de Janeiro, 1997a. 6p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **PRO**
120: Procedimento: coleta de amostra de agregado. [S.l.]. Rio de Janeiro, 1997b. 7p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **ME**
054: Equivalente de areia. Rio de Janeiro, 1997c. 6p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **ME**
009: Petróleo e derivados – determinação da densidade – método do densímetro. Rio de Janeiro, 1998a. 7p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **ME**
035: Agregados – determinação da abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro, 1998b. 6p.

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

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **Manual de estudos de tráfego**. Rio de Janeiro, 2006a. 388p.

- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **EM 095**: Cimentos asfálticos de petróleo – Especificação de material. Rio de Janeiro, 2006b. 6p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **ES 031**: Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2006c. 14p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **ME 131**: Materiais asfálticos - determinação do ponto de amolecimento-método do anel e bola. Rio de Janeiro, 2010a. 6p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **ME 155**: Material asfáltico – Determinação da penetração – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010b. 7p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **ES 145**: Pavimentação – Pintura de ligação com ligante asfáltico – Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2012. 7p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **ME 136**: Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio. Rio de Janeiro. 2018, 9p.
- FONSECA, L. L. **Avaliação em laboratório do comportamento de camadas asfálticas reforçadas com geossintético**. Dissertação Mestrado - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.
- GUIMARÃES, P. A. **Estudo da aderência entre camadas asfálticas de pavimentos**. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo - SP. 2013, 189 p.
- LYTTON, R. L., Use of geotextile for reinforcement and strain relief in asphalt concrete. **Journal of Geotextile and Geomembranes** 8, 1989. 217–237.
- MOHAMMAD, L. N.; RAQIB, M.A.; HUANG, B. Influence of Asphalt Tack Coat Materials on Interface Shear Strength. Transportation Research Record: **Journal of the Transportation Research Board**, No. 1789, pp56-65. Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2002.
- MONTESTRUQUE, G.; VASCONCELOS, K. L.; BERNUCCI, L. L. B. **Characterization of Interlayer Shear Resistance with the Use of Geogrid**. In:

- 5th International Conference Bituminous Mixtures and Pavements. Thessaloniki, Greece, 2011.
- NORAMBUENA-CONTRERAS, J.; GONZALEZ-TORRE, I. Influence of geosynthetic type on retarding cracking in asphalt pavements, **Constr. Build. Mater.** 78. 2015, 421–429.
- RAAB, C.; PARTL, M. N. **Interlayer Shear Performance: Experience with Different Pavement Structures.** In: 3^o Eurasphalt & Eurobitume Congress. Paper 081. Vienna, 2004. Book I – pp. 535-545.
- SALOMON, D. R. Asphalt Emulsion Technology. Transportation Research Circular E-C102. **Transportation Research Board of The National Academies.** 49p. Washington State Department of Transportation. Final Report no WA-RD 645.1. Washington D.C., 2006.
- SHAHIN, M. Y.; KIRCHNER, K.; BLACKMON, E. W.; TOMITA, H. Effect of Layer Slippage on Performance of Asphalt Concrete Pavements. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, N^o 1095, **Transportation Research Board of the National Academies**, Washington, D.C., 1986, pp 79-85.
- VANELSTRAETE, A. H. de Bondt, COURARD, L. **Prevention of Reflective Cracking in Pavements.** RILEM (Research Laboratories for Materials and Structures), Report 18. Edited by A. Vanelstraete and L. Francken. Belgian Road Research Centre, Brussels, Belgium, 1997.

CAPÍTULO 3

INFLUÊNCIA DA INSERÇÃO DE GEOTÊXTIL NA RESPOSTA MECÂNICA DE MISTURAS ASFÁLTICAS A QUENTE COMPOSTAS

RESUMO

A principal motivação dessa pesquisa foi o grande apelo pelo avanço tecnológico da engenharia de pavimentos visando à garantia de melhor desempenho estrutural e maior durabilidade dos pavimentos. Realizou-se uma análise do comportamento mecânico de misturas asfálticas a quente compostas reforçadas com geotêxtil impregnado. Estas misturas foram dosadas pelo método *Marshall*, empregando-se o ligante asfáltico CAP 50/70 para a mistura e a impregnação. As faixas granulométricas “B” e “C” da especificação ES 031 do DNIT foram destinadas a compor a camada de revestimento asfáltico, simultaneamente (capa asfáltica e *binder*, respectivamente). Desenvolveu-se uma análise dos parâmetros mecânicos derivados dos ensaios de Estabilidade *Marshall*, Resistência à Tração por Compressão Diametral, Módulo de Resiliência, Vida de Fadiga e *Creep* Estático. Constatou-se, experimentalmente, a capacidade do reforço geossintético de incrementar as propriedades mecânicas pesquisadas. Para as propriedades decorrentes de solicitações estáticas, os resultados indicaram ganhos percentuais médios de 48% e 22% para a Estabilidade *Marshall* e a Resistência à Tração, respectivamente. A suscetibilidade da mistura asfáltica à deformação permanente foi reduzida com a inserção do reforço. Para as propriedades dinâmicas, o Módulo Resiliente foi incrementado de 56%, assim como a Vida de Fadiga das misturas reforçadas. Os resultados realçam o potencial técnico da mistura asfáltica reforçada em suprir as necessidades estruturais da camada de revestimento asfáltico em face às solicitações impostas pelo tráfego e em aumentar o período de vida útil do pavimento asfáltico, restringido a possibilidade de deflagração precoce de patologias associadas às deficiências mecânicas associadas aos ensaios realizados.

PALAVRAS-CHAVE: Geotêxtil, Reforço geossintético, Misturas asfálticas a quente compostas, Ensaio Mecânicos.

ABSTRACT

The main motivation of this research was the need for the technological advancement of pavement engineering aiming at the guarantee of better structural performance and greater durability of pavements. The mechanical behavior of composite hot asphalt mixtures reinforced with impregnated geotextile was analyzed. These mixtures were dosed by the Marshall method, using the CAP 50/70 asphalt binder for the asphalt mixture and the impregnation. The grading envelopes "B" and "C" of the ES 031 specification of the DNIT were used to compose the asphalt wearing course layer, simultaneously (layer asphalt e binder course, respectively). The mechanical parameters used for this analysis were derived from the tests of Marshall Stability, Tensile Strength by Diametral Compression, Resilience Modulus, Fatigue Life and Static Creep. The capacity of the geosynthetic reinforcement to increase the mechanical properties investigated was experimentally verified. For properties resulting from static solicitations, the results indicated the average percentage gains of 48% and 22% for Marshall Stability and Tensile Strength by Diametral Compression, respectively. The susceptibility to permanent deformation of the compacted asphalt mixture was reduced with the insertion of the reinforcement. For the dynamic properties, the Resilient Modulus increased by 56%, as well as the Fatigue Life of the reinforced mixtures. The results show the technical potential of the reinforced asphalt mixture to meeting the structural needs of the asphalt wearing course layer in face of the solicitations of the traffic and to increase the useful life of asphalt pavement. These facts may contribute to restricting the early deflagration of pathologies related to the mechanical deficiencies associated with the tests performed.

KEYWORDS: Geotextile, Geosynthetic reinforcement, Composite hot asphalt mixes, Mechanical tests.

3.1. INTRODUÇÃO

A malha rodoviária brasileira é de suma importância na economia nacional devido ao transporte de mais de 60% da carga de todo o país, diferentemente de outros países em que o transporte rodoviário é menos comum. Nos Estados Unidos, por exemplo, este tipo de transporte só atinge 26% de sua utilização, e na China,

somente 8%. Porém, os investimentos do governo brasileiro destinados ao sistema rodoviário não cobrem todas as necessidades impostas pelo mesmo, que se encontra em estado avançado de deterioração (IPEA, 2010).

Por definição, conforme Medina e Motta (2015), o pavimento flexível é constituído por um revestimento betuminoso sobre uma base granular ou de solo modificado granulometricamente. Pavimentos flexíveis, de acordo com Huang (1993), se caracterizam por serem formados de betume e materiais granulares, dispostos em camadas. A qualidade do material empregado nessas camadas vai decrescendo conforme o nível de tensão atuante no pavimento também decresce.

O desempenho dos pavimentos flexíveis é condicionado pela ocorrência de defeitos que, inevitavelmente, surgem com o tempo de exposição ao tráfego e às intempéries. No Brasil, o trincamento dos revestimentos asfálticos é a maior causa da redução do desempenho do pavimento, originando defeitos mais graves que reduzem ainda mais a serventia do mesmo (BASTOS, 2010).

Segundo Gouveia (2006), o aumento da deformação permanente e de trincas por fadiga nos pavimentos rodoviários brasileiros deve-se, entre outros fatores, ao clima, ao aumento do volume de tráfego e à evolução tecnológica da modalidade rodoviária, que permite que caminhões trafeguem com maiores cargas por eixo e pressões de enchimento dos pneus.

Atualmente, existem no mercado diversos tipos de materiais geossintéticos utilizados em obras rodoviárias e geotécnicas, desempenhando funções como reforço de fundações e taludes, filtração, drenagem, proteção e separação entre materiais, impermeabilização e controle de erosões. Apesar de terem sido divulgados no Brasil em 1970, esses materiais começaram a ser difundidos e amplamente utilizados apenas na década de 1990 (COSTA et al., 2008).

Devido à camada de revestimento sofrer maior influência das cargas do tráfego, têm-se buscado materiais que forneçam incrementos na vida útil de tais revestimentos, atuando eficientemente como elementos de reforço. Destaca-se, por exemplo, o emprego de geossintéticos como camadas intermediárias em pavimentos (MORILHA JÚNIOR, 2004).

De acordo com Ante (2012), os geossintéticos podem atuar de duas maneiras em um revestimento: desviando as trincas que ocorrem na fibra inferior do revestimento ou convertendo essas trincas em microfissuras ao se propagarem. Ao

empregar geotêxteis impregnados com asfalto na interface, é necessária uma taxa maior de ligante asfáltico comparada à utilizada em uma pintura de ligação convencional.

As geogrelhas e os geotêxteis, nas obras de pavimentação, são aplicados como reforço estrutural do pavimento. Seja em obras de novos pavimentos ou obras de restauração de pavimentos já existentes, esses materiais são empregados com o objetivo de aumentar a resistência mecânica do conjunto, melhorar a impermeabilização do sistema e retardar a reflexão de trincas provenientes das camadas subjacentes. No que diz respeito à reabilitação de pavimentos e, mais especificamente, ao recapeamento de pavimentos deteriorados, a literatura sugere o uso de geotêxteis e geogrelhas na interface entre camadas, atuando como eficientes sistemas retardadores da reflexão de trincas (VANELSTRAETE e COURARD, 1997; MONTESTRUQUE, 2002; FIORIN, 2009; CORREIA, 2010).

O desempenho global do pavimento reforçado com geossintéticos é satisfatório devido à combinação de efeitos, tais como atraso do trincamento por reflexão, trincas refletidas de severidade atenuada e não bombeamento de finos da camada de base através das trincas refletidas. Outro efeito seria a manutenção da estanqueidade do revestimento, protegendo as camadas subjacentes da ação das águas pluviais e, dessa forma, mantendo a resistência da estrutura às deformações plásticas sob cargas repetidas (MONTESTRUQUE, 2002).

Em vista desse cenário, desenvolveu-se nesse trabalho uma análise dos parâmetros mecânicos derivados dos ensaios de Estabilidade *Marshall*, Resistência à Tração por Compressão Diametral, Módulo de Resiliência, Vida de Fadiga e *Creep* Estático. O propósito dessa pesquisa foi investigar o desempenho de um revestimento asfáltico reforçado com geossintético (geotêxtil), averiguando sua compatibilidade em relação às exigências dos projetos de pavimentação rodoviária. Acredita-se que o desenvolvimento desta pesquisa poderá contribuir para incrementar o banco de dados nacionais referentes ao reforço geossintético de revestimentos asfálticos.

3.2. MATERIAIS E MÉTODOS

3.2.1. Materiais

Os agregados minerais graúdos (brita 0 e brita 1) e miúdo (pó de pedra) que foram utilizados nesta pesquisa são de formação gnáissica e oriundos da pedreira Ervália Ltda., localizada no município de Ervália-MG. O ligante asfáltico empregado foi o CAP 50/70, oriundo da REGAP – Refinaria Gabriel Passos, localizada no município de Betim-MG. O material geossintético de reforço das misturas asfálticas investigadas foi fornecido por uma empresa nacional, correspondendo a um geotêxtil não-tecido. As características tecnológicas desse geossintético foram fornecidas pelo fabricante.

3.2.2. Métodos

3.2.2.1. Caracterização tecnológica dos materiais

Na Tabela 3.1, apresentam-se a identificação dos ensaios realizados sobre os materiais e as correspondentes normas adotadas. Os agregados foram coletados segundo os procedimentos prescritos pela norma técnica DNER PRO 120 (DNER, 1997b).

Tabela 3.1: Ensaios de caracterização realizados no programa experimental de pesquisa

Material	
Agregados minerais	Ligante asfáltico
Análise granulométrica dos agregados graúdos e miúdos - ME 083 (DNER, 1998c)	Massa específica real - ME 009 (DNER, 1998a)
Abrasão <i>Los Angeles</i> dos agregados graúdos - ME 035 (DNER, 1998b)	Pontos de fulgor e de combustão - ME 148 (DNER, 1994d)
Adesividade dos agregados graúdos ao ligante asfáltico - ME 078 (DNER, 1994a)	Viscosidade <i>Saybolt-Furol</i> - ME 004 (DNER, 1994e)
Absorção e massa específica dos agregados graúdos - ME 195 (DNER, 1997a)	pH - ME 149 (DNER, 1994f)
Massa específica e massa específica aparente do agregado miúdo - NBR NM 52 (ABNT, 2009)	Penetração - ME 155 (DNIT, 2010b)
Equivalente de areia - ME 054 (DNER, 1997c)	Solubilidade em tricloroetileno - NBR 14855 (ABNT, 2015)
Índice de forma dos agregados graúdos - ME 086 (DNER, 1994b)	Ponto de amolecimento - ME 131 (DNIT, 2010a)
Sanidade dos agregados graúdos - ME 089 (DNER, 1994c)	
Angularidade do agregado miúdo - C 1252 (ASTM, 2006)	
Partículas alongadas e achatadas - D 4791 (ASTM, 2010)	

3.2.2.2. Escolha da distribuição granulométrica de projeto para as faixas granulométricas B e C do DNIT

Foram utilizadas, nessa pesquisa, misturas asfálticas que se enquadraram nas faixas granulométricas “B” e “C”, conforme a especificação de serviço ES 031 (DNIT, 2006a) destinada aos concretos betuminosos usinados a quente (CBUQs). Para as referidas faixas, as curvas granulométricas de projeto foram escolhidas atendendo às especificações e limites impostos pela especificação de serviço mencionada, de acordo com o método de dosagem *Marshall*.

3.2.2.3. Dosagem experimental das misturas asfálticas

Os respectivos teores de ligante asfáltico de projeto correspondentes às misturas asfálticas de projeto das faixas granulométricas “B” e “C” foram determinados com base no critério Vv (Volume de vazios) – RBV (Relação Betume-Vazios), conforme os limites máximo e mínimo para tais parâmetros definidos pela especificação ES 031 (DNIT, 2006a).

3.2.2.4. Procedimento experimental das misturas asfálticas compostas

Os corpos de prova das misturas asfálticas foram confeccionados utilizando o ligante asfáltico à 165°C e os agregados à 175°C, ambos aquecidos em estufa. Para as misturas asfálticas compostas reforçadas, após a homogeneização dos materiais, as misturas foram colocadas nos moldes de compactação, sendo depositada, primeiramente, a mistura asfáltica correspondente à faixa “B”, equivalente ao *binder*, seguida da inserção do geotêxtil impregnado superiormente, e, por fim, a mistura asfáltica da faixa “C”, equivalente à capa asfáltica.

Na sequência, a mistura composta era submetida ao esforço de compactação, realizada à 140°C para garantir que o CAP apresentasse a viscosidade definida pela especificação de serviço ES 031 (DNIT, 2006a). Finalizada a compactação, o conjunto foi resfriado à temperatura ambiente, em uma superfície plana, por 24 horas, para posterior extração do corpo de prova compactado da mistura asfáltica composta reforçada.

Para a impregnação, foi utilizado o CAP 50/70, sendo adotado o teor de impregnação de 0,36 L/m² para a pintura de ligação, conforme recomendado pela ES 145 (DNIT, 2012). Este método de impregnação na face superior do geotêxtil foi escolhido pelo fato de representar a melhor configuração de impregnação analisada

para o geotêxtil, garantindo uma adequada resposta mecânica bem como incrementos de aderência mobilizada na interface reforço-camada superior do revestimento composto. A Figura 3.1 ilustra as etapas da compactação da mistura composta reforçada.

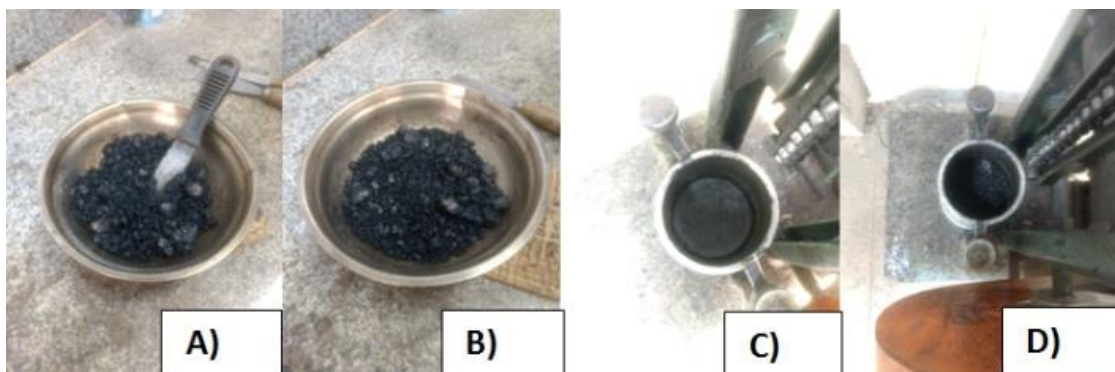


Figura 3.1: A) Mistura Faixa B; B) Mistura Faixa C; C) Mistura Faixa B + Geotêxtil com impregnação, D) Mistura Faixa B + Geotêxtil com impregnação + Mistura Faixa C

Para as misturas asfálticas compostas não reforçadas, foi adotado procedimento similar ao descrito anteriormente, excetuando, obviamente, as etapas correspondentes à inserção do reforço geossintético.

3.2.2.5. Ensaio mecânicos

Considerando-se os respectivos teores de ligante asfáltico de projeto definidos pelo método de dosagem *Marshall* para as misturas asfálticas de projeto das faixas granulométricas “B” e “C”, foram confeccionados corpos de prova de revestimentos asfálticos compostos, constituídos, simultaneamente, pelas respectivas misturas, sem e com reforço geossintético impregnado, segundo a configuração de impregnação prevista nessa pesquisa em que apenas a face superior do geotêxtil recebeu impregnação (Figura 3.2). Visando à determinação das propriedades mecânicas de interesse, foram realizados os seguintes ensaios conforme as respectivas prescrições normativas:

- Estabilidade *Marshall* - ME 043 (DNER, 1995);
- Módulo de Resiliência - ME 135 (DNIT, 2018a);
- Resistência à Tração por Compressão Diametral - ME 136 (DNIT, 2018b);
- Vida de Fadiga – ME 183 (DNIT, 2018c);
- *Creep* Estático - BS 598-111 (BSI, 1995).

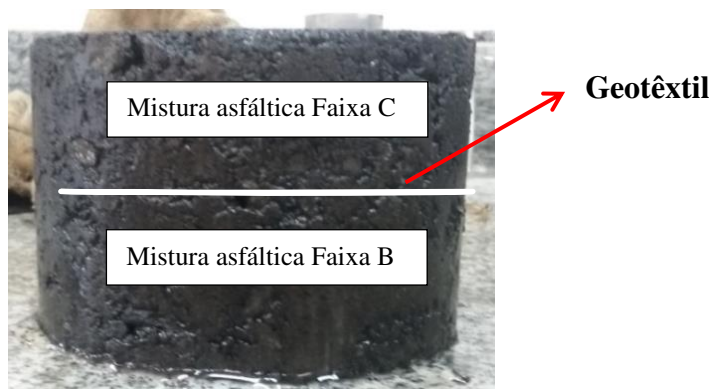


Figura 3.2: Esquema de corpo de prova moldado simultaneamente com as misturas asfálticas de projeto das duas faixas granulométricas (B e C) e com a inserção do reforço geossintético (geotêxtil).

3.3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.3.1. Caracterização dos materiais

Os resultados referentes à caracterização tecnológica dos agregados minerais estão apresentados na Tabela 3.2. A Tabela 3.3 apresenta os resultados obtidos referentes à caracterização tecnológica do ligante asfáltico, os quais estão em conformidade com a especificação EM 095 (DNIT, 2006b). As características tecnológicas do geotêxtil constam na Tabela 3.4.

Tabela 3.2: Resultados dos ensaios de caracterização dos agregados minerais

Propriedade	Magnitude		Pó de pedra
	Brita 0	Brita 1	
Abrasão <i>Los Angeles</i> (%)	45	45	-
Absorção (%)	1,14	1,14	-
Adesividade ao ligante betuminoso	Insatisfatória ⁽¹⁾	Insatisfatória ⁽¹⁾	-
Índice de forma	0,68	0,68	-
Massa específica real (g/cm ³)	2,794	2,794	2,794
Sanidade (%)	0,38	0,38	-
Equivalente de areia (%)	-	-	59
Angularidade	-	-	Classe subarredondada
Massa específica aparente (g/cm ³)	2,705	2,705	-
Partículas alongadas e achatadas	Classe Semialongada-Semicircular	Classe Semialongada-Semicircular	-

⁽¹⁾: satisfatória com 0,1%, em massa do ligante asfáltico, de aditivo Betudope.

Tabela 3.3: Resultados dos ensaios de caracterização do ligante asfáltico empregado

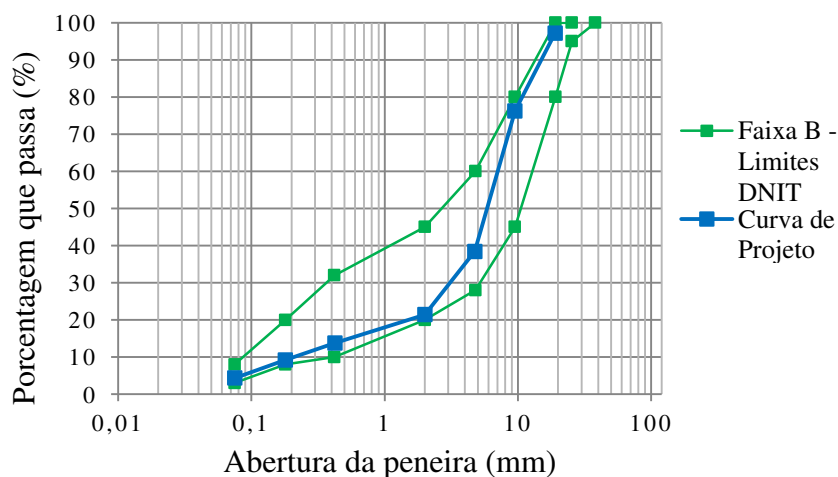
Propriedade	Magnitude
Penetração (dmm)	57
Massa específica real (g/cm ³)	1,010
Ponto de amolecimento (°C)	51
Densidade Relativa	1,006
Ponto de Fulgor (°C)	343
Ponto de combustão (°C)	365
Solubilidade no Tricloroetileno (%)	100
Viscosidade Saybolt-Furol	135°C – 172 segundos
	150°C – 64 segundos

Tabela 3.4: Principais características técnicas do geossintético empregado

Propriedade	Unidade	
Matéria-prima principal	-	Poliéster
Gramatura	g/m ²	150
Resistência à tração		
Longitudinal	kN/m	7
Transversal		8
Deformação na resistência à tração		
Longitudinal	%	>70
Transversal		>70
Resistência ao rasgo trapezoidal		
Longitudinal	kN/m	220
Transversal		200

3.3.2. Granulometrias de projeto

Foram utilizadas duas faixas granulométricas (B e C), simultaneamente, especificadas pela ES 031 (DNIT, 2006a). As Figuras 3.3 e 3.4 apresentam, respectivamente, para as faixas B e C, as granulometrias de projeto adotadas na pesquisa.

**Figura 3.3:** Granulometria de projeto correspondente à faixa B da ES 031.

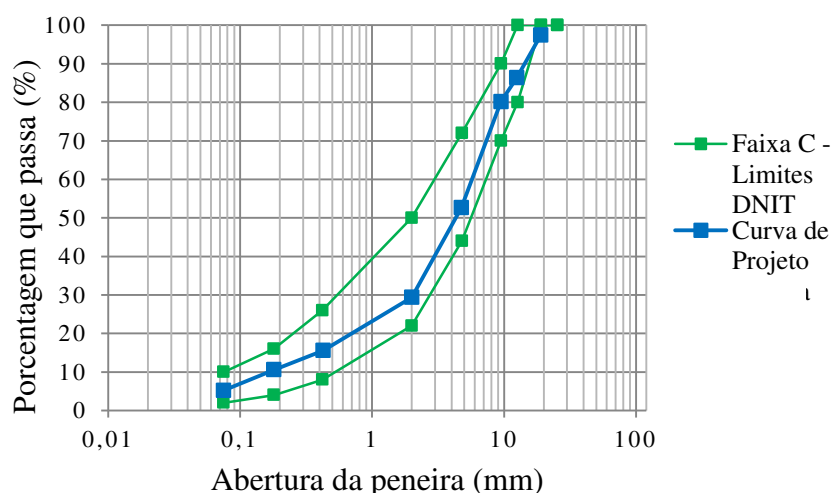


Figura 3.4: Granulometria de projeto correspondente à faixa C da ES 031.

3.3.3. Dosagem das misturas asfálticas de projeto

Após a verificação das respectivas curvas granulométricas de projeto, definiu-se, para cada uma delas, o teor de projeto de ligante asfáltico através do método de dosagem *Marshall*. As respectivas dosagens das misturas asfálticas consideradas nessa pesquisa, correspondentes às faixas B e C da especificação de serviço ES 031 (DNIT, 2006a), seguiram, rigorosamente, as exigências do método de dosagem *Marshall*.

Foram obtidos os teores de projeto de 4,2% e 4,7%, para as faixas B e C, respectivamente. Os teores de ligante asfáltico encontrados atenderam a todas as especificações estabelecidas pela ES 031 (DNIT, 2006a).

3.3.4. Ensaio mecânicos

Considerando-se a aplicação da dosagem e da compactação *Marshall*, foram realizados os ensaios mecânicos previstos no item 3.2.2.5 sobre as misturas asfálticas de projeto compostas não reforçadas e reforçadas por geotêxtil, cujos resultados são apresentados nas Figuras 3.5, 3.6 e 3.7.

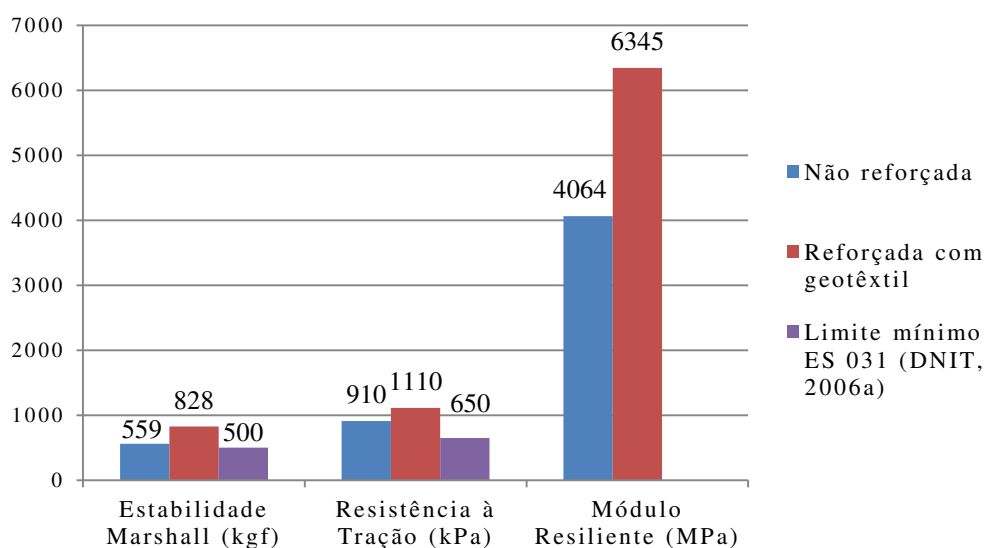


Figura 3.5: Valores médios das propriedades mecânicas estáticas (Resistência à Tração e Estabilidade *Marshall*) e dinâmica (Módulo de Resiliência) das misturas asfálticas pesquisadas

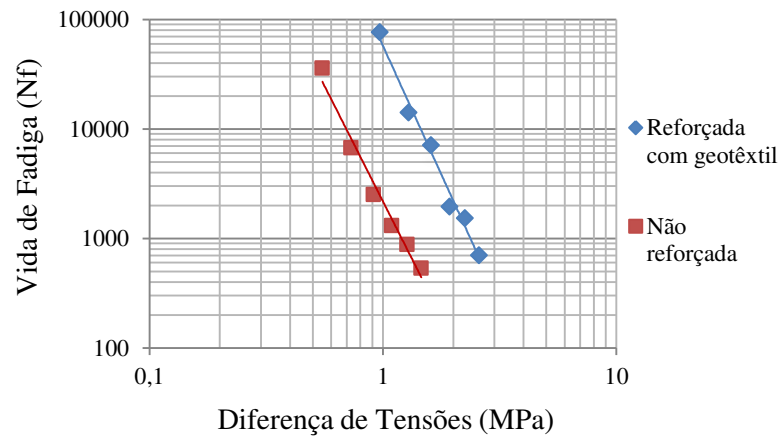
Para a Estabilidade *Marshall*, houve um incremento desta característica da mistura asfáltica promovido pelo reforço, sendo necessária, nesse caso, uma força de compressão maior para que ocorresse a perda de estabilidade do material, proporcionada pelo deslocamento ou quebra de agregados. De forma análoga, no ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral, foi necessária uma tensão de tração maior ao longo do plano diametral vertical do corpo de prova reforçado para que ocorresse a ruptura do material. Em ambos os casos, o acréscimo de resistência do elemento de reforço foi garantido provavelmente pelo grau de solidarização/aderência entre os elementos de interface das camadas estruturais “B” e “C”, implicando em acréscimos do desempenho estrutural do conjunto reforçado.

De maneira equivalente ao observado nas respostas mecânicas citadas anteriormente, Guimarães (2013) afirma que a macrotextura da superfície das misturas asfálticas tem influência direta na mobilização da aderência. A superfície rugosa do CBUQ permite adicional de aderência no contato entre as camadas, proporcionando eficiente intertravamento mecânico entre as camadas asfálticas e o reforço. Ainda nesse contexto, Mohammad et al. (2010) investigaram o efeito da rugosidade da superfície na interface de camadas asfálticas. Foi realizada uma correlação dos parâmetros de resistência e rugosidade em superfícies fresadas e não

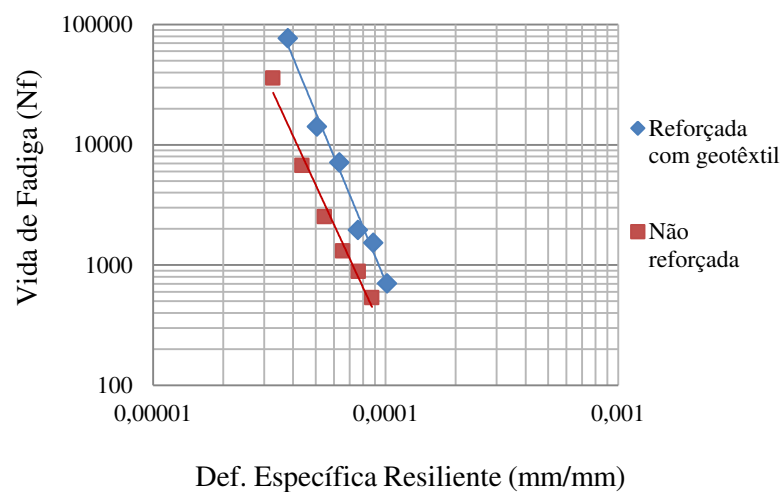
fresadas, obtendo valores de resistência superiores nas camadas que foram submetidas à fresagem.

No ensaio de Módulo de Resiliência (MR), o reforço conferiu à mistura asfáltica rápida recuperação elástica do material ao ser submetido à ação de cargas. Isso foi possível devido à capacidade do geotêxtil, aderido às camadas B e C, de mobilizar o incremento da rigidez elástica da mistura asfáltica para as condições de sollicitação impostas por esse ensaio.

De acordo com Ante (2016), seguindo a mesma perspectiva analisada nessa pesquisa, a presença do geossintético confere aos corpos de prova construídos em CBUQ um acréscimo de resistência posterior à ruptura da camada inferior do corpo de prova, permitindo níveis adicionais de deformação sem causar sua ruptura total.



(a)



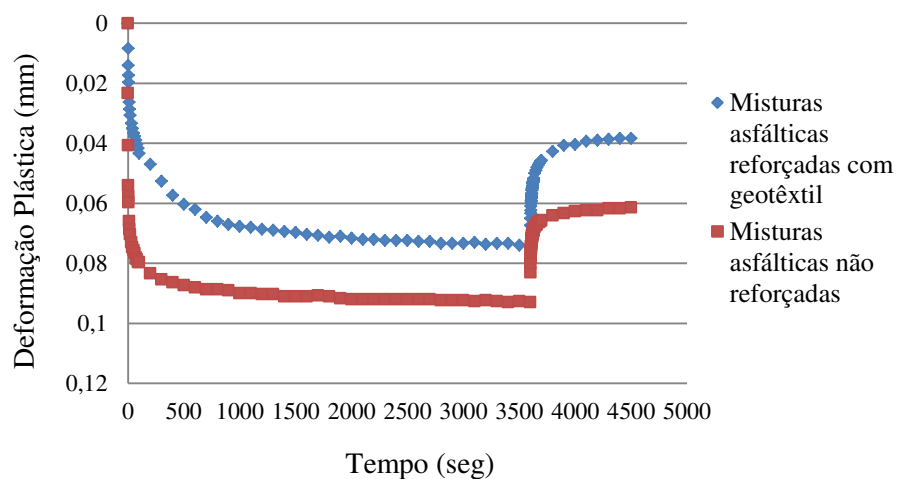
(b)

Figura 3.6: Curvas de Fadiga das misturas asfálticas pesquisadas: a) Vida de Fadiga (Nf) versus Diferença de tensões; b) Vida de Fadiga (Nf) versus Deformação específica resiliante na ruptura.

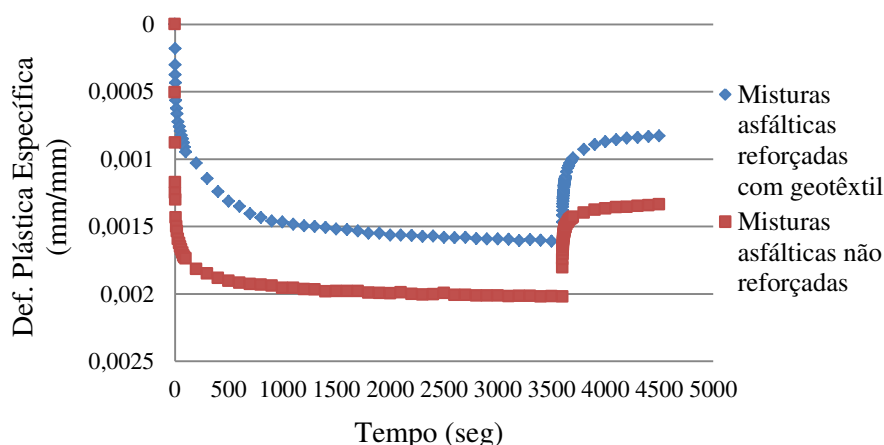
No ensaio de Vida de Fadiga, o reforço geossintético atuou de maneira a retardar os estágios existentes no processo de fadiga da mistura pesquisada, proporcionando uma redistribuição das tensões atuantes. A presença do geotêxtil permitiu acréscimos de rigidez e, conseqüentemente, do desempenho da amostra por meio da ligação íntima entre o reforço e as camadas asfálticas.

De maneira análoga ao observado anteriormente, segundo Fonseca (2015), a distribuição de tensões e, conseqüentemente, o comportamento da estrutura são alterados positivamente quando ocorre incremento nos níveis de aderência entre as camadas de misturas asfálticas do revestimento.

Nesse contexto, pressupõe-se que ocorreu similaridade entre os resultados dessa pesquisa e os observados por Ante (2016). De acordo com esse autor, a deformabilidade dos corpos de prova reforçados é de menor magnitude que a dos não reforçados, demandando um número de ciclos de carregamento maior para que ocorra a ruptura por fadiga dos mesmos. Ainda segundo esse autor, a trinca induzida na camada inferior se propaga de forma rápida até atingir o reforço, e, a partir desse momento, ocorrem mudanças na intensidade, na velocidade e na direção da evolução das trincas. Na camada superior do corpo de prova, a abertura e a intensidade das trincas são menores, ocorrendo também diminuição na velocidade de propagação das mesmas e mudança na direção de propagação, contornando as partículas graúdas.



(a)



(b)

Figura 3.7: Curvas de fluência (*Creep* estático) das misturas asfálticas pesquisadas: a) Deformação Plástica versus Tempo; b) Deformação Plástica Específica versus Tempo.

No ensaio de fluência, constatou-se que a atuação da carga de compressão estática ocasionou menores deslocamentos axiais permanentes nas misturas asfálticas reforçadas. Supõe-se que esse fato está intimamente ligado ao adicional de rigidez proporcionado pela inserção do elemento de reforço, verificado através do ensaio de Módulo de Resiliência. De maneira a comprovar o que foi observado nessa pesquisa, segundo NG (2013), misturas de menor rigidez, ou ainda flexíveis, estão propensas a maiores magnitudes de deformações permanentes.

Portanto, o principal parâmetro responsável pelo incremento no comportamento estrutural dos sistemas reforçados é a condição de aderência entre as camadas asfálticas e o elemento de reforço. A exumação do corpo de prova (Figura 3.8) evidencia o grau de solidarização/aderência entre os elementos dessa interface.



Figura 3.8: Ilustração da exumação de um corpo de prova composto contendo o geotêxtil como elemento de reforço.

3.4. CONCLUSÃO

Para as particularidades dessa pesquisa, observou-se:

- A capacidade do reforço geossintético de incrementar as propriedades mecânicas pesquisadas;
- O maior grau de solidarização/aderência entre o elemento de reforço e as camadas estruturais “B” e “C”, implicando em melhorias adicionais no desempenho estrutural do conjunto reforçado;
- Que o reforço conferiu à mistura asfáltica rápida recuperação elástica do material ao ser submetido à ação de cargas. Admite-se que esse fato esteja relacionado à capacidade do geotêxtil, aderido às camadas “B” e “C”, de mobilizar o incremento da rigidez elástica da mistura asfáltica para as condições de solicitação impostas às misturas asfálticas ensaiadas;
- Que a macrotextura da superfície das misturas asfálticas tem influência direta na mobilização da aderência. Dentro dessa perspectiva, a superfície rugosa do CBUQ permite acréscimos de aderência no contato entre as camadas, proporcionando eficiente intertravamento mecânico entre as camadas asfálticas e o reforço;
- Que os ganhos de resistência obtidos para os corpos de prova com a presença do reforço sugerem que a vida útil da mistura, em uma situação real de serviço, seria prolongada, com a absorção das tensões advindas do tráfego, até apresentar uma ruptura definitiva do revestimento. Os acréscimos evidenciados no desempenho da mistura asfáltica, devidos à presença do reforço, permitiriam realizar intervenções de manutenção e de reabilitação em intervalos de tempos maiores, obtendo-se, assim, pavimentos mais duráveis e com menores custos de manutenção.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR NM 52:**

Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro. 2009, 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 14855:**

Materiais betuminosos – Determinação da solubilidade em tricloroetileno. Rio de

- Janeiro. 2015, 5p.
- ANTE, J. R. O. **Geossintéticos como reforço de revestimentos em pavimentação**. Dissertação mestrado - Universidade de Brasília. Brasília – DF, 2012.
- ANTE, J. R. O. **Desempenho de misturas asfálticas reforçadas com geossintéticos**. Teses de doutorado - Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Brasília – DF, 2016.
- ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - **ASTM C 1252** – Standard test method for uncompacted void content of fine aggregate (as influenced by particle shape, surface texture and grading). USA. 2006, 5p.
- ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - **ASTM D 4791** – Standard test method for flat particles, elongated particles, or flat and elongated particles in coarse aggregate. USA. 2010, 6p.
- BASTOS, G. A. **Comportamento mecânico de misturas asfálticas reforçadas com Geogrelhas para pavimentos flexíveis**. Dissertação de mestrado, Publicação CDD: 624, Departamento de Engenharia Civil, PUC RJ, Rio de Janeiro, RJ, 2010, 247 P.
- BSI BS 598-111 **Sampling and examination of bituminous mixtures for roads and other paved areas**. Method for determination of resistance to permanent deformation of bituminous mixtures subject to unconfined uniaxial loading. British Standards Institution, London, United Kingdom. 1995, 10p.
- CORREIA, N. S. **Comportamento de Geotêxteis Não Tecidos Impregnados com Emulsão Asfáltica usados como Sistema Anti-reflexão de Trincas**. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo. São Carlos. 2010, 131 p.
- COSTA, C. M. L.; LODI, P. C.; COSTA, Y. D. J.; BUENO, B. S. Avaliação de Recomendações Normativas sobre o Uso de Ensaio no Controle de Qualidade de Fabricação de Geossintéticos. **Revista Polímeros: Ciência e Tecnologia**, vol. 18, nº 2, p. 158-169, 2008.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **ME 078**: Agregado graúdo – adesividade a ligante betuminoso: método de ensaio. Rio de Janeiro, 1994a, 3p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **ME 086**: Agregado: determinação do índice de forma. Rio de Janeiro, 1994b, 5p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **ME**

- 089:** Agregados: avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio. Rio de Janeiro, 1994c, 6p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **ME**
- 148:** Material betuminoso – determinação dos pontos de fulgor e de combustão (vaso aberto de Cleveland). Rio de Janeiro, 1994d, 2p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **ME**
- 004:** Material betuminoso – determinação da viscosidade Saybolt-Furol a alta temperatura - método da película delgada. Rio de Janeiro, 1994e, 2p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **ME**
- 149:** Emulsões asfálticas – determinação do pH. Rio de Janeiro, 1994f, 2p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **ME**
- 043:** Misturas betuminosas a quente – ensaio *Marshall*. Rio de Janeiro, 1995, 11p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **ME**
- 195:** Agregados – determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo. Rio de Janeiro, 1997a, 6p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **PRO**
- 120:** Procedimento: coleta de amostra de agregado. [S.l.]. Rio de Janeiro, 1997b, 7p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **ME**
- 054:** Equivalente de areia. Rio de Janeiro, 1997c, 6p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **ME**
- 009:** Petróleo e derivados – determinação da densidade – método do densímetro. Rio de Janeiro, 1998a, 7p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **ME**
- 035:** Agregados – determinação da abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro, 1998b, 6p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **ME**
- 083:** Agregados – análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1998c, 5p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **ES 031:** Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de serviço. Rio de Janeiro. 2006a, 14p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **EM 095:** Cimentos asfálticos de petróleo – Especificação de material. Rio

- de Janeiro. 2006b, 6p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES –
DNIT. **ME 131:** Materiais asfálticos - determinação do ponto de amolecimento-
método do anel e bola. Rio de Janeiro. 2010a, 6p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES –
DNIT. **ME 155:** Material asfáltico – Determinação da penetração – Método de
ensaio. Rio de Janeiro. 2010b, 7p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES –
DNIT. **ES 145:** Pavimentação – Pintura de ligação com ligante asfáltico –
Especificação de serviço. Rio de Janeiro. 2012, 7p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES –
DNIT. **ME 135:** Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas - Determinação do
módulo de resiliência: método de ensaio. Rio de Janeiro. 2018a, 13p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES –
DNIT. **ME 136:** Determinação da resistência à tração por compressão diametral –
Método de ensaio. Rio de Janeiro. 2018b, 9p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES –
DNIT. **ME 183:** Pavimentação asfáltica – Ensaio de Fadiga por compressão
diametral à tensão controlada - método de ensaio. Rio de Janeiro. 2018c, 15p.
- FIORIN, M. M. **Avaliação de Desempenho de Recapeamentos Asfálticos com
camada Intermediária de Geotêxtil Submetidos à solicitação por simulador
de tráfego.** Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul,
Porto Alegre, 2009, 106 p.
- FONSECA, L. L. **Avaliação em laboratório do comportamento de camadas
asfálticas reforçadas com geossintético.** Dissertação Mestrado - Universidade
Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.
- GOUVEIA, L. T. **Contribuições ao Estudo da Influência de Propriedades de
Agregados no Comportamento de Misturas Asfálticas Densas.** Dissertação
(Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo,
São Carlos, SP, Brasil, 2006.
- GUIMARÃES, P. A. **Estudo da aderência entre camadas asfálticas de
pavimentos.** Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São
Paulo, São Paulo - SP. 189 p. 2013.

- HUANG, Y. H. **Pavement Analysis and Design**. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 1993.
- IPEA **Rodovias Brasileiras: Gargalos, Investimentos, Concessões e preocupações com o futuro, Série Eixos do Desenvolvimento Brasileiro**, comunicados do IPEA nº 52, Brasília, DF, 1 – 20 p, 2010.
- MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos pavimentos**. 3ª ed. Rio de Janeiro: Interciência. 2015, 638p.
- MOHAMMAD, L. N.; BAE, A.; ELSEIFI, M. A.; BUTTON, J.; PATEL, N. Effectes of pavement surfasse type and sample peparation method on tack coat interface shear strenght. Transportation Research Record: **Journal of the Transportation Research Board**, nº 2180, pp 93-101, Washington, 2010.
- MONTESTRUQUE, G. **Contribuição para a Elaboração de Método de Projeto de Restauração de Pavimentos Asfálticos utilizando Geossintéticos em Sistemas Anti-reflexão de Trincas**. Tese (Doutorado) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São José dos Campos-SP, 2002, 138p.
- MORILHA JÚNIOR, A. **Estudo sobre a ação de modificadores no envelhecimento dos ligantes asfálticos e nas propriedades mecânicas e de fadiga das misturas asfálticas**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. UFSC, 2004.
- NG, A. K. Y. **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. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, SP. 2013, 148p.
- VANELSTRAETE, A. H. de Bondt, COURARD, L. **Prevention of Reflective Cracking in Pavements**. RILEM (Research Laboratories for Materials and Structures), Report 18. Edited by A. Vanelstraete and L. Francken. Belgian Road Research Centre, Brussels, Belgium, 1997.

CAPÍTULO 4

ANÁLISE ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS REFORÇADOS COM GEOTÊXTIL

RESUMO

Tendo em vista que os recursos financeiros para a construção e manutenção de pavimentos estão cada vez mais limitados, tem-se a necessidade de empregar métodos de cálculos mais precisos e realistas em detrimento de métodos empíricos. A análise empírico-mecanística de pavimentos consiste em calcular as respostas estruturais (tensões, deformações e deslocamentos) do pavimento devido às cargas do tráfego e verificar o número de solicitações que levam à sua falha estrutural. Diante disso, analisou-se, nessa pesquisa, o comportamento estrutural de misturas asfálticas a quente compostas reforçadas e não reforçadas com geotêxtil impregnado. Estas misturas foram dosadas pelo método *Marshall*, empregando-se o ligante asfáltico CAP 50/70 para a mistura e a impregnação. As faixas granulométricas “B” e “C” da especificação ES 031 do DNIT foram destinadas a compor a camada de revestimento asfáltico, simultaneamente. Neste estudo, a sensibilidade estrutural das misturas asfálticas analisadas, diante de propriedades mecânicas de interesse pré-determinadas, foi avaliada por meio do software *me-PADS* (*Mechanistic Empirical Pavement Analysis and Design Software*). Essa análise teve como objetivo quantificar o eventual efeito dessas propriedades mecânicas sobre o desempenho estrutural do pavimento proposto nessa pesquisa. Foi admitido um modelo estrutural com quatro camadas: revestimento, base, reforço do subleito e subleito. Cada combinação estrutural foi solicitada por um eixo simples de rodas duplas (ESRD), variando-se o carregamento (80 kN, 98 kN e 118 kN) e também os níveis de pressão de enchimento dos pneus (563 kPa, 633 kPa e 703 kPa). Uma análise de todos os dados no software *me-PADS* demonstrou que a inserção do elemento de reforço no revestimento asfáltico proporcionou acréscimos de rigidez à camada asfáltica, trazendo como consequência menores magnitudes de deflexões na superfície da camada, maior capacidade de suporte a cargas repetidas (maior vida de fadiga), porém propiciando altas tensões horizontais de tração concentradas em suas fibras

inferiores. Os resultados realçam o potencial técnico da mistura asfáltica reforçada em suprir as necessidades estruturais da camada de revestimento asfáltico, para determinados carregamentos, em face às solicitações impostas pelo tráfego, e em prolongar o período de vida útil do pavimento asfáltico.

PALAVRAS-CHAVE: Geotêxtil, Reforço geossintético, Misturas asfálticas a quente compostas, Análise estrutural.

ABSTRACT

The financial resources for the construction and maintenance of pavements are increasingly limited. In view of this, there is a need to use more accurate and realistic calculation methods instead of empirical methods. The empirical-mechanistic analysis of pavements consists of calculating the structural responses (stress, deformations, and displacements) of the pavement due to the traffic loads and verify the number of solicitations that lead to its structural failure. In this research, the structural behavior of reinforced asphalt mixtures and non-reinforced with impregnated geotextile was analyzed. These mixtures were dosed by the Marshall method, using the CAP 50/70 asphalt binder for the asphalt mixture and the impregnation. The grading envelopes "B" and "C" of the ES 031 specification of the DNIT were designed to compose the asphalt wearing course layer, simultaneously (asphalt layer and binder course, respectively). The structural sensitivity of the asphalt mixtures analyzed, considering previously determined mechanical properties of interest, was evaluated through the me-PADS (Mechanistic-Empirical Pavement Analysis and Design Software) software. This analysis had a purpose to quantify the possible effect of these mechanical properties on the structural performance of the pavement proposed in this research. an A structural model with four layers was used: wearing course, base, subgrade reinforcement, and subgrade. Each structural combination was requested by a dual wheel single-axle (DWSA), varying the loading (80 kN, 98 kN, and 118 kN) and also the filling pressure levels of the tires (563 kPa, 633 kPa, and 703 kPa). After the structural analysis of all the data of interest in the me-PADS software, it was verified that the insertion of the reinforcement element in the asphalt wearing course provided greater stiffness in the asphalt layer, resulting in lower deflections in the layer, greater capacity to support repeated load (greater

Fatigue Life), but caused high horizontal stresses concentrated on its lower fibers. The results demonstrate the technical potential of the reinforced asphalt mixtures in meeting the structural requirements of the asphalt wearing course layer of the demands imposed by the traffic and increasing the useful life of the asphalt pavement.

KEYWORDS: Geotextile, Geosynthetic reinforcement, Composite hot asphalt mixtures, Mechanical tests.

4.1. INTRODUÇÃO

O surgimento de trincas nos revestimentos asfálticos constitui a patologia estrutural mais comum nos pavimentos flexíveis. Geralmente, esses danos são causados pelo fenômeno de fadiga, ou seja, devido às ações repetidas de esforços de tração por flexão nessa camada. Tais trincas configuram-se no primeiro sinal de redução da qualidade estrutural do pavimento (FONTES, 2009).

Segundo Pinto (1991) e Balbo (2007), o fenômeno da fadiga é um processo de deterioração estrutural sofrido por vários materiais e que ocorre quando pavimentos são submetidos a um estado de tensões e de deformações elásticas repetidas inferiores àquelas de ruptura. Após um número suficiente de repetições do carregamento nesses materiais, desenvolvem-se alterações em sua estrutura interna, conduzindo-os a processos de trincamento ou fratura completa. Trata-se, portanto, da perda de resistência sofrida pelo material quando solicitado repetidamente por uma carga, ocasionando a perda de suas características estruturais originais. Diante disso, tem-se um processo de microfissuração progressiva, acarretando no desenvolvimento de fraturas e, portanto, no rompimento do material.

Conforme Carmo et al. (2015), o desenvolvimento dos geossintéticos tem fomentado a utilização desses materiais para fins de reforço de pavimentos asfálticos novos e restaurados. Isto se deve a sua capacidade de proporcionar uma elevada resistência à tração dentro do revestimento asfáltico, complementando as propriedades mecânicas da mistura asfáltica. Portanto, tais materiais permitem um maior controle do trincamento no pavimento, o que é fundamental para os bons desempenhos funcional e estrutural do mesmo, assim como para a eficiência econômica da sua restauração.

A introdução dos geossintéticos como camadas intermediárias em pavimentos deveu-se, principalmente, ao desempenho inadequado dos materiais tradicionais expostos ao crescente aumento das cargas do tráfego nas rodovias, nas décadas de 50 e 60 do século XX. A acelerada deterioração das rodovias apontou a necessidade de métodos mais eficazes de reabilitação de pavimentos (AL-QADI, 2009).

Sabe-se que existe um conhecimento acumulado ao longo dos anos em relação à utilização de geossintéticos a fim de minimizar trincas de fadiga e de reflexão em revestimentos asfálticos. Apesar disso, a maioria dos empregos dessa técnica não correlaciona os benefícios estruturais da inclusão do geossintético no revestimento diante da melhora do desempenho estrutural do pavimento (CORREIA e ZORNBERG, 2015). Atualmente, na especificação técnica de restauração de pavimentos com geossintéticos ET-DE-P00/43 (DNER, 2006c), não existe um protocolo de projeto estabelecido para seu emprego ou um consenso para os métodos e materiais empregados na construção.

Vilchez (2002) assegura que os geossintéticos utilizados como camadas intermediárias em revestimentos têm efeitos e atuação distintos, de acordo com suas características. As geogrelhas atuam como armadura no concreto asfáltico, impedindo ou inibindo a reflexão de uma trinca única. Essas promovem a dissipação de energia da trinca de reflexão, originando microfissuras de menores severidades e velocidades de propagação, gerando uma distribuição indefinida de trincas.

Ainda segundo esse autor, esse comportamento peculiar às geogrelhas é diferente no caso dos geotêxteis, cujo efeito principal é o de retardar a reflexão do trincamento, direcionando a trinca para a horizontal. Outra característica relevante dos geotêxteis seria sua capacidade de promover a estanqueidade do pavimento, com melhoria das características de impermeabilidade, evitando eventual ocorrência de bombeamento de finos.

A partir da década de 1970, foram desenvolvidos muitos sistemas de análise empírico-mecânica de pavimentos. Essas análises constituem-se de dimensionamentos por verificação, em que são calculadas tensões e deformações em pontos notáveis de uma estrutura multicamadas. Diante disso, são efetuadas comparações entre os valores obtidos pelo software com as tensões e as deformações admissíveis para pavimentos asfálticos e de concreto. Essa análise de

tensões e deformações em pavimentos rodoviários leva em consideração o comportamento elástico linear dos materiais componentes das camadas a serem dimensionadas (DAROUS, 2003; MOTTA, 1991).

Estudos recentes vêm sendo desenvolvidos com o emprego de métodos empírico-mecanísticos para o dimensionamento de pavimentos. A base mecanicista emprega métodos de cálculos mais precisos e realistas em relação ao método empírico, permitindo definir as respostas estruturais do pavimento (tensão, deformação e deslocamento) de modo a promover uma análise do seu desempenho (FERNANDES JÚNIOR et. al, 2007; FONTENELE, 2011).

De acordo com Cezaro (2008), o dimensionamento de um pavimento por meio de um método empírico-mecanístico necessita, dentre outros fatores, considerar parâmetros de entrada (parâmetros de deformabilidade dos materiais, fatores ambientais, tráfego, dentre outros) e critérios de aceitação (vida de fadiga e afundamento de trilha de roda). Em vista disso, a caracterização mecânica dos materiais é fundamental para que o pavimento tenha o desempenho almejado ao longo da sua vida de serviço. Neste contexto, os ensaios dinâmicos ou de cargas repetidas, que procuram simular as condições reais de tráfego, revelam-se como ferramentas relevantes na caracterização dos materiais de pavimentação.

Nesse contexto, o propósito desse trabalho foi desenvolver uma análise da resposta estrutural de um pavimento-tipo, utilizando como ferramenta o software empírico-mecanístico *me-PADS*. Para essa análise, foi necessário o emprego de propriedades mecânicas de interesse pré-determinadas para as misturas asfálticas reforçadas e não reforçadas com geotêxtil.

Assim sendo, quantificou-se a resposta estrutural desse pavimento-tipo considerando a eventual influência da variação da condição de reforço (reforçado e não reforçado) do revestimento asfáltico proposto sob condições específicas de carregamento devido ao tráfego. Foram verificadas, particularmente, as tensões horizontais de tração e verticais de compressão no bordo inferior da camada de *binder* e as deflexões recuperáveis no topo do revestimento asfáltico, considerando pontos de análise no eixo vertical sob as rodas e no eixo vertical de simetria entre as rodas.

4.2. MATERIAIS E MÉTODOS

4.2.1. Materiais utilizados

Os agregados minerais graúdos (brita 0 e brita 1) e miúdo (pó de pedra) que foram utilizados nesta pesquisa são de formação gnáissica e oriundos da pedreira Ervália Ltda., localizada no município de Ervália-MG. O ligante asfáltico empregado foi o CAP 50/70, oriundo da REGAP–Refinaria Gabriel Passos, localizada no município de Betim-MG. O material geossintético de reforço das misturas asfálticas investigadas foi fornecido por uma empresa nacional, correspondendo a um geotêxtil não-tecido. As características tecnológicas desse geossintéticos foram fornecidas pelo fabricante.

4.2.2. Métodos

4.2.2.1. Caracterização tecnológica dos materiais

Na Tabela 4.1, apresentam-se a identificação dos ensaios realizados sobre os materiais e as correspondentes normas adotadas. Os agregados foram coletados segundo os procedimentos prescritos pela norma DNER PRO 120 (DNER, 1997b).

Tabela 4.1: Ensaios de caracterização realizados no programa experimental de pesquisa

Material	
Agregados minerais	Ligante asfáltico
Análise granulométrica dos agregados graúdos e miúdos - ME 083 (DNER, 1998c)	Massa específica real - ME 009 (DNER, 1998a)
Abrasão <i>Los Angeles</i> dos agregados graúdos - ME 035 (DNER, 1998b)	Pontos de fulgor e de combustão - ME 148 (DNER, 1994d)
Adesividade dos agregados graúdos ao ligante asfáltico - ME 078 (DNER, 1994a)	Viscosidade <i>Saybolt-Furol</i> - ME 004 (DNER, 1994e)
Absorção e massa específica dos agregados graúdos - ME 195 (DNER, 1997a)	pH - ME 149 (DNER, 1994f)
Massa específica e massa específica aparente do agregado miúdo - NBR NM 52 (ABNT, 2009)	Penetração - ME 155 (DNIT, 2010b)
Equivalente de areia - ME 054 (DNER, 1997c)	Solubilidade em tricloroetileno - NBR 14855 (ABNT, 2015)
Índice de forma dos agregados graúdos - ME 086 (DNER, 1994b)	Ponto de amolecimento - ME 131 (DNIT, 2010a)
Sanidade dos agregados graúdos - ME 089 (DNER, 1994c)	
Angularidade do agregado miúdo - C 1252 (ASTM, 2006)	
Partículas alongadas e achatadas - D 4791 (ASTM, 2010)	

4.2.2.2. Escolha da distribuição granulométrica de projeto para as faixas granulométricas B e C do DNIT

Foram utilizadas, nessa pesquisa, misturas asfálticas que se enquadraram nas faixas granulométricas “B” e “C”, conforme a especificação de serviço ES 031 (DNIT, 2006a) destinada aos concretos betuminosos usinados a quente (CBUQs). Para as referidas faixas, as curvas granulométricas de projeto foram escolhidas atendendo às especificações e limites impostos pela especificação de serviço mencionada, de acordo com o método de dosagem *Marshall*, obedecendo ao método de ensaio ME-043 (DNER, 1995).

4.2.2.3. Dosagem experimental das misturas asfálticas

Os respectivos teores de ligante asfáltico de projeto correspondentes às misturas asfálticas de projeto das faixas granulométricas “B” e “C” foram determinados com base no critério Vv (Volume de vazios) – RBV (Relação Betume-Vazios), conforme os limites máximo e mínimo para tais parâmetros definidos pela especificação ES 031 (DNIT, 2006a).

4.2.2.4. Procedimento experimental das misturas asfálticas compostas

Os corpos de prova das misturas asfálticas foram confeccionados utilizando o ligante asfáltico à 165°C e os agregados à 175 °C, ambos aquecidos em estufa. Para as misturas asfálticas compostas reforçadas, após a homogeneização dos materiais, as misturas foram colocadas nos moldes de compactação, sendo depositada, primeiramente, a mistura asfáltica correspondente à faixa “B”, equivalente ao *binder*, seguida da inserção do geotêxtil impregnado superiormente, e, por fim, a mistura asfáltica da faixa “C”, equivalente à capa asfáltica.

Na sequência, a mistura composta era submetida ao esforço de compactação, a qual foi feita à 140°C para garantir que o CAP apresentasse a viscosidade definida pela especificação de serviço ES 031 (DNIT, 2006a). Finalizada a compactação, o conjunto foi resfriado à temperatura ambiente, em uma superfície plana, por 24 horas, para posterior extração do corpo de prova compactado da mistura asfáltica composta reforçada.

Para a impregnação, foi utilizado o CAP 50/70, sendo adotado o teor de impregnação de 0,36 L/m² para a pintura de ligação, obedecendo ao recomendado pela ES 145 (DNIT, 2012). Este método de impregnação na face superior do

geotêxtil foi escolhido pelo fato de representar a melhor configuração de impregnação analisada para o geotêxtil, garantindo uma adequada resposta mecânica bem como uma satisfatória aderência mobilizada na interface reforço-camada superior do revestimento composto. A Figura 4.1 ilustra as etapas da compactação da mistura composta reforçada.

Para as misturas asfálticas compostas não reforçadas, foi adotado procedimento similar ao descrito anteriormente, excetuando, obviamente, as etapas correspondentes à inserção do reforço geossintético.

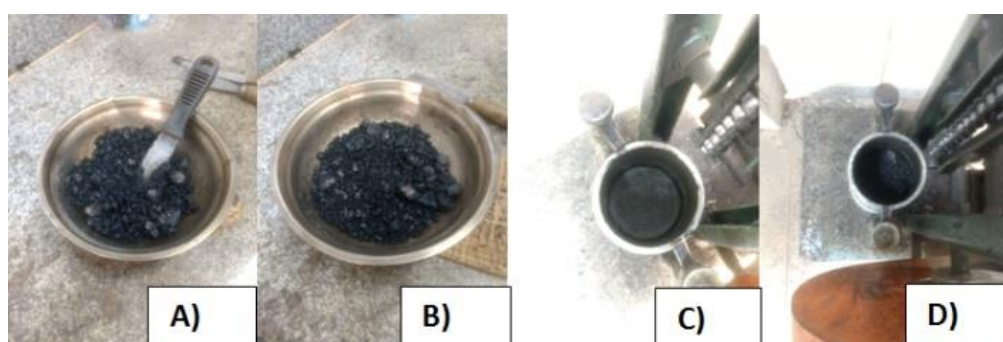


Figura 4.1: A) Mistura Faixa B; B) Mistura Faixa C; C) Mistura Faixa B + Geotêxtil com impregnação, D) Mistura Faixa B + Geotêxtil com impregnação + Mistura Faixa C

4.2.2.5. Ensaios mecânicos

Visando avaliar a sensibilidade estrutural das misturas asfálticas analisadas diante do elemento de reforço inserido, foram determinadas propriedades mecânicas de interesse de modo a quantificar o eventual efeito destas sobre o desempenho estrutural do pavimento adotado. Para isso, foram confeccionados corpos de prova de revestimentos asfálticos compostos reforçados (Figura 4.2) e não reforçados, constituídos, simultaneamente, pelas misturas asfálticas faixas “B” e “C” (*binder* e capa asfáltica, respectivamente), considerando-se os respectivos teores de ligante asfáltico de projeto definidos pelo método de dosagem *Marshall* para ambas as faixas granulométricas.

Foram realizados os seguintes ensaios conforme as respectivas prescrições normativas:

- Módulo de Resiliência - ME 135 (DNIT, 2018a);
- Resistência à Tração por Compressão Diametral - ME 136 (DNIT, 2018b);

- Vida de Fadiga – ME 183 (DNIT, 2018c).

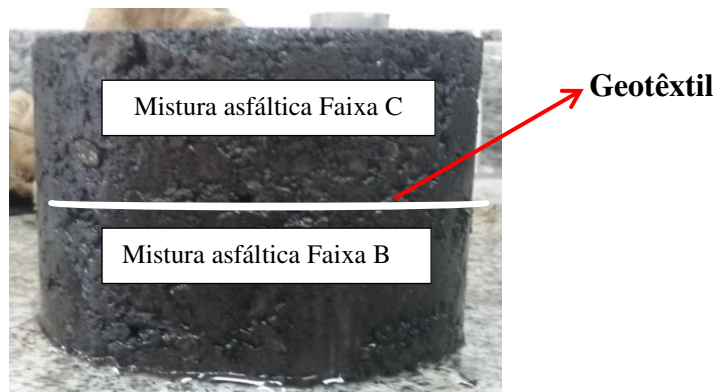


Figura 4.2: Esquema de corpo de prova moldado simultaneamente com as misturas asfálticas de projeto das duas faixas granulométricas (B e C) e com a inserção do reforço geossintético (geotêxtil).

4.2.2.6. Análise estrutural do pavimento-tipo

No que se refere à análise estrutural do pavimento, foram considerados três níveis de carregamento e de pressão de enchimento dos pneus. Essa análise, feita através do software *me-PADS*, foi realizada para uma estrutura pré-dimensionada empiricamente. Adotou-se um pavimento constituído de revestimento asfáltico composto (capa asfáltica e *binder*, simultaneamente), reforçado ou não reforçado, base e reforço do subleito, assentado sobre o subleito.

Os dados de entrada empregados nesse software foram as propriedades das camadas estruturais (espessura, módulo de elasticidade e coeficiente de *Poisson*), a localização e a magnitude das cargas e as coordenadas dos pontos para a determinação das respostas estruturais do pavimento-tipo adotado.

Em relação aos dados de saída, objeto de estudo dessa pesquisa, tem-se que o processamento dos dados de entrada resulta, para cada camada, na determinação de tensões horizontais, tensões verticais e deflexões recuperáveis.

A fim de se realizar uma análise elástica linear do pavimento tipo, considerou-se o Módulo de Resiliência (MR) igual ao Módulo de Elasticidade (E) para os dados de entrada referentes às camadas do pavimento adotado. De acordo com Ponte et al. (2014), quando há a impossibilidade de determinação do coeficiente de *Poisson* (ν), recomenda-se empregar o valor de $\nu=0,30$, sendo o mesmo mantido constante para as camadas asfálticas e granular (base) em todas as análises efetuadas.

Os níveis de carregamento considerados na presente pesquisa foram:

- Q_1 igual a 80 kN (8,2 tf): carga correspondente ao eixo padrão de 18.000 lb;
- Q_2 igual a 98 kN (10,0 tf): carga máxima permitida pela legislação brasileira para eixo simples de rodas duplas (ESRD);
- Q_3 igual a 118 kN (12,0 tf): carga 20% acima da máxima permitida pela referida legislação, sendo 10% o limite de tolerância legal. O emprego dessa carga teve como objetivo evidenciar os eventuais danos nas estradas causados pelo excesso de carga nos eixos dos veículos comerciais.

Foram utilizados três níveis correspondentes de pressão de enchimento dos pneus, sendo eles:

- P_1 igual a 563 kPa (80 psi): pressão-padrão utilizada na pista experimental da AASHTO e normalizada para a determinação da deflexão, conforme o método de ensaio ME 024 (DNER, 1994g);
- P_2 igual a 633 kPa (90 psi): pressão representativa de um valor médio;
- P_3 igual a 703 kPa (100 psi): pressão representativa de um valor alto.

Em relação às características dos materiais utilizados nas camadas do pavimento-tipo proposto, foram adotados os dados do estudo de Carmo (1998) para o subleito e reforço do subleito. No que diz respeito à camada de base, foram adotados os parâmetros do estudo de Ponte et al. (2014). A Figura 4.3 ilustra o pavimento-tipo empregado na análise das tensões e deformações do revestimento asfáltico adotado na pesquisa.

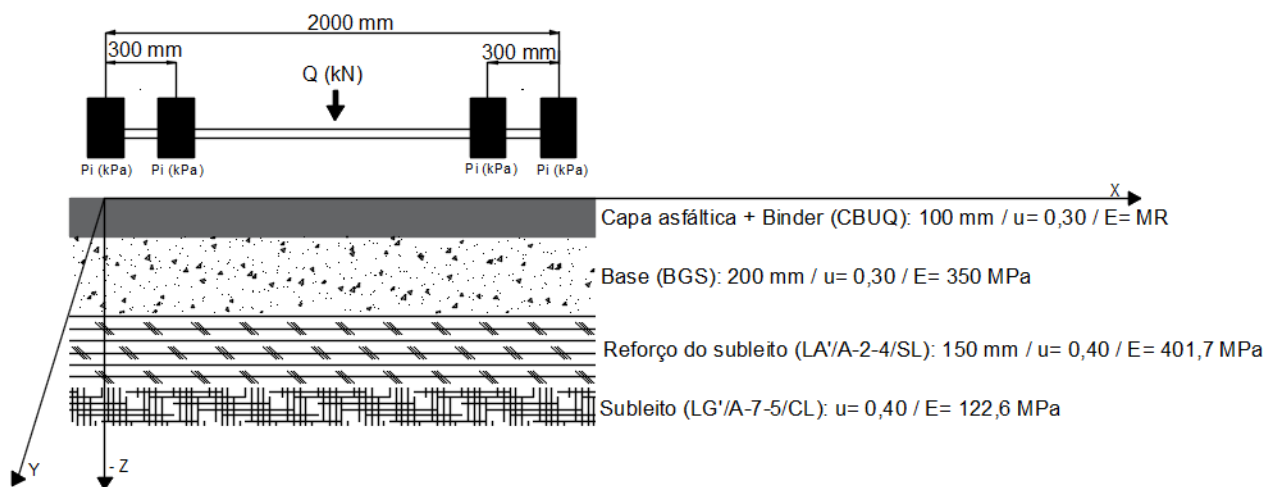


Figura 4.3: Esquema da seção transversal do pavimento-tipo adotado nas análises estruturais.

4.3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.3.1. Considerações iniciais

Neste item, são apresentadas a caracterização dos materiais constituintes da camada asfáltica, as granulometrias de projeto, as dosagens para ambas as faixas que compõem, simultaneamente, o revestimento proposto na pesquisa, os resultados dos ensaios mecânicos necessários ao estudo da resposta estrutural do pavimento-tipo e, por fim, os resultados da análise estrutural do pavimento-tipo adotado, variando-se as propriedades dos revestimentos asfálticos em função da condição de reforço, para cada uma das condições de carregamento previamente definidas.

4.3.2. Caracterização dos materiais

Os resultados referentes à caracterização tecnológica dos agregados minerais estão apresentados na Tabela 4.2. A Tabela 4.3 apresenta os resultados obtidos referentes à caracterização tecnológica do ligante asfáltico, os quais estão em conformidade com a especificação EM 095 (DNIT, 2006b). As características tecnológicas do geotêxtil constam na Tabela 4.4.

Tabela 4.2: Resultados dos ensaios de caracterização dos agregados minerais

Propriedade	Magnitude		
	Brita 0	Brita 1	Pó de pedra
Abrasão <i>Los Angeles</i> (%)	45	45	-
Absorção (%)	1,14	1,14	-
Adesividade ao ligante betuminoso	Insatisfatória ⁽¹⁾	Insatisfatória ⁽¹⁾	-
Índice de forma	0,68	0,68	-
Massa específica real (g/cm ³)	2,794	2,794	2,794
Sanidade (%)	0,38	0,38	-
Equivalente de areia (%)	-	-	59
Angularidade	-	-	Classe subarredondada
Massa específica aparente (g/cm ³)	2,705	2,705	-
Partículas alongadas e achatadas	Classe Semialongada-Semicircular	Classe Semialongada-Semicircular	-

⁽¹⁾: satisfatória com 0,1%, em massa do ligante asfáltico, de aditivo Betudope.

Tabela 4.3: Resultados dos ensaios de caracterização do ligante asfáltico empregado

Propriedade	Magnitude
Penetração (dmm)	57
Massa específica real (g/cm ³)	1,010
Ponto de amolecimento (°C)	51
Densidade Relativa	1,006
Ponto de Fulgor (°C)	343
Ponto de combustão (°C)	365
Solubilidade no Tricloroetileno (%)	100
Viscosidade Saybolt-Furol	135°C – 172 segundos
	150°C – 64 segundos

Tabela 4.4: Principais características técnicas do geossintético empregado na pesquisa

Propriedade	Unidade	
Matéria-prima principal	-	Poliéster
Gramatura	g/m ²	150
Resistência à tração		
Longitudinal	kN/m	7
Transversal		8
Deformação na resistência à tração		
Longitudinal	%	>70
Transversal		>70
Resistência ao rasgo trapezoidal		
Longitudinal	kN/m	220
Transversal		200

4.3.3. Granulometrias de projeto

Foram utilizadas nessa pesquisa misturas asfálticas de projeto que se enquadraram nas faixas granulométricas “B” e “C”, conforme a especificação de serviço ES 031 (DNIT, 2006a). As Figuras 4.4 e 4.5 apresentam, respectivamente, para as faixas B e C, as granulometrias de projeto adotadas na pesquisa.

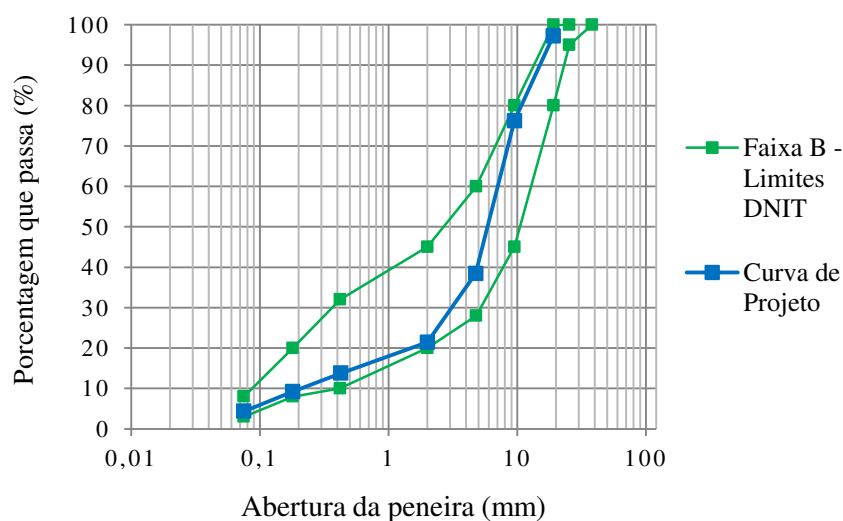


Figura 4.4: Granulometria de projeto correspondente à faixa B da ES 031.

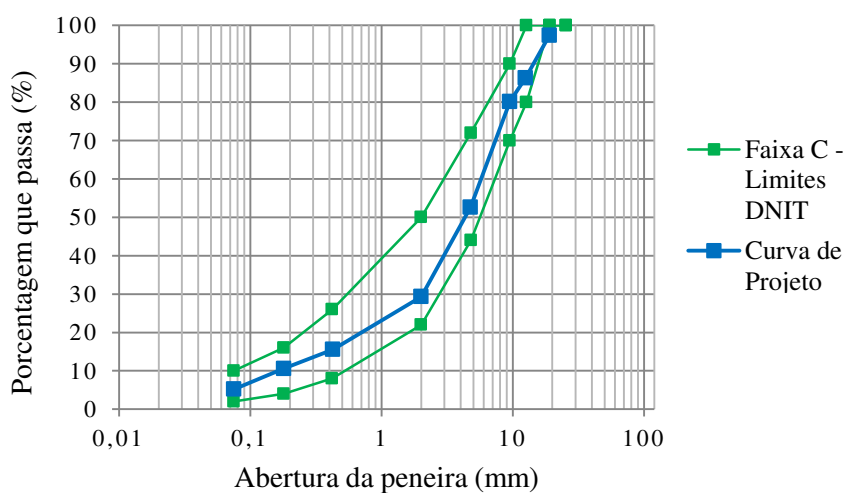


Figura 4.5: Granulometria de projeto correspondente à faixa C da ES 031.

4.3.4. Dosagem das misturas asfálticas de projeto

Após a verificação das respectivas curvas granulométricas de projeto, definiu-se o teor de ligante asfáltico de projeto para as misturas asfálticas de projeto estudadas. As respectivas dosagens das misturas asfálticas de projeto consideradas nessa pesquisa, correspondentes às faixas “B” e “C” da especificação de serviço ES 031 (DNIT, 2006a), seguiram, rigorosamente, as exigências do método de dosagem *Marshall*.

Foram obtidos os teores de projeto de 4,2% e 4,7%, para as faixas “B” e “C”, respectivamente. Os teores de ligante asfáltico de projeto encontrados atenderam a todas as especificações estabelecidas pela ES 031 (DNIT, 2006a).

4.3.5. Ensaios mecânicos

4.3.5.1. Resistência à tração por compressão diametral (RT)

Na Figura 4.6, são apresentados os valores das Resistências à Tração por Compressão Diametral determinadas para as amostras ensaiadas com e sem inserção do elemento de reforço.

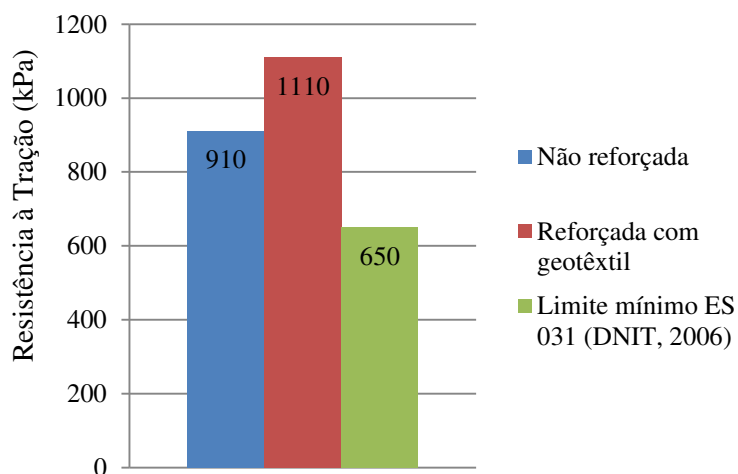


Figura 4.6: Valores médios de Resistência à Tração por Compressão Diametral (RT) para corpos de prova da mistura asfáltica de projeto com e sem reforço geossintético.

Observou-se que as misturas asfálticas reforçadas com geotêxtil apresentaram maiores magnitudes de Resistência à Tração, evidenciando que, para as particularidades dessa pesquisa, o produto final resultante das misturas reforçadas com geotêxtil garantiu acréscimo de resistência à tração à mistura. De acordo com a especificação de serviço ES 031 (DNIT, 2006a), misturas asfálticas usinadas a quente, dimensionadas para a camada de rolamento, devem obter Resistência à Tração por Compressão Diametral, ensaiadas a 25°C, superior a 0,65 MPa, o que foi atendido pela mistura asfáltica composta reforçada, para a qual obteve-se a média de 1,11 MPa.

Estudos realizados por Ante (2016) também evidenciaram que a presença do reforço confere à mistura asfáltica uma resistência adicional posterior à ruptura da

camada inferior do corpo de prova. Segundo esse autor, esse acréscimo de resistência, traduzido para o contexto de uma situação real de serviço, prolongaria a vida útil da mistura.

4.3.5.2. Módulo de resiliência (MR)

No que se refere ao ensaio de Módulo de Resiliência, os valores obtidos para as misturas asfálticas ensaiadas com e sem reforço geossintéticos são apresentados na Figura 4.7.

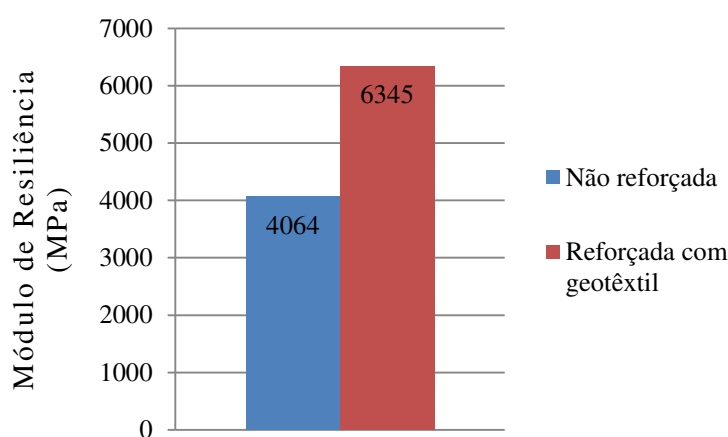


Figura 4.7: Valores médios de Módulo de Resiliência (MR) para corpos de prova da mistura asfáltica de projeto com e sem reforço.

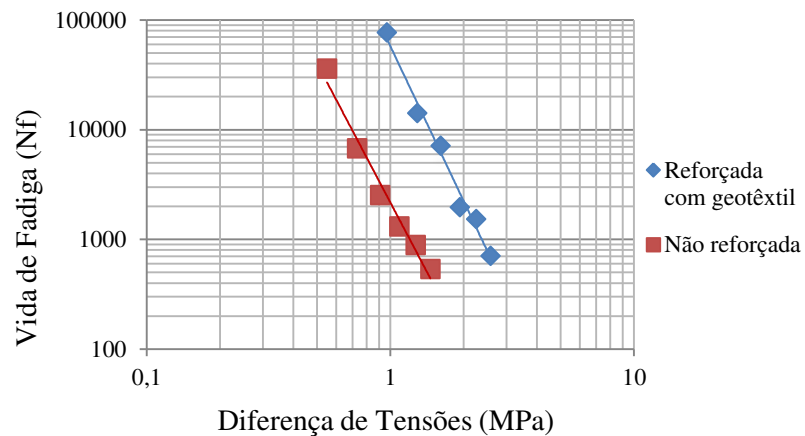
Os valores de maior magnitude observados corresponderam às misturas asfálticas reforçadas, evidenciando que, para as particularidades da pesquisa, a inserção do geotêxtil resulta em um incremento na rigidez da mistura.

Aspectos analisados por Correia (2010) confirmam o que foi observado nessa pesquisa, em que geotêxteis impregnados conferem rigidez adicional à camada asfáltica quando aplicada uma taxa de impregnação adequada no reforço. Diante disso, segundo essa autora, as misturas reforçadas com elementos geossintéticos impregnados tendem a apresentar um melhor desempenho estrutural em ensaios mecânicos.

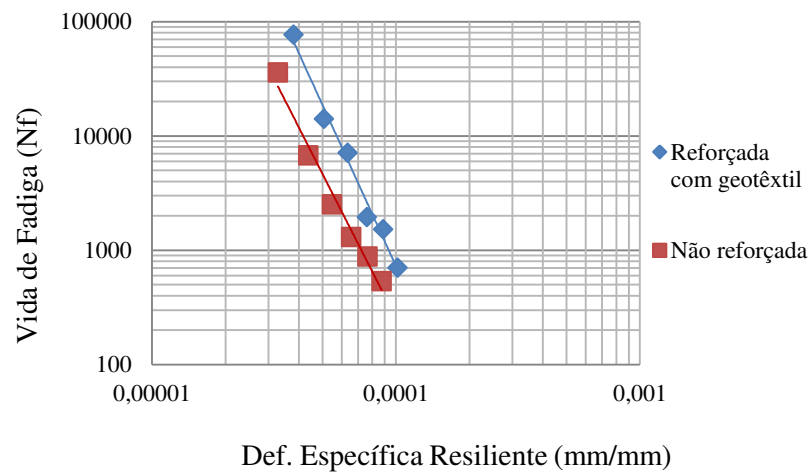
4.3.5.3. Vida de Fadiga

A moldagem dos corpos de prova foi realizada conforme os procedimentos *Marshall*. Para cada condição de reforço da mistura asfáltica de projeto, foram confeccionados 6 corpos de prova compostos, nos respectivos teores de projeto. Os

carregamentos empregados neste ensaio foram correspondentes a 15%, 20%, 25%, 30%, 35% e 40% das respectivas Resistências à Tração por Compressão Diametral das misturas asfálticas compostas reforçada e não reforçada. Os resultados do ensaio de Vida de Fadiga foram reproduzidos na Figura 4.8, que descreve a Vida de Fadiga através da relação entre o número de repetições de carga na ruptura (N_f) versus a diferença de tensões ($\Delta\sigma$) (4.8a) e da relação entre o número de repetições de carga na ruptura (N_f) versus a deformação específica resiliente (ϵ_r) (4.8b).



(a)



(b)

Figura 4.8: Curvas de Fadiga das misturas asfálticas pesquisadas: a) Vida de Fadiga (N_f) versus Diferença de tensões; b) Vida de Fadiga (N_f) versus Deformação específica resiliente na ruptura.

As equações obtidas através de regressão linear para as curvas demonstradas na Figura 4.8 são apresentadas na Tabela 4.5.

Tabela 4.5: Equações de regressão derivadas das curvas de vida de fadiga das misturas asfálticas compostas reforçadas e não reforçadas com geotêxtil

Tipo de mistura	Equação de regressão	R ²
Mistura asfáltica composta reforçada	(a) $Nf = 57558,1(1/\Delta\sigma)^{4,6952}$	0,9860
	(b) $Nf = 1,4000.10^{-16} (1/\varepsilon_r)^{4,6766}$	0,9862
Mistura asfáltica composta não reforçada	(c) $Nf = 2171,5(1/\Delta\sigma)^{4,2135}$	0,9791
	(d) $Nf = 4,5049.10^{-16}(1/\varepsilon_r)^{4,1882}$	0,9801

Vale ressaltar que os valores de R² estão próximos de 1, indicando um bom ajuste do modelo matemático adotado aos dados experimentais. Esses modelos de fadiga obtidos para cada revestimento proposto foram empregados no cálculo do número “Nf_{lab}” de repetições de carga requerido para que o pavimento sofra ruptura por fadiga, considerando-se as condições de ensaio de laboratório (item 4.3.6.2).

4.3.6. Análise estrutural do pavimento adotado

4.3.6.1. Tensões horizontais (σ_h)

O revestimento asfáltico está sujeito a tensões horizontais de compressão (valores negativos de σ_h) e horizontais de tração (valores positivos de σ_h). Porém, o cenário crítico são as tensões no bordo inferior do revestimento (*binder*), no qual a tensão horizontal de tração é máxima. Diante disso, nessa pesquisa, o enfoque será dado às tensões horizontais de tração no bordo inferior do revestimento (*binder*).

Para fins de ilustração, na Figura 4.9, são apresentadas as tensões horizontais (σ_h) que atuam na estrutura do pavimento asfáltico reforçado com geotêxtil, no que se refere ao carregamento de 80 kN por eixo e a pressão de enchimento dos pneus de 563 kPa. Seções similares foram obtidas para as demais condições de carregamento previstas na pesquisa, considerando-se o revestimento asfáltico reforçado.

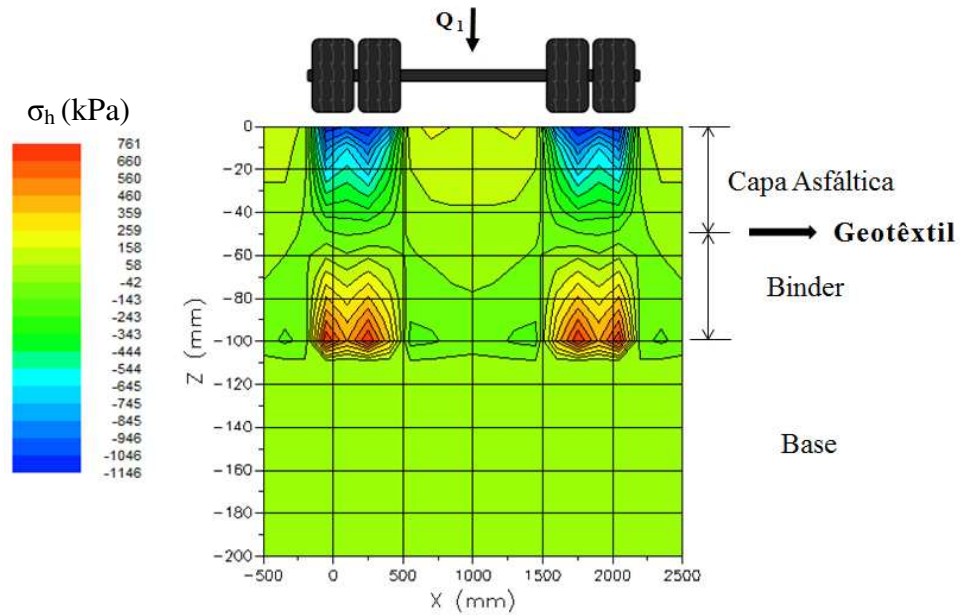


Figura 4.9: Tensões horizontais (σ_h) na estrutura do pavimento adotado para o revestimento asfáltico reforçado com geotêxtil: $Q_1=80$ kN e $P_1=563$ kPa.

Conforme esperado, verificou-se que as maiores tensões horizontais de tração foram observadas no bordo inferior da camada de *binder*. A Tabela 4.6 apresenta as tensões horizontais de tração (σ_{ht}) obtidas no bordo inferior do revestimento asfáltico reforçado ($Z=-100$ mm), em função da variação do carregamento e da pressão dos pneus. Os pontos analisados para cada cenário estudado foram: 1 e 3 – eixo vertical sob as rodas (abscissas $X=0$ mm; $X=300$ mm) e 2 – eixo vertical de simetria entre as rodas (abscissa $X=150$ mm). São apresentadas, também, para esses pontos, as respectivas relações RT/σ_{ht} , as quais podem ser assumidas como um coeficiente de segurança (FS) à ruptura por tração estática.

Tabela 4.6: Tensões horizontais de tração (σ_{ht}) atuantes no bordo inferior da camada de revestimento asfáltico reforçado e coeficiente de segurança (FS), em função dos níveis de carregamento e de pressão dos pneus adotados.

Pontos	Coordenadas do ponto (X;Y;Z)	Q_{eixo} (kN)	P_{pneus} (kPa)	RT (MPa)	σ_{ht} (MPa) Binder	FS= RT/σ_{ht}
1	(0;0;-100)	80	563	1,11	0,873	1,27
2	(150;0;-100)				0,263	4,22
3	(300;0;-100)				0,869	1,28
1	(0;0;-100)	98	633	1,11	1,019	1,09
2	(150;0;-100)				0,350	3,17
3	(300;0;-100)				1,015	1,09
1	(0;0;-100)	118	703	1,11	1,171	0,95
2	(150;0;-100)				0,456	2,43
3	(300;0;-100)				1,167	0,95

Verificou-se, através da Tabela 4.6, que, conforme previsto, as tensões horizontais de tração (σ_{ht}) foram maiores à medida que ocorreu o aumento do carregamento e da pressão dos pneus, e, também, que as maiores magnitudes de tensão horizontal de tração foram observadas nos pontos localizados sob as rodas (pontos 1 e 3).

Observou-se que as tensões horizontais de tração (σ_{ht}) correspondentes às misturas asfálticas reforçadas apresentaram valores superiores à média obtida para a Resistência à Tração por Compressão Diametral ($RT=1,11$ MPa) para os pontos 1 e 3 do carregamento de 118 kN com pressão de enchimento dos pneus de 703 kPa. Isso demonstra que quanto maior o carregamento imposto no pavimento, maiores são às tensões de tração concentradas na fibra inferior da camada de *binder*. Esse fato pode ser confirmado diante dos valores de FS menores que 1 para o carregamento citado. Valores de FS inferiores a 1 sugerem uma maior suscetibilidade do revestimento asfáltico à ruptura por tração estática.

De forma similar, para fins de ilustração, na Figura 4.10, são apresentadas as tensões horizontais (σ_h) que atuam na estrutura do pavimento asfáltico não reforçado, para o cenário em que o carregamento é de 80 kN por eixo e a pressão de enchimento dos pneus de 563 kPa. Seções similares foram obtidas para as demais condições de carregamento previstas na pesquisa, considerando-se o revestimento asfáltico não reforçado.

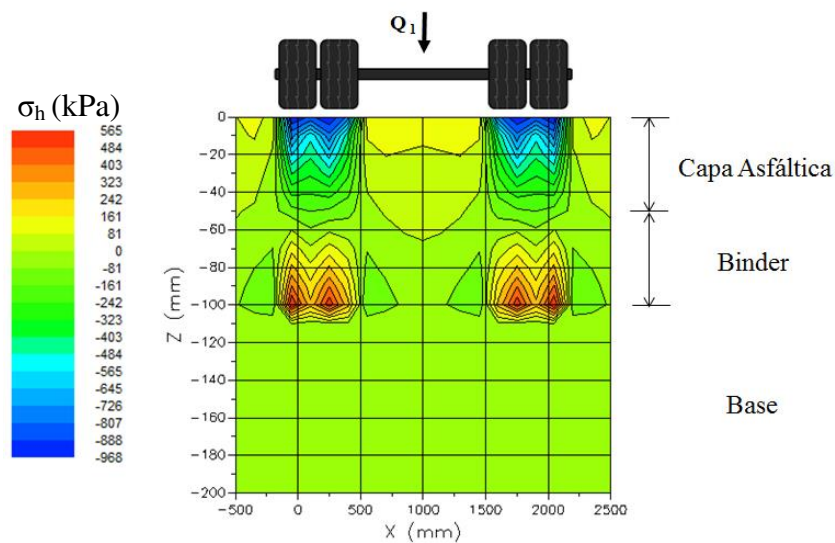


Figura 4.10: Tensão horizontais (σ_h) na estrutura do pavimento analisado para o revestimento asfáltico sem inserção do elemento de reforço: $Q_1=80$ kN e $P_1=563$ kPa.

De forma análoga ao analisado no revestimento asfáltico reforçado, verificou-se que as maiores tensões horizontais de tração foram observadas na fibra inferior da camada de *binder*. A Tabela 4.7 apresenta as tensões horizontais de tração (σ_{ht}) obtidas no bordo inferior do revestimento asfáltico não reforçado ($Z=-100$ mm), em função da variação do carregamento e da pressão dos pneus. Os pontos analisados para cada cenário estudado foram: 1 e 3 – eixo vertical sob as rodas (abscissas $X=0$ mm; $X=300$ mm) e 2 – eixo vertical de simetria entre as rodas (abscissa $X=150$ mm). São apresentadas, também para esses pontos, as respectivas relações RT/σ_{ht} .

Tabela 4.7: Tensões horizontais de tração (σ_{ht}) atuantes no bordo inferior da camada de revestimento asfáltico não reforçado e coeficientes de segurança (FS), em função dos níveis de carregamento e de pressão dos pneus adotados.

Pontos	Coordenadas do ponto (X;Y;Z)	Q _{eixo} (kN)	P _{pneus} (kPa)	RT (MPa)	σ_{ht} (MPa) Binder	FS=RT/ σ_{ht}
1	(0;0;-100)	80	563	0,91	0,661	1,37
2	(150;0;-100)				0,086	10,59
3	(300;0;-100)				0,660	1,38
1	(0;0;-100)	98	633		0,766	1,19
2	(150;0;-100)				0,132	6,89
3	(300;0;-100)				0,765	1,19
1	(0;0;-100)	118	703		0,872	1,04
2	(150;0;-100)				0,191	4,76
3	(300;0;-100)				0,871	1,04

Conforme previsto, verificou-se que as tensões horizontais de tração (σ_{ht}) foram maiores à medida que ocorreu o aumento do carregamento e da pressão dos pneus, e, também, que as maiores magnitudes de tensão foram observados nos pontos localizados sob as rodas do carregamento.

Analisando-se a Tabela 4.7, constatou-se que, para todos os níveis de carregamento, especialmente para os pontos críticos 1 e 3, as tensões horizontais de tração (σ_{ht}) correspondentes ao revestimento asfáltico composto não reforçado apresentaram valores inferiores à média obtida para a Resistência a Tração por Compressão Diametral ($RT=0,91$ MPa). Esse fato pode ser comprovado diante dos valores de FS maiores que 1 para todos os carregamentos estudados. Valores de FS maiores que 1 expressam a não suscetibilidade do revestimento asfáltico à ruptura por tração estática.

Porém, independentemente dos níveis de carregamento e de pressão dos pneus adotados, observou-se maiores valores do FS para o cenário em que o sistema

não foi reforçado. Em decorrência disso, constatou-se que maiores valores de FS implicam em menores tensões horizontais de tração, que, por sua vez, estão relacionados à maior flexibilidade da camada de revestimento, traduzida pelo menor MR.

De forma análoga ao que foi observado nessa pesquisa, Fontes (2009) afirma que camadas estruturais com maior flexibilidade redistribuem de forma mais satisfatória as tensões atuantes para as camadas subjacentes. Diferentemente, camadas estruturais mais rígidas, que possuem maiores magnitudes de MR, como a correspondente ao revestimento asfáltico reforçado dessa pesquisa, tendem a concentrar mais intensamente as tensões geradas internamente pelo carregamento externo, dificultando sua redistribuição entre as demais camadas estruturais do pavimento-tipo.

4.3.6.2. Análise de vida de fadiga

No que se refere à análise de vida de fadiga dos revestimentos asfálticos propostos (reforçado e não reforçado), faz-se necessária à obtenção da diferença de tensões ($\Delta\sigma$) no bordo inferior da camada de *binder*. O valor de $\Delta\sigma$ é dado pela diferença entre a tensão horizontal de tração (σ_{ht}), obtida previamente e apresentada nas Tabelas 4.6 e 4.7, e a tensão vertical de compressão (σ_{vc}).

Para fins de ilustração, na Figura 4.11, são apresentadas as tensões verticais (σ_v) que atuam na estrutura do pavimento asfáltico reforçado em relação ao carregamento de 80 kN por eixo e à pressão de enchimento dos pneus de 563 kPa. Seções similares foram obtidas para as demais condições de carregamento previstas na pesquisa, considerando-se o revestimento asfáltico reforçado.

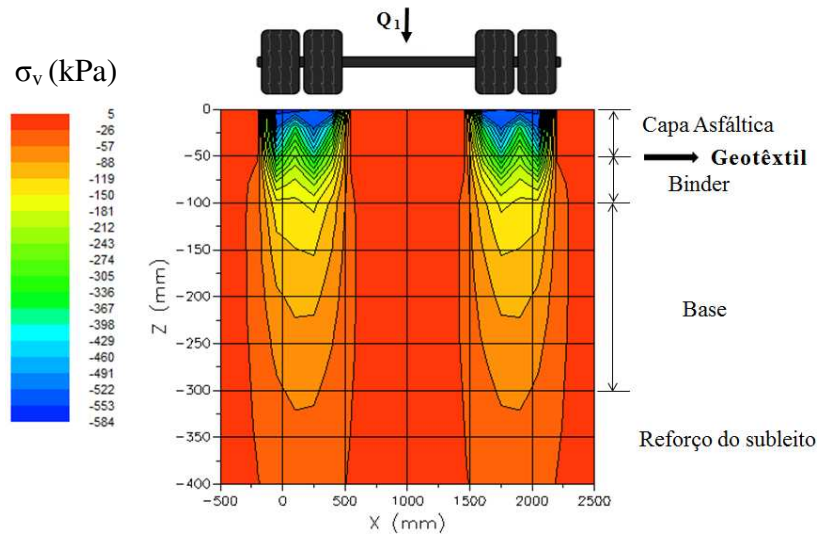


Figura 4.11: Tensão verticais (σ_v) na estrutura do pavimento analisado para o revestimento asfáltico com inserção do elemento de reforço: $Q_1=80$ kN e $P_1=563$ kPa.

Em posse do modelo de fadiga obtido em laboratório para a mistura asfáltica composta reforçada [Tabela 4.5 (a)], empregam-se os valores de $\Delta\sigma$ para a determinação da vida de fadiga ($N_{f_{labRef}}$). A Tabela 4.8 apresenta as tensões verticais de compressão (σ_{vc}) obtidas no bordo inferior do revestimento asfáltico reforçado ($Z=-100$ mm), em função da variação do carregamento e da pressão dos pneus. São apresentados, também, os valores da diferença de tensões ($\Delta\sigma$) e do número “ $N_{f_{labRef}}$ ” de solicitações do eixo padrão para o revestimento reforçado nos pontos analisados nessa pesquisa. Os pontos analisados para cada cenário estudado foram: 1 e 3 – eixo vertical sob as rodas (abscissas $X=0$ mm; $X=300$ mm) e 2 – eixo vertical de simetria entre as rodas (abscissa $X=150$ mm).

Tabela 4.8: Vida de fadiga do revestimento asfálticos reforçado pesquisado ($N_{f_{labRef}}$) para o bordo inferior do revestimento em função dos níveis de carregamento e de pressão dos pneus adotados.

Pontos	Coordenadas do ponto (X;Y;Z)	Q_{eixo} (kN)	P_{pneus} (kPa)	σ_{ht} (MPa) Binder	σ_{vc} (MPa) Binder	$\Delta\sigma=$ ($\sigma_{ht}-\sigma_{vc}$)	$N_{f_{labRef}}$
1	(0;0;-100)			0,873	-0,159	1,032	$4,96 \times 10^4$
2	(150;0;-100)	80	563	0,263	-0,133	0,396	$4,46 \times 10^6$
3	(300;0;-100)			0,869	-0,159	1,028	$5,06 \times 10^4$
1	(0;0;-100)			1,019	-0,190	1,209	$2,36 \times 10^4$
2	(150;0;-100)	98	633	0,350	-0,163	0,513	$1,32 \times 10^6$
3	(300;0;-100)			1,015	-0,190	1,205	$2,40 \times 10^4$
1	(0;0;-100)			1,171	-0,223	1,394	$1,20 \times 10^4$
2	(150;0;-100)	118	703	0,456	-0,197	0,653	$4,26 \times 10^5$
3	(300;0;-100)			1,167	-0,223	1,390	$1,23 \times 10^4$

Observação: (-) compressão na fibra inferior e (+) tração na fibra inferior

Conforme previsto, os valores de vida de fadiga tenderam a diminuir à medida que houve um aumento no carregamento solicitante. Pode-se notar, também, que os valores de “ $N_{flabRef}$ ”, para o ponto da fibra inferior localizado no eixo vertical de simetria entre as rodas, foram superiores em relação àqueles situados no eixo vertical sob as rodas.

Na Figura 4.12, são apresentadas as tensões verticais (σ_v) que atuam na estrutura do pavimento asfáltico não reforçado com carregamento de 80 kN por eixo e pressão de enchimento dos pneus de 563 kPa. Seções similares foram obtidas para as demais condições de carregamento previstas na pesquisa, considerando-se o revestimento asfáltico não reforçado.

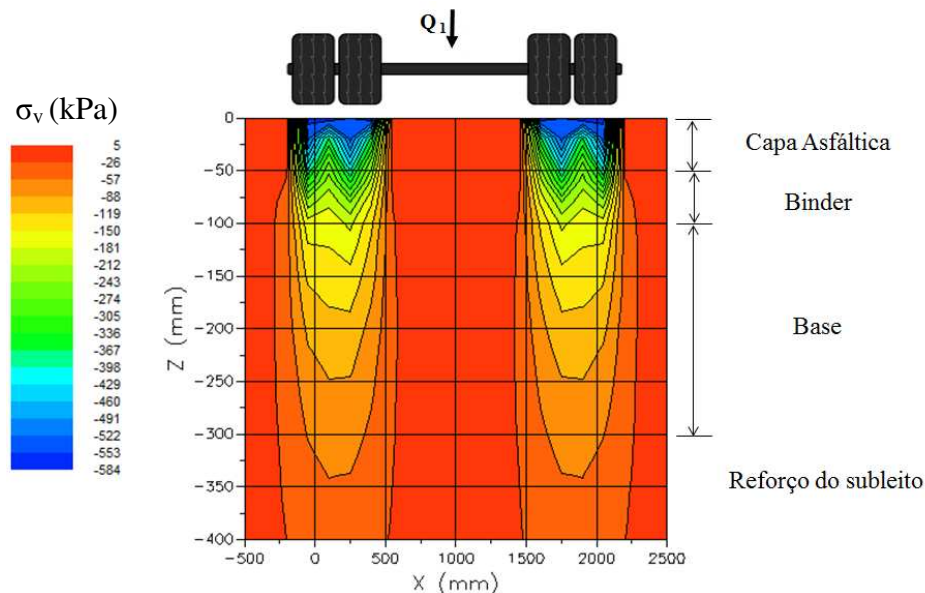


Figura 4.12: Tensão verticais (σ_v) na estrutura do pavimento analisado para o revestimento asfáltico sem inserção do elemento de reforço: $Q_1=80$ kN e $P_1=563$ kPa.

Diante do modelo de fadiga obtido em laboratório para a mistura asfáltica composta não reforçada [Tabela 4.5(c)], são empregados os valores de $\Delta\sigma$ para a obtenção da vida de fadiga ($N_{flabN\grave{a}oRef}$). A Tabela 4.9 apresenta as tensões verticais de compressão (σ_{vc}) obtidas no bordo inferior do revestimento asfáltico não reforçado ($Z=-100$ mm), em função da variação do carregamento e da pressão dos pneus. São apresentados, também, os valores da diferença de tensões ($\Delta\sigma$) e do número “ $N_{flabN\grave{a}oRef}$ ” de solicitações do eixo padrão para o revestimento não reforçado nos pontos analisados nessa pesquisa. Os pontos analisados para cada cenário estudado

foram: 1 e 3 – eixo vertical sob as rodas (abscissas X=0 mm; X=300 mm) e 2 – eixo vertical de simetria entre as rodas (abscissa X=150 mm).

Tabela 4.9: Vida de fadiga do revestimento asfáltico não reforçado pesquisado ($N_{f_{labN\grave{a}oRef}}$) para o bordo inferior do revestimento em função dos níveis de carregamento e de pressão dos pneus adotados.

Pontos	Coordenadas do ponto (X;Y;Z)	Q_{eixo} (kN)	P_{pneus} (kPa)	σ_{ht} (MPa) Binder	σ_{vc} (MPa) Binder	$\Delta\sigma = (\sigma_{ht} - \sigma_{vc})$	$N_{f_{labN\grave{a}oRef}}$
1	(0;0;-100)			0,661	-0,191	0,852	$4,26 \times 10^3$
2	(150;0;-100)	80	563	0,086	-0,148	0,234	$9,87 \times 10^5$
3	(300;0;-100)			0,660	-0,191	0,851	$4,28 \times 10^3$
1	(0;0;-100)			0,766	-0,227	0,993	$2,23 \times 10^3$
2	(150;0;-100)	98	633	0,132	-0,182	0,314	$2,86 \times 10^5$
3	(300;0;-100)			0,765	-0,227	0,992	$2,24 \times 10^3$
1	(0;0;-100)			0,872	-0,266	1,138	$1,25 \times 10^3$
2	(150;0;-100)	118	703	0,191	-0,221	0,412	$9,10 \times 10^4$
3	(300;0;-100)			0,871	-0,266	1,137	$1,26 \times 10^3$

Observação: (-) compressão na fibra inferior e (+) tração na fibra inferior

De maneira análoga ao cenário reforçado, os valores de “ $N_{f_{labN\grave{a}oRef}}$ ” tenderam a diminuir à medida que houve um aumento no carregamento solicitante. Pode-se notar, também, que os valores de “ $N_{f_{labN\grave{a}oRef}}$ ”, para o ponto da fibra inferior localizado no eixo vertical de simetria entre as rodas, foram superiores em relação àqueles situados no eixo vertical sob as rodas.

Na Tabela 4.10, apresentam-se as respectivas relações, para condições similares de carregamento, entre os $N_{f_{lab}}$ dos revestimentos reforçado e não reforçado (R_f ou relação de fadigas).

Tabela 4.10: Relação de fadigas entre os $N_{f_{lab}}$ dos revestimentos reforçado e não reforçado em função dos níveis de carregamento e de pressão dos pneus adotados.

Pontos	Coordenadas do ponto (X;Y;Z)	Q_{eixo} (kN)	P_{pneus} (kPa)	Condição de reforço		$R_f = \frac{N_{f_{lab Ref}}}{N_{f_{lab N\grave{a}o Ref}}}$
				Reforçado	Não reforçado	
				$N_{f_{lab Ref}}$	$N_{f_{lab N\grave{a}o Ref}}$	
1	(0;0;-100)			$4,96 \times 10^4$	$4,26 \times 10^3$	11,64
2	(150;0;-100)	80	563	$4,46 \times 10^6$	$9,87 \times 10^5$	4,51
3	(300;0;-100)			$5,06 \times 10^4$	$4,28 \times 10^3$	11,80
1	(0;0;-100)			$2,36 \times 10^4$	$2,23 \times 10^3$	10,56
2	(150;0;-100)	98	633	$1,32 \times 10^6$	$2,86 \times 10^5$	4,62
3	(300;0;-100)			$2,40 \times 10^4$	$2,24 \times 10^3$	10,68
1	(0;0;-100)			$1,20 \times 10^4$	$1,25 \times 10^3$	9,61
2	(150;0;-100)	118	703	$4,26 \times 10^5$	$9,10 \times 10^4$	4,67
3	(300;0;-100)			$1,23 \times 10^4$	$1,26 \times 10^3$	9,70

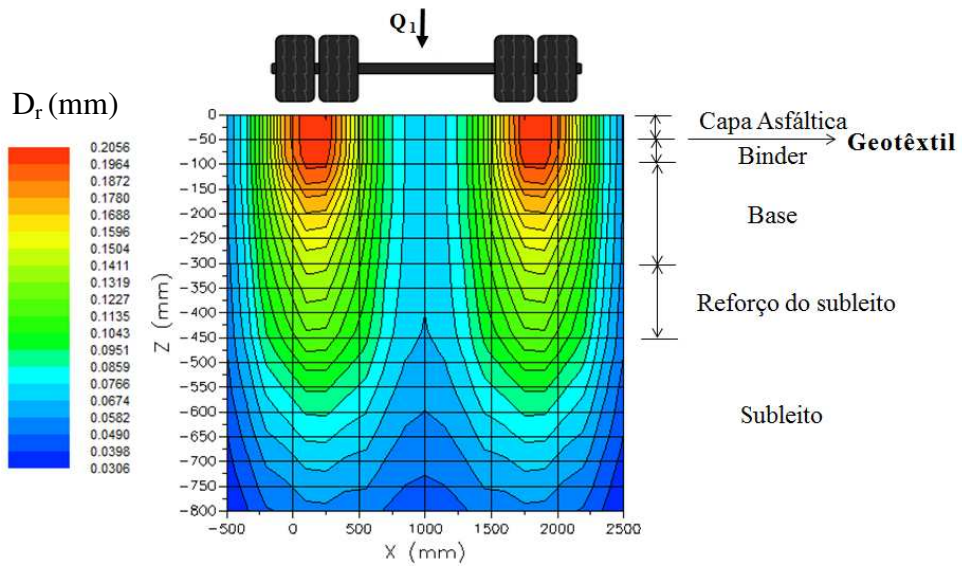
Verifica-se que a magnitude do número “ N_{flab} ” de solicitações do eixo padrão para o revestimento reforçado foi superior, independentemente do cenário de carregamento e de pressão dos pneus analisado nesse estudo. Assim, é possível inferir quanto à capacidade do elemento de reforço em prolongar o período de vida útil do pavimento, suportando um maior número de repetições de cargas sem ocorrer rupturas por fadiga.

Nesse contexto, os valores obtidos para o fator R_f reafirmam o incremento no desempenho estrutural dos revestimentos asfálticos reforçados com geotêxtil em relação aos não reforçados, sendo os valores de $N_{flabRef}$ cerca de 11 vezes maior no cenário de carregamento de 80 kN, 10 vezes maior no de 98 kN e 9 vezes maior no de 118 kN. À medida que há o aumento do carregamento, a relação de fadigas (R_f) diminuiu devido à maior magnitude das diferenças de tensões na fibra inferior da camada de *binder*.

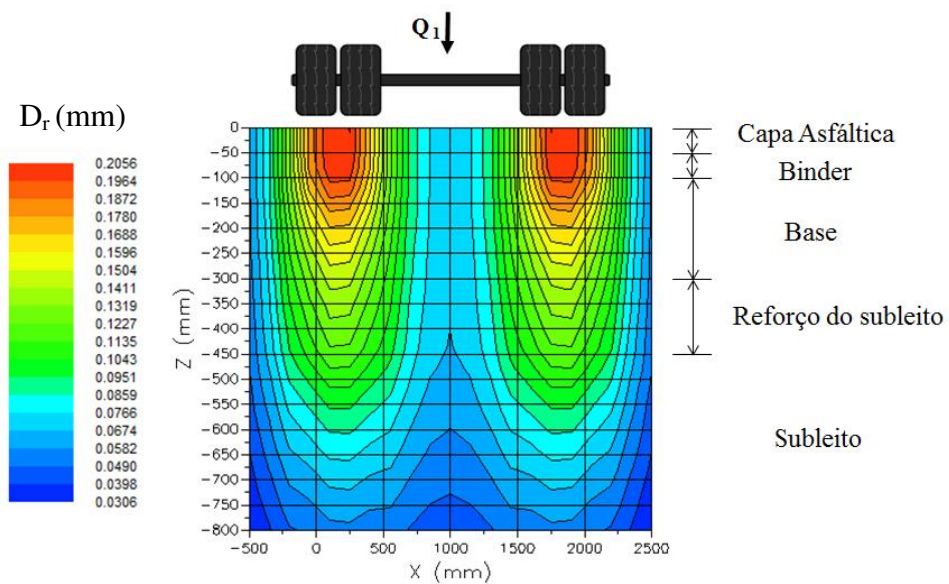
Acredita-se que esse ganho no desempenho estrutural dos revestimentos asfálticos reforçados está associado ao que foi observado por Fonseca et. al (2016). Esses autores afirmaram que, nos sistemas reforçados com geotêxtil, as rupturas não ocorrem de forma brusca. Ao atingir o elemento geossintético, as trincas têm sua direção de propagação alterada, sendo desviadas do caminho vertical para o horizontal. As trincas na camada superficial só se iniciam após o corpo de prova ser submetido a maiores magnitudes de deflexão. Isso demonstra a capacidade de suporte da mistura asfáltica reforçada em suprir as necessidades estruturais da camada de revestimento asfáltico em relação às solicitações impostas pelo tráfego.

4.3.6.3. Deflexões recuperáveis (D_r)

A Figura 4.13 (a e b) apresenta os valores de deflexão vertical recuperável (D_r) previstos pela análise estrutural em um plano vertical do pavimento-tipo, considerando-se, respectivamente, os revestimentos reforçado e não reforçado. Para fins de ilustração, tem-se, nessa figura, a representação para o carregamento de 80 kN por eixo e pressão de enchimento dos pneus de 563 kPa. Seções similares foram obtidas para as demais condições de carregamento previstas na pesquisa, para ambos cenários.



(a)



(b)

Figura 4.13: Deflexões verticais recuperáveis na estrutura do pavimento-tipo analisado para $Q_1=80$ kN e $P_1=563$ kPa: (a) revestimento asfáltico reforçado com geotêxtil e (b) revestimento asfáltico não reforçado.

Nesse trabalho, a deflexão vertical recuperável será analisada, particularmente, na superfície do revestimento asfáltico. Na Tabela 4.11, são apresentadas as deflexões recuperáveis obtidas nas respectivas superfícies dos revestimentos asfálticos reforçado e não reforçado ($Z=0$ mm), em função da variação do carregamento e da pressão dos pneus. Os pontos analisados para cada cenário

estudado foram: 1 e 3 – eixo vertical sob as rodas (abscissas X=0 mm; X=300 mm) e 2 – eixo vertical de simetria entre as rodas (abscissa X=150 mm).

Tabela 4.11: Deflexões verticais recuperáveis na estrutura do pavimento-tipo analisado para os revestimentos asfálticos reforçado e não reforçado em função dos níveis de carregamento e de pressão dos pneus adotados.

Pontos	Coordenadas do ponto (X;Y;Z)	Q _{eixo} (kN)	P _{pneus} (kPa)	Deflexões recuperáveis (x0,01 mm)	
				Camada asfáltica reforçada	Camada asfáltica não reforçada
1	(0;0;0)	80	563	19,60	21,50
2	(150;0;0)			20,50	22,00
3	(300;0;0)			20,00	21,90
1	(0;0;0)	98	633	23,90	26,20
2	(150;0;0)			25,00	26,90
3	(300;0;0)			24,40	26,70
1	(0;0;0)	118	703	28,70	31,40
2	(150;0;0)			30,10	32,30
3	(300;0;0)			29,20	31,90

Através da análise dos valores das deflexões recuperáveis expostas na Tabela 4.11, é possível observar que as estruturas compostas pelos revestimentos asfálticos reforçados apresentaram decréscimos percentuais médios de 9% esse parâmetro. A princípio, isso pode ser justificado pelo fato de que os revestimentos não reforçados são mais flexíveis em relação aos reforçados, implicando, com isso, em maiores deflexões para os níveis de tensões analisados.

De forma análoga ao observado nessa pesquisa, estudos de Correia (2010) evidenciaram que o geotêxtil não tecido impregnado proporciona reduções nos valores de deformação na ruptura. Esse fato pode indicar um acréscimo de rigidez ao sistema anti-reflexão de trincas. Portanto, de acordo com Zou *et al.* (2007), a constatação analítica de que a camada asfáltica reforçada apresenta menores valores de deflexão recuperável pode ser explicada pelo fato de que a inserção do elemento de reforço mobiliza o incremento de rigidez da camada asfáltica.

4.4. CONCLUSÃO

Nesta pesquisa, foi desenvolvida uma análise estrutural de um pavimento-tipo em função da inserção ou não de um elemento de reforço (geotêxtil) em revestimentos asfálticos. Essa análise evidenciou que:

- O elemento geossintético confere rigidez e resistência mecânica adicional à camada asfáltica, além de decréscimo de sua deformabilidade elástica ou deflexão recuperável;
- Independentemente dos níveis de carregamento e de pressão dos pneus adotados, foram observados maiores valores de fator de segurança à ruptura à tração estática para o cenário em que o sistema não foi reforçado. Esse fato pode estar relacionado à maior flexibilidade dessa camada, traduzida pelo menor MR, proporcionando maior redistribuição das tensões atuantes para as camadas subjacentes ao revestimento asfáltico;
- Os valores obtidos para a relação de fadiga (R_f) mostraram que o $N_{flabRef}$ foi, no mínimo, cerca de 9 vezes maior que $N_{flabNaoRef}$ para todos os cenários de carregamento adotados, evidenciando a capacidade do sistema reforçado em suportar maiores números de solicitações de tráfego sem que ocorra a ruptura do pavimento;
- Em relação às deflexões verticais recuperáveis observadas nos revestimentos propostos, foram constatados decréscimos percentuais médios de 9% para os sistemas reforçados, provavelmente em decorrência do incremento de rigidez elástica das misturas asfálticas compostas reforçadas, traduzida pelo seu Módulo de Resiliência.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AL-QADI, I.; TUTUMLUER, E. Pavement base reinforcement with geogrids – modeling the aggregate interlock mechanism. **Geo-Strata**. Vol. 13. Nº 3, 2009.
- ANTE, J. R. O. **Desempenho de misturas asfálticas reforçadas com geossintéticos**. Teses de doutorado. Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília – DF, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 14855**: Materiais betuminosos – Determinação da solubilidade em tricloroetileno. Rio de Janeiro. 2015, 5p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR NM 52**: Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro. 2009, 6p.

- ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - **ASTM C 1252**– Standard test method for uncompact void content of fine aggregate (as influenced by particle shape, surface texture and grading). USA. 2006, 5p.
- ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - **ASTM D4791** – Standard test method for flat particles, elongated particles, or flat and elongated particles in coarse aggregate. USA. 2010, 6p.
- BALBO, J. T. **Pavimentação Asfáltica: Materiais de Projeto e Restauração**. Oficina de Textos, São Paulo, 2007.
- CARMO, C. A. T., RUIZ, E.F., PANDOLPHO, J. R.; MONSTESTRUQUE, G. **Utilização de Geogrelha de Poliéster na Restauração da Pista Auxiliar de Pouso e Decolagem do Aeroporto de Congonhas**. 44ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPv) e 18º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR), Foz do Iguaçu/PR, 2015. Anais CD-ROM.
- 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 (Mestrado em Engenharia de Transportes). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998, 131p.
- CEZARO, T. J. **Estudo das propriedades mecânicas de misturas asfálticas convencionais e modificadas**. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2008, 130p.
- CORREIA, N. S. **Comportamento de geotêxteis não tecidos impregnados com emulsão asfáltica usados como sistema anti-reflexão de trincas**. Dissertação (Mestrado) Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. Pós-graduação em Geotecnia. São Carlos, 2010.
- CORREIA, N. S.; ZORNBERG, J. G. **Evaluation of Strains and Unit Tension in Flexible Pavements Using Geogrids to Reinforced the Asphaltic Layer**, Proceedings of the VII Brazilian Congress on Geosynthetics, Brasilia, Brazil, 19-21, 2015, July (CD-ROM).
- DAROUS, J. **Estudo comparativo entre sistemas de cálculo de tensões e deformações utilizados em dimensionamento de pavimentos asfálticos novos**. Rio de Janeiro, 2003. XV, (COPPE/ UFRJ), M.Sc., Engenharia Civil, 2003, 290p.

- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **ME 078**: Agregado graúdo: adesividade a ligante betuminoso. Método de ensaio. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Rio de Janeiro, 1994a, 3 p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **ME 086**: Agregado - determinação do índice de forma. Método de ensaio. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Rio de Janeiro, 1994b, 5 p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM– DNER. **ME 089**: Agregados: avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio. Rio de Janeiro, 1994c,6p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **ME 148**: Material betuminoso - determinação dos pontos de fulgor e de combustão (vaso aberto cleveland). Método de ensaio. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Rio de Janeiro, 1994d, 2 p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **ME 004**: Material betuminoso – determinação da viscosidade Saybolt-Furol a alta temperatura método da película delgada. Método de ensaio. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Rio de Janeiro, 1994e, 2 p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM– DNER. **ME 149**: Emulsões asfálticas – determinação do pH. Rio de Janeiro, 1994f, 2p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **ME-024**: Pavimento – determinação das deflexões pela viga Benkelman. Método de ensaio. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Rio de Janeiro, 1994g, 6 p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM– DNER. **ME 043**: Misturas betuminosas a quente – ensaio *Marshall*. Rio de Janeiro, 1995,11p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM– DNER. **ME 195**: Agregados – determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo. Rio de Janeiro, 1997a,6p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM– DNER. **PRO 120**: Procedimento: coleta de amostra de agregado. [S.l.]. Rio de Janeiro, 1997b,7p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM– DNER. **ME 054:** Equivalente de areia. Rio de Janeiro, 1997c,6p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM– DNER. **ME 009:** Petróleo e derivados – determinação da densidade – método do densímetro. Rio de Janeiro, 1998a,7p.

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

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

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

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **EM 095:** Cimentos asfálticos de petróleo – Especificação de material. Rio de Janeiro. 2006b, 6p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **ET-DE-P00/043.** Sistema antireflexão de trincas com geossintéticos. Especificação Técnica - São Paulo, Brasil, 2006c.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **ME 131.** Materiais asfálticos - determinação do ponto de amolecimento - método do anel e bola. Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2010a, 6 p.

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

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **ES 145:** Pavimentação – Pintura de ligação com ligante asfáltico – Especificação de serviço. Rio de Janeiro. 2012, 7p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **ME 135:** Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação do módulo de resiliência. Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2018a, 6 p.

- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **ME 136:** Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral. Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2018b, 6 p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **ME 183:** Pavimentação asfáltica – Ensaio de Fadiga por compressão diametral à tensão controlada - método de ensaio. Rio de Janeiro. 2018c, 15p.
- FERNANDES JÚNIOR, J. L.; PAES, J. C.; PEREIRA, P. A. A. Avaliação dos efeitos das solicitações do tráfego sobre o desempenho de pavimentos flexíveis portugueses e brasileiros. **Revista Pavimentação**, Rio de Janeiro, Ano II, n. 5, p. 28-38, 2007.
- FONSECA, L. L.; ALMEIDA, M. G. G.; GRECO, J. A. S. **Avaliação da resistência a tração na flexão de camadas asfálticas reforçadas com geossintéticos.** XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica - COBRAMSEG 2016, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, ABMS, 2016.
- FONTENELE, H. B. **Representação do tráfego de veículos rodoviários de carga através de espectros de carga por eixo e seu efeito no desempenho dos pavimentos.** Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011, 287p.
- FONTES, L. P. T. L. **Optimização do Desempenho de Misturas Betuminosas com Betume Modificado com Borracha para Reabilitação de Pavimentos.** Tese de Doutorado. Universidade do Minho. Universidade Federal de Santa Catarina. 545 p., 2009.
- MOTTA, L. M. G. **Método de dimensionamento de pavimentos flexíveis; critério de confiabilidade e ensaios de cargas repetidas.** Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 1991.
- PINTO, S. **Estudo do Comportamento à fadiga de Misturas Betuminosas e Aplicação na Avaliação Estrutural de Pavimentos,** Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 1991.
- PONTE, R.S.; et al.. Avaliação de diferentes metodologias para obtenção do Módulo de Resiliência de misturas asfálticas. **Revista Transportes**, v. 22, n. 2, 2014, p. 85-94.

VILCHEZ, G.E.M. **Contribuição para a elaboração de método de projeto de restauração de pavimentos asfálticos utilizando geossintéticos em sistemas anti-reflexão de trincas.** Tese de doutorado. Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2002.

ZOU, W. L., WANG, Z., ZHANG, H. M. Field trial for asphalt pavements reinforced with geosynthetics and behavior of glass-fiber grids, **Journal of performance of constructed facilities**, ASCE, 361: 1-12, 2007.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÃO GERAL

Nessa pesquisa, foram realizadas diversas análises de modo a: (1) avaliar o eventual benefício de diferentes cenários de impregnação do geotêxtil utilizado como reforço em misturas asfálticas, (2) quantificar a capacidade do reforço geossintético de incrementar as propriedades mecânicas das misturas asfálticas reforçadas em relação às sem reforço e, por fim, (3) aferir a sensibilidade estrutural das misturas asfálticas reforçadas e não reforçadas, utilizando-se o software *me-PADS* (*Mechanistic Empirical Pavement Analysis and Design Software*), diante de propriedades mecânicas de interesse, de modo a quantificar o eventual efeito destas sobre o desempenho estrutural do pavimento adotado. Após a realização desse trabalho, foram obtidas as seguintes conclusões:

- Para as particularidades dessa pesquisa, a configuração correspondente à impregnação superior do geotêxtil mostrou-se a mais eficiente, sendo constatado, porém, que todos os cenários de impregnação resultaram em respostas mecânicas superiores àquelas das misturas asfálticas reforçadas não impregnadas;
- Julga-se que tanto as granulometrias que compõem as camadas asfálticas correspondentes as faixas granulométricas “B” e “C” quanto a pintura de ligação na superfície de contato entre a camada asfáltica faixa “C” e o elemento de reforço (geotêxtil), influenciam no intertravamento bem como na aderência entre ambas as camadas asfálticas e o reforço;
- Foi observada a importância da influência da granulometria e da textura superficial das misturas asfálticas, contribuindo para o incremento de aderência no contato reforço-massa asfáltica. A macrotextura da superfície das misturas asfálticas tem influência direta no valor da aderência. A superfície rugosa do CBUQ permite incrementos de aderência no contato entre as camadas, proporcionando eficiente intertravamento mecânico entre as camadas asfálticas e o reforço;
- Acredita-se que o acréscimo de resistência do elemento de reforço na mistura asfáltica reforçada foi garantido pelo grau de solidarização/aderência entre os

elementos de interface das camadas estruturais B e C, implicando em um incremento no desempenho estrutural do conjunto reforçado;

- A análise estrutural evidenciou que o elemento geossintético confere rigidez e resistência mecânica adicional à camada asfáltica, além de decréscimo de sua deformabilidade elástica ou deflexão recuperável;
- Independentemente dos níveis de carregamento e de pressão dos pneus adotados, foram observados maiores valores de fator de segurança à ruptura à tração estática para o cenário em que o sistema não foi reforçado, o que pode estar relacionado à maior flexibilidade do revestimento não reforçado, traduzida pelo menor MR, proporcionando maior redistribuição das tensões atuantes para as camadas subjacentes ao revestimento asfáltico;
- Os valores obtidos para a relação de fadiga (R_f) mostraram que o $N_{f_{labRef}}$ foi, no mínimo, cerca de 9 vezes maior que $N_{f_{labNãoRef}}$ para todos os cenários de carregamento adotados, permitindo inferir quanto à maior capacidade do sistema reforçado em suportar maiores números de solicitações de tráfego sem que ocorra a ruptura do revestimento à fadiga;
- Em relação às deflexões verticais recuperáveis observadas nos revestimentos propostos, foram constatados decréscimos percentuais médios de 9% para os sistemas reforçados, provavelmente em decorrência do incremento de rigidez elástica das misturas asfálticas compostas reforçadas, traduzida pelo seu Módulo de Resiliência.