

GÉSSICA SOARES PEREIRA

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

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

P436a
2019
Pereira, Gécica Soares, 1991-
Análise do comportamento mecânico de misturas asfálticas
a quente reforçadas com geogrelhas / Gécica Soares Pereira. –
Viçosa, MG, 2019.
xiii, 88 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

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

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

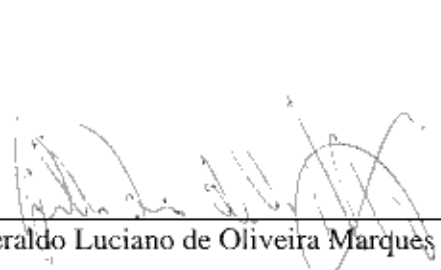
CDD 22. ed. 625.85

GÉSSICA SOARES PEREIRA

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

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)

*Dedico este trabalho
ao meu amado
Senhor e Salvador,
Jesus Cristo.*

AGRADECIMENTOS

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

Aos meus pais Geraldo e Geralda, minha base e meu refúgio, pelas mais diversas formas de auxílio e por terem me conduzido ao que sou hoje; à minha irmã e melhor amiga Fernanda, por ser minha companheira e conselheira de todas as horas; ao Ramon, meu amor, por todo cuidado, carinho, paciência e por estar sempre ao meu lado quando preciso.

Ao Professor Dr. Heraldo Nunes Pitanga, meu orientador desde a graduação, por mais uma vez ter aceitado o encargo de me orientar, auxiliando e me incentivando sempre a fazer o melhor, e pelas inúmeras contribuições para este trabalho.

Ao Professor Dr. Taciano Oliveira da Silva, por ter sido o primeiro a me incentivar na realização de pesquisas na área de pavimentação e pela amizade de muitos anos.

Ao Professor Dr. Dario Cardoso de Lima, pelo apoio dado a esta pesquisa.

Ao Professor Dr. Geraldo Luciano de Oliveira Marques, pelo suporte e auxílio na execução e compreensão dos ensaios, sendo sempre solícito.

Ao Engenheiro Cássio Alberto Teoro do Carmo, pela amizade e boa vontade de sempre em transmitir seus conhecimentos durante todo desenvolvimento desta pesquisa.

A todo pessoal do Laboratório de Engenharia Civil e do Departamento de Engenharia Civil, em especial, Dr. Giovani, Wellington, Jorge, Leonício, Marcelo, Carlos, Eduardo, Cilene e Tiago, pela amizade, solicitude, pelas conversas e brincadeiras que tornaram esse processo muito mais agradável.

Ao Professor Paulo Sérgio de Almeida Barbosa e à minha grande amiga Beatryz, que no decorrer do mestrado me deram suporte nos momentos difíceis, cada um a sua maneira, sempre me incentivando a seguir em frente.

Aos meus colegas da pós, em especial, Mário e Juliana, por tornarem essa jornada muito mais divertida, por todo o companheirismo, amizade e ajuda.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, e também aos externos, por todo o conhecimento transmitido e disposição em ensinar.

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

À agência de fomento CAPES, pela bolsa concedida e todo o investimento empreendido na realização desta pesquisa.

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

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	vii
LISTA DE TABELAS.....	ix
RESUMO.....	x
ABSTRACT.....	xii
CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO GERAL	1
1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
2. JUSTIFICATIVA.....	3
3. OBJETIVOS.....	5
3.1. Objetivo geral.....	5
3.2. Objetivos específicos.....	5
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	6
CAPÍTULO 2. MATERIAIS E MÉTODOS EMPREGADOS NO DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA	8
1. MATERIAIS	8
1.1. Agregados minerais.....	8
1.2. Ligante asfáltico	8
1.3. Geogrelhas.....	9
2. MÉTODOS.....	9
2.1. Programa experimental	10
2.1.1. Considerações iniciais	10
2.1.2. Caracterização dos agregados minerais.....	10
2.1.3. Caracterização do ligante asfáltico.....	10
2.1.4. Composição granulométrica das misturas asfálticas	11
2.1.5. Dosagem das misturas asfálticas	11
2.1.6. Moldagem dos corpos de prova	12
2.1.7. Ensaio mecânicos.....	13
2.2. Análise empírico-mecânica	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	16
CAPÍTULO 3. PARÂMETROS MECÂNICOS DE DOIS TIPOS DISTINTOS DE REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS REFORÇADOS PELA INSERÇÃO DE GEOGRELHA	18
1. INTRODUÇÃO	19
2. MATERIAIS E MÉTODOS	22
2.1. Materiais.....	22
2.2. Métodos.....	23
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	24

3.1. Composições granulométricas de projeto	24
3.2. Dosagem <i>Marshall</i>	25
3.3. Parâmetros mecânicos	25
3.3.1. Ensaios de Estabilidade <i>Marshall</i> , Resistência à Tração por Compressão Diametral e Módulo de Resiliência	26
3.3.2. Ensaio de Fadiga à Tensão Controlada	30
3.3.3. Ensaio de <i>Creep</i> Estático.....	34
4. CONCLUSÃO	37
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	39

CAPÍTULO 4. INFLUÊNCIA DE DIFERENTES TIPOS DE GEOGRELHAS EM PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MISTURAS ASFÁLTICAS A QUENTE

1. INTRODUÇÃO	43
2. MATERIAIS E MÉTODOS	46
2.1. Materiais	46
2.2. Métodos	47
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
3.1. Caracterização dos agregados	49
3.2. Caracterização do ligante asfáltico.....	50
3.3. Composições granulométricas de projeto.....	51
3.4. Dosagem das misturas asfálticas	52
3.5. Ensaios mecânicos.....	52
4. CONCLUSÃO	59
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60

CAPÍTULO 5. ANÁLISE ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS COM DIFERENTES REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS REFORÇADOS POR GEOGRELHAS.....

1. INTRODUÇÃO	64
2. MATERIAIS E MÉTODOS	67
2.1. Materiais	67
2.2. Métodos	68
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	71
3.1. Caracterização dos agregados	71
3.2. Caracterização do ligante asfáltico.....	72
3.3. Composições granulométricas de projeto.....	72
3.4. Dosagem das misturas asfálticas	73
3.5. Ensaios Mecânicos de Resistência à Tração por Compressão Diametral e Módulo de Resiliência.....	74
3.6. Análises empírico-mecanísticas	74

4. CONCLUSÃO	82
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83
CAPÍTULO 6. CONCLUSÕES GERAIS	86

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 2

Figura 1: Área da coleta dos agregados – pedreira Ervália Ltda.	8
Figura 2: Geogrelhas usadas na pesquisa: (a) Fibra de Vidro; (b) Poli álcool vinílico; (c) Poliéster.....	9
Figura 3: Limites das faixas granulométricas de serviço B e C para concreto betuminoso usinado a quente.....	11
Figura 4: Corpos de prova com a inserção de geogrelha: (a) Faixa C; (b) Faixa B.....	12
Figura 5: Estrutura de pavimento-tipo adotada para análises estruturais e eixo de coordenadas de referência.....	15

CAPÍTULO 3

Figura 1: Geogrelha empregada na pesquisa.	22
Figura 2: Curvas granulométricas de projeto.	25
Figura 3: Geogrelha aderida à mistura asfáltica a quente	26
Figura 4: Resultados de Resistência à Tração por Compressão Diametral das misturas asfálticas estudadas	28
Figura 5: Resultados de Módulo de Resiliência das misturas asfálticas estudadas	28
Figura 6: Resultados de Estabilidade <i>Marshall</i> das misturas asfálticas estudadas	28
Figura 7: Vida de Fadiga (Nf) das misturas asfálticas estudadas (com e sem geogrelha) em função da diferença de tensões ($\Delta\sigma$) na ruptura.....	31
Figura 8: Coeficientes do modelo matemático de vida de fadiga das misturas estudadas: (a) Coeficiente k_1 ; (b) Coeficiente k_2	33
Figura 9: Deformação plástica <i>versus</i> tempo dos corpos de prova das misturas asfálticas estudadas (com e sem geogrelha).....	34
Figura 10: Deformações plásticas geradas no ensaio de Creep <i>Estático</i> : (a) Máxima; (b) Final.	36

CAPÍTULO 4

Figura 1: Geogrelhas usadas na pesquisa: (a) Fibra de Vidro; (b) Poli álcool vinílico; (c) Poliéster.....	47
Figura 2: Análise granulométrica dos agregados minerais.	50
Figura 3: Curva granulométrica de projeto e limites Faixa B.....	51
Figura 4: Curva granulométrica de projeto e limites Faixa C.....	51
Figura 5: Geogrelha aderida à mistura asfáltica a quente	53
Figura 6: Resultados de Estabilidade <i>Marshall</i> das misturas asfálticas pesquisadas nas quatro condições propostas, para cada uma das faixas B e C.....	54
Figura 7: Resultados de Resistência à Tração por Compressão Diametral das misturas asfálticas pesquisadas nas quatro condições propostas, para cada uma das faixas B e C	54
Figura 8: Resultados de Módulo de Resiliência das misturas asfálticas pesquisadas nas quatro condições propostas, para cada uma das faixas B e C.....	54

Figura 9: Valores de rigidez das geogrelhas estudadas na ruptura ($E_{ruptura}$) e para 2% de deformação ($E_{2\%}$)	56
Figura 10: Corpo de prova reforçado com geogrelha moldado pelo compactador <i>Marshall</i>	57

CAPÍTULO 5

Figura 1: Corpo de prova reforçado com geogrelha	69
Figura 2: Estrutura de pavimento-tipo adotada para análises estruturais e eixo de coordenadas de referência	70
Figura 3: Análise granulométrica dos agregados minerais.	72
Figura 4: Curva granulométrica de projeto e limites Faixa B	73
Figura 5: Curva granulométrica de projeto e limites Faixa C	73
Figura 6: Tensões horizontais de tração (+) e compressão (-) na estrutura de pavimento-tipo analisado para a condição não reforçada do revestimento asfáltico Faixa C: $Q_1=80$ kN e $P_1=563$ kPa	75
Figura 7: Tensões horizontais de tração (+) e compressão (-) na estrutura de pavimento-tipo analisado para a condição reforçada com geogrelha GEO 1 (FV) do revestimento asfáltico Faixa C: $Q_1=80$ kN e $P_1=563$ kPa	76
Figura 8: Tensões horizontais de tração máximas atuantes na fibra inferior da camada de revestimento (misturas asfálticas Faixa B) e correspondente resistência à tração por compressão diametral (RT) para cada condição pesquisada	76
Figura 9: Tensões horizontais de tração máximas atuantes na fibra inferior da camada de revestimento (misturas asfálticas Faixa C) e correspondente resistência à tração por compressão diametral (RT) para cada condição pesquisada	76
Figura 10: Razões $RT/\sigma_{hmáx}$ para revestimentos asfálticos Faixa B	77
Figura 11: Razões $RT/\sigma_{hmáx}$ para revestimentos asfálticos Faixa C	78
Figura 12: Deflexões verticais recuperáveis na estrutura do pavimento-tipo analisado com revestimento asfáltico Faixa C não reforçado: $Q_1=80$ kN e $P_1=563$ kPa	80
Figura 13: Deflexões verticais recuperáveis na estrutura do pavimento-tipo analisado com revestimento asfáltico Faixa C reforçado com geogrelha GEO 3 (PET): $Q_1=80$ kN e $P_1=563$ kPa	80
Figura 14: Deflexões verticais recuperáveis máximas e admissíveis (para $N=5.10^7$ solicitações) comparadas para as condições de reforço do revestimento asfáltico Faixa B	81
Figura 15: Deflexões verticais recuperáveis máximas e admissíveis (para $N=5.10^7$ solicitações) comparadas para as condições de reforço do revestimento asfáltico Faixa C	81

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 2

Tabela 1: Propriedades e características básicas fornecidas pelo fabricante das três geogrelhas analisadas	9
Tabela 2: Ensaio de caracterização dos agregados minerais.	10
Tabela 3: Ensaio de caracterização do ligante asfáltico	11
Tabela 4: Ensaio para caracterização mecânica das misturas asfálticas pesquisadas....	14

CAPÍTULO 3

Tabela 1: Propriedades e características fornecidas pelo fabricante da geogrelha empregada na pesquisa.....	23
Tabela 2: Ensaio para caracterização mecânica das misturas asfálticas pesquisadas....	24
Tabela 3: Parâmetros volumétricos da dosagem <i>Marshall</i> para a mistura de projeto Faixa B	25
Tabela 4: Parâmetros volumétricos da dosagem <i>Marshall</i> para a mistura de projeto Faixa C	25
Tabela 5: Resultados dos ensaios mecânicos realizados.....	26
Tabela 6: Parâmetros do modelo matemático do ensaio de fadiga obtidos através do ajuste dos dados experimentais.	31
Tabela 7: Parâmetros obtidos nos ensaios de <i>Creep</i> estático das misturas asfálticas com e sem geogrelha.....	35

CAPÍTULO 4

Tabela 1: Propriedades e características básicas fornecidas pelo fabricante das três geogrelhas analisadas	47
Tabela 2: Ensaio de caracterização dos agregados minerais.	48
Tabela 3: Ensaio de caracterização do ligante asfáltico	48
Tabela 4: Ensaio para caracterização mecânica das misturas asfálticas.....	49
Tabela 5: Resultados dos ensaios de caracterização dos agregados minerais.....	50
Tabela 6: Resultados dos ensaios de caracterização do ligante asfáltico.....	51
Tabela 7: Parâmetros volumétricos da dosagem <i>Marshall</i> para as misturas asfálticas de projeto	52
Tabela 8: Resultados dos ensaios mecânicos realizados sobre as misturas asfálticas pesquisadas.....	52

CAPÍTULO 5

Tabela 1: Propriedades e características básicas fornecidas pelo fabricante das três geogrelhas analisadas	68
Tabela 2: Ensaio de caracterização dos agregados minerais.	68
Tabela 3: Ensaio de caracterização do ligante asfáltico	68
Tabela 4: Resultados dos ensaios de caracterização dos agregados minerais.....	71
Tabela 5: Resultados dos ensaios de caracterização do ligante asfáltico.....	72
Tabela 6: Parâmetros volumétricos obtidos através da dosagem <i>Marshall</i> para as misturas asfálticas de projeto	73
Tabela 7: Resultados dos ensaios mecânicos.	74

RESUMO

PEREIRA, Géssica Soares, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2019. **Análise do comportamento mecânico de misturas asfálticas a quente reforçadas com geogrelhas.** Orientador: Heraldo Nunes Pitanga. Coorientadores: Taciano Oliveira da Silva e Dario Cardoso de Lima.

Esta pesquisa teve por objetivo principal analisar o comportamento mecânico de misturas asfálticas a quente densas reforçadas com geogrelhas, avaliando-se o efeito da inserção destes elementos geossintéticos, mediante análise comparativa com misturas asfálticas não reforçadas, e sua influência no desempenho de uma estrutura de pavimento-tipo, mediante simulações em programa computacional. O programa experimental incluiu a caracterização dos agregados minerais e do ligante asfáltico CAP 50/70 e a dosagem das misturas asfálticas (faixas B e C do DNIT) através do método *Marshall*. Definidas as misturas asfálticas de projeto, foram moldados corpos de prova sem e com a inserção de três geogrelhas para pavimentação com as seguintes matérias-primas: poli álcool vinílico (PVA), poliéster (PET) e fibra de vidro. A análise do efeito da inserção das geogrelhas nas propriedades mecânicas das misturas asfálticas foi baseada nos ensaios de Estabilidade *Marshall*, Resistência à Tração por Compressão Diametral, Módulo de Resiliência, Fadiga à Tensão Controlada e *Creep* Estático. Além disso, um total de 24 análises empírico-mecanísticas foi realizado, utilizando-se o programa *me-PADS*, variando-se os tipos de revestimento asfáltico (reforçados com três geogrelhas e não reforçados), para as duas faixas de serviço mencionadas, em uma estrutura de pavimento-tipo pré-dimensionada. De um modo geral, os resultados mostraram uma tendência de incremento das propriedades mecânicas das misturas reforçadas comparativamente às convencionais. Para o cenário que envolveu a avaliação do comportamento em fadiga, esse incremento mostrou-se dependente do nível de solicitações aplicadas, constatando-se que, para níveis de tensão mais baixos, as misturas com geogrelha foram capazes de resistir a um maior número de ciclos de carregamento na ruptura do que as misturas sem geogrelha. Nos demais ensaios mecânicos, os resultados realçaram a habilidade das geogrelhas em restringir, comparativamente à mistura não reforçada, os mecanismos de ruptura mecânica por tração e por compressão. Em relação à análise estrutural, os revestimentos reforçados com as geogrelhas apresentaram maiores níveis de tensão de tração nas fibras inferiores e menores valores de deflexão recuperável quando comparados com as respostas estruturais do pavimento-tipo com camadas de revestimento não reforçadas. Esses resultados, que são reflexo da maior rigidez dos revestimentos reforçados, se mostraram

como satisfatórios apenas para os revestimentos com misturas asfálticas de faixa granulométrica C, onde tal condição indicou uma tendência de maior resistência à ruptura por tração do revestimento. No que se refere às deflexões máximas, para ambos os revestimentos, todas as geogrelhas promoveram uma redução em seus valores, deixando estes ainda mais distantes do valor de deflexão admissível definido por norma comparativamente aos revestimentos não reforçados.

ABSTRACT

PEREIRA, G  ssica Soares, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2019. **Analysis of the mechanical performance of hot asphalt mixtures reinforced with geogrids.** Adviser: Heraldo Nunes Pitanga. Co-advisers: Taciano Oliveira da Silva and Dario Cardoso de Lima.

The main objective of this research was to analyze the mechanical behavior of dense hot asphalt mixtures reinforced with geogrids, evaluating the effect of the insertion of these geosynthetics elements when compared to non-reinforced hot asphalt mixtures and their influence on the performance of a pavement structure through simulations in a computer program. The experimental program included characterization of asphalt mixtures composite materials and design of asphalt mixtures within the DNIT service specification's gradation bands B and C using Marshall mix design method. Then, test specimens were molded with the insertion of three geogrids types composed with the following raw materials: polyvinyl alcohol (PVA), polyester (PET) and glass fiber and without geogrid reinforcement. The analysis of the geogrid insertion effect on the mechanical properties of the asphalt mixtures was based on the following tests: Marshall Stability tests, Tensile Resistance (Brazilian Test), Resilient Modulus tests, Fatigue tests and Static Creep tests. Further, a total of 24 mechanistic-empirical analysis were performed on a pre-designed pavement structure using me-PADS program, varying the asphalt overlayer types (reinforced with three geogrids types and non-reinforced) for the two gradation bands adopted in this study. In general, the results pointed an increase in the mechanical properties analyzed in laboratory due to the geogrid insertion when compared to those of the conventional asphalt mixtures. However, it was found that the fatigue behavior is dependent on the applied load and for lower stress levels, the hot asphalt mixtures reinforced with geogrid were able to withstand a greater number of load cycles to failure than the hot asphalt mixtures without reinforcement. Concerning the others mechanical tests, the results emphasized the capability of the geogrids to restrict the traction and compression failure mechanisms in comparison to the non-reinforced mixtures. Regarding the structural analysis, the geogrid-reinforced asphalt overlayer presented higher tensile stress levels in the lower fibers and lower values of recoverable deflections when compared to the structural responses of the non-reinforced asphalt overlayer. These results reflected an increase in stiffness of the reinforced asphalt overlayer and proved to be satisfactory only for asphalt mixtures designed within the gradation band C which exhibited a higher

tensile strength to failure. Geogrid insertions have reduced the maximum deflections in both types of asphalt surface courses, keeping them even more distant from the maximum permissible deflection values when compared to those for non-reinforced asphalt overlays.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO GERAL

1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A densidade da malha rodoviária pavimentada brasileira é ainda muito pequena, principalmente quando comparada com a malha rodoviária de outros países que apresentam uma dimensão territorial próxima à do Brasil. De acordo com pesquisas, são aproximadamente 25 km de rodovias pavimentadas para cada 1000 km² de área, o que equivale a apenas 12,3% da extensão rodoviária nacional (CNT, 2016).

A maioria dos pavimentos rodoviários no Brasil apresenta predominantemente em sua estrutura o revestimento asfáltico. Pelo fato de receber de maneira direta as ações do tráfego e do clima, esta camada é considerada a mais nobre do pavimento (OLIVEIRA, 2014).

Segundo Al-Mistarehi (2014), o propósito do projeto de misturas asfálticas consiste no proporcionamento de agregados e ligante asfáltico para que tal mistura seja empregada como camada de revestimento de pavimentos. Gigante (2007) afirma que o objetivo de uma mistura asfáltica é combinar agregados, ligante asfáltico e volume de vazios de forma a se obter resistência, flexibilidade e durabilidade.

De acordo com Ahmedzade e Sengoz (2009), os agregados funcionam como esqueleto estrutural do pavimento e suas propriedades influenciam de maneira direta e significativa no desempenho final do mesmo. O cimento asfáltico atua como a cola da mistura asfáltica.

As misturas asfálticas possuem alta sensibilidade à variação do teor de ligante asfáltico. Em vista desse fato, um controle rigoroso do método de dosagem é imprescindível (BERNUCCI et al., 2008). No que se refere à dosagem de misturas asfálticas a quente, no Brasil, o método mais difundido é o *Marshall*. Este método de dosagem foi desenvolvido no final da década de 1930 pelo engenheiro Bruce G. Marshall e consiste em compactar, por impacto, as amostras de misturas asfálticas.

Em relação à expansão da malha rodoviária pavimentada, que conta predominantemente com revestimentos compostos por essas misturas asfálticas, de acordo com a Pesquisa CNT de Rodovias (CNT, 2016), tal expansão não acompanha o

ritmo do crescimento da frota de veículos, e as condições de grande parte das rodovias são precárias, o que gera prejuízos aos transportadores, com o consumo desnecessário de combustível. Segundo CEL e CNT (2002), como no Brasil o transporte de cargas é altamente dependente do modal rodoviário, o desempenho desse modal acaba, consequentemente, sendo prejudicado.

Mascarenhas et al. (2016) apontam o meio rodoviário como o responsável por grande parte do transporte de pessoas e bens econômicos. Com o desenvolvimento do mercado e a construção de estradas para ligação de grandes polos comerciais, é possível observar um aumento do volume de tráfego, das cargas rodantes e, consecutivamente, o aumento da pressão de inflação dos pneus. Tal fato pode trazer, como consequência, a redução significativa da vida útil das vias que deveriam se manter íntegras durante o período de projeto adotado.

Apesar de, nos últimos anos, ocorrerem diversos incentivos financeiros para a compra de novos veículos, aumentando de maneira considerável a frota brasileira, os incentivos em infraestrutura não cresceram na mesma proporção. Dessa maneira, desenvolveram-se problemas no setor viário e um aumento na deterioração dos pavimentos urbanos (RAMOS e FONTENELE, 2016).

Neste cenário, a implementação de soluções inovadoras para a engenharia rodoviária, de maneira que se reduzam os recursos exigidos na área de infraestrutura de transportes e que resultem em pavimentos de maior durabilidade, faz-se necessária ao desenvolvimento do modal.

Segundo Bastos (2010), o crescimento constante da frota de veículos automotores, especialmente dos veículos de carga que cada vez mais apresentam maior capacidade de transportar cargas pesadas, em conjunto com o excesso de carga e com os defeitos envolvidos nas práticas de restauração, tem resultado em uma procura por materiais que auxiliem no aumento da vida útil dos pavimentos, desempenhando, de maneira efetiva, a função de elemento de reforço destes.

Uma das tecnologias disponíveis para controlar ou reduzir o surgimento de patologias, como fadiga precoce do pavimento ou trilhas de roda, corresponde aos geossintéticos empregados como elemento de reforço, mais precisamente as geogrelhas, por serem materiais que apresentam elevada rigidez (KAKUDA et al., 2011).

Atualmente, com o desenvolvimento dos geossintéticos, as geogrelhas, principalmente, têm sido utilizadas com sucesso para reforço de pavimentos asfálticos novos e restaurados (recapeados). As geogrelhas proporcionam uma alta resistência à

tração dentro da capa asfáltica, complementando as propriedades mecânicas da mistura asfáltica (CARMO et al., 2015).

Nas pesquisas de Sam-Deok e Dae-Young (2011), nas quais foram realizadas avaliações de desempenho de estruturas de pavimentos asfálticos, os autores obtiveram resultados em que a estrutura de pavimento asfáltico reforçada com geossintéticos apresentou um aumento significativo na resistência à formação de trincas em relação ao pavimento asfáltico não reforçado, e, ainda, o desenvolvimento de deformações e afundamentos por trilha de rodas ocorreu de forma mais lenta, aumentando a vida útil do pavimento.

Neste contexto, é justificável o desenvolvimento de pesquisas que proponham a otimização do desempenho de estruturas de pavimentos asfálticos, ou seja, que resultem em pavimentos economicamente viáveis, de alta resistência e elevada durabilidade, que sejam capazes de acompanhar o crescimento e o desenvolvimento da frota de veículos no Brasil.

2 JUSTIFICATIVA

Convencionalmente, a proposta de inserção de geogrelha na camada de revestimento asfáltico visa o desenvolvimento de uma camada estrutural com maior capacidade resistiva frente às solicitações impostas pelo tráfego de veículos.

Segundo Carmo et al. (2014), as geogrelhas empregadas para reforço de pavimento asfáltico, cuja principal função consiste em reforçar as novas capas asfálticas, aumentando a resistência à tração, ocasionam uma melhoria nas respostas mecânicas dessas camadas estruturais frente às tensões de tração de longa duração e fornecem uma componente elástica que melhora a distribuição de tensões, inibindo a propagação de trincas.

Além disso, o uso da geogrelha como solução para que sejam minimizadas patologias em pavimentos asfálticos tem-se mostrado bastante eficiente, fato que justifica o desenvolvimento de pesquisas envolvendo o emprego de geogrelhas juntamente com as misturas asfálticas. De acordo com Bastos (2010), as geogrelhas têm sido utilizadas para o tratamento do trincamento por fadiga desde 1950, de maneira que, quando instaladas entre uma camada asfáltica que apresenta trincas e uma camada asfáltica sobrejacente de recapeamento, constituem uma barreira à propagação de

trincas de reflexão, pois apresentam elevada rigidez, sendo um material com capacidade de resistir aos esforços de tração mais elevados.

Segundo Vertematti (2015), a grande vantagem no uso de geossintéticos, mais especificamente as geogrelhas, consiste em prover confiabilidade adicional para um desempenho adequado do pavimento restaurado, em situações em que as técnicas convencionais não são capazes de oferecer garantias, a menos que impliquem em elevados custos.

Como a realidade brasileira conta com uma baixíssima percentagem de vias pavimentadas e a situação daquelas que são pavimentadas é extremamente precária, a proposta de pesquisa aqui apresentada se faz justificável, em vista da necessidade de busca de soluções técnicas adequadas para esses problemas.

Adicionalmente, Correia (2014) afirma que, apesar do uso de geossintéticos em camadas asfálticas ter demonstrado benefícios estruturais para os pavimentos, pesquisas são necessárias para a compreensão dos mecanismos de reforço que governam o comportamento dos geossintéticos nas camadas asfálticas. Portanto, a presente pesquisa, que propõe analisar o efeito da inserção de geogrelhas no comportamento mecânico de misturas asfálticas, visa contribuir para o avanço na compreensão técnico-científica de tais mecanismos.

Além disso, como o aumento constante do tráfego tem resultado em uma redução da vida útil do pavimento para um período de projeto determinado, acredita-se que isso pode ser evitado se inicialmente for executada uma estrutura com maior capacidade resistiva. De acordo com Morilha (2004), como a camada que sofre maior influência da ação das cargas do tráfego é o revestimento, tem-se empregado a geogrelha em pavimentos com o objetivo de fornecer um incremento na vida útil de tais revestimentos e atuar como verdadeiro elemento de reforço.

Em relação a este emprego de geossintéticos em camadas asfálticas, Correia e Zornberg (2018) afirmam que as evidências dos benefícios do reforço, proporcionados por geossintéticos em camadas asfálticas, estão focadas em reduzir a reflexão de trincas. Entretanto, eles expõem que, através do uso de geogrelhas em camadas asfálticas, é esperado o desenvolvimento de mecanismos de reforços adicionais a essas camadas, que contribuam na capacidade estrutural dos pavimentos. Os autores ainda ressaltam que pesquisas envolvendo geossintéticos reforçando camadas asfálticas, até então, são limitadas. Enquanto avanços relevantes têm sido obtidos na identificação dos mecanismos de reforço dos geossintéticos na estabilização de camadas de base, em

camadas asfálticas tais mecanismos podem ser distintos. Dessa forma, a realização desta pesquisa, que propõe analisar a inserção de geogrelhas em camadas novas de revestimento asfáltico, é coerente.

Neste contexto, o uso de um revestimento reforçado com geogrelha pode constituir uma solução técnico-economicamente adequada, desde que o seu desempenho seja, no mínimo, equivalente ao de um revestimento convencional e desde que o custo dessa solução seja menor do que o correspondente ao emprego de uma camada de revestimento de maior espessura. Salienta-se, porém, que a análise econômica pertinente a essa solução não será objetivo dessa pesquisa.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo geral

O presente trabalho teve como objetivo geral analisar o comportamento mecânico de misturas asfálticas a quente densas reforçadas com geogrelhas, avaliando-se o efeito da inserção destes elementos geossintéticos, mediante análise comparativa com misturas asfálticas não reforçadas, e sua influência no desempenho de uma estrutura de pavimento-tipo, mediante simulações em programa computacional.

3.2 Objetivos específicos

Visando alcançar o objetivo geral desta pesquisa, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Analisar o comportamento de misturas asfálticas a quente derivadas da aplicação do método de dosagem *Marshall*, a partir do qual foram elaboradas misturas com composições granulométricas enquadradas nas faixas granulométricas B e C da ES 031 (DNIT, 2006) combinadas com cimento asfáltico de petróleo (CAP 50/70);
- Avaliar, de maneira comparativa, o comportamento mecânico das misturas asfálticas com a incorporação de uma geogrelha de poliéster (misturas asfálticas reforçadas) e sem o elemento de reforço (misturas asfálticas simples), através

dos seguintes ensaios: resistência à tração por compressão diametral, módulo de resiliência, fadiga e deformação permanente (*creep* estático);

- Analisar as diferenças de comportamento mecânico de misturas asfálticas a quente, a partir de ensaios de laboratório de resistência à tração por compressão diametral e módulo de resiliência, sendo estas misturas reforçadas por três geogrelhas para pavimentação, constituídas dos seguintes materiais: poliéster, poli álcool vinílico e fibra de vidro;
- A partir de estruturas tipo de pavimentos flexíveis propostas, analisar, por meio de uma ferramenta computacional de análise estrutural, os seus respectivos desempenhos estruturais, considerando-se revestimentos asfálticos constituídos por misturas asfálticas reforçadas com geogrelhas de poliéster, poli álcool vinílico e fibra de vidro e por misturas asfálticas não reforçadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMEDZADE, P.; SENGOZ, B. *Evaluation of steel slag coarse aggregate in hot mix asphalt concrete*. Journal of Hazardous Materials, v. 165, p. 300 – 305, 2009.

AL-MISTAREHI, B. *Superpave System versus Marshall Design procedure for Asphalt Paving Mixtures - Comparative Study*. Global Journal of Researches in Engineering: G Industrial Engineering. v.14, n. 5, p. 1- 9, 2014.

BASTOS, G.A. *Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas Reforçadas com Geogrelhas para Pavimentos Flexíveis*. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. Rio de Janeiro. 247 p, 2010.

BERNUCCI, L.B.; MOTTA, L.M.G.; CERATTI, J.A.P.; SOARES, J.B. *Pavimentação asfáltica – Formação básica para engenheiros*. PETROBRÁS: ABEDA. Rio de Janeiro. 475p, 2008.

CARMO, C.A.T., RUIZ, E.F.; MONSTESTRUQUE, G. *Restauração de pavimentos aeroportuários sulamericanos com geogrelha de poliéster*. 43ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPv) e 17º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR). Foz do Iguaçu/PR. Anais CD-ROM, 2015.

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). Maceió/AL. Anais CD-ROM, 2014.

CENTRO DE ESTUDOS EM LOGÍSTICA (CEL); CONFEDERAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES (CNT). (2002). *Transporte de carga no Brasil: ameaças e oportunidades para o desenvolvimento do país*. Rio de Janeiro, set. 2002. Disponível em: <<http://www.coppe.ufrj.br>>. Acesso em: 2 out 2017

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES. (2016) *Pesquisa CNT de Rodovias 2016*. Relatório Gerencial. Brasília/DF. 402 p.

CORREIA, N. S. *Desempenho de pavimentos flexíveis utilizando geogrelha como reforço de capa asfáltica*. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos/SP. 205 p. 2014.

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

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

GIGANTE, A. C. *Avaliação da suscetibilidade térmica e do efeito das condições ambientais no enrijecimento de misturas asfálticas densas à luz de seus comportamentos resilientes*. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo. 169p, 2007.

KAKUDA, F.M.; PARREIRA, A.B.; FABBRI, G.T.P. *Análise de um pavimento reforçado com geossintético a partir de resultados de ensaios em equipamento de grandes dimensões*. Transportes. v. 19, n. 3, p. 28-34, 2011.

MASCARENHAS, Z; LOPES, M; GASPAR, M; VASCONCELOS, K; BERNUCCIL. L.B. *Dosagem de mistura do tipo Large Stone Asphalt Mixture pelo compactador giratório Superpave*. XXX Congresso Nacional de Pesquisa em Transporte da ANPET. Rio de Janeiro. Anais de 2016, 2016.

MORILHA, J. 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. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis/SC. 185p, 2004.

OLIVEIRA, J. R. *Influência dos métodos de compactação Marshall e Superpave no desempenho de misturas asfálticas*. Portal CREA digital. 2014 Disponível em: <<http://www.creadigital.com.br/portal?txt=317731383230>>. Acesso em: 30 de julho, 2017.

RAMOS, C.M; FONTENELE H.B. *Avaliação de pavimentos com uma escala visual*. XXX Congresso Nacional de Pesquisa em Transporte da ANPET. Rio de Janeiro. Anais de 2016, 2016.

SAM-DEOK, C.; DAE-YOUNG, L. *Performance Evaluation of asphalt pavement reinforced with glass fiber sheet type of geosynthetics*. Korean Geosynthetics Society. v. 10, n. 3, p.1-8, 2011.

VERTEMATTI, J. C. *Manual Brasileiro de Geossintéticos*. CTG-ABINT. São Paulo. 570p, 2015.

CAPÍTULO 2

MATERIAIS E MÉTODOS EMPREGADOS NO DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

1 MATERIAIS

1.1 Agregados minerais

Os agregados graúdos e miúdo utilizados nas misturas asfálticas desta pesquisa foram: brita 1, brita 0 e pó de pedra. Tais agregados apresentam origem gnáissica e são provenientes da pedreira Ervália Ltda. (Figura 1), localizada no município de Ervália-MG.

Figura 1: Área da coleta dos agregados – pedreira Ervália Ltda.



Fonte: (Autoria própria, 2016).

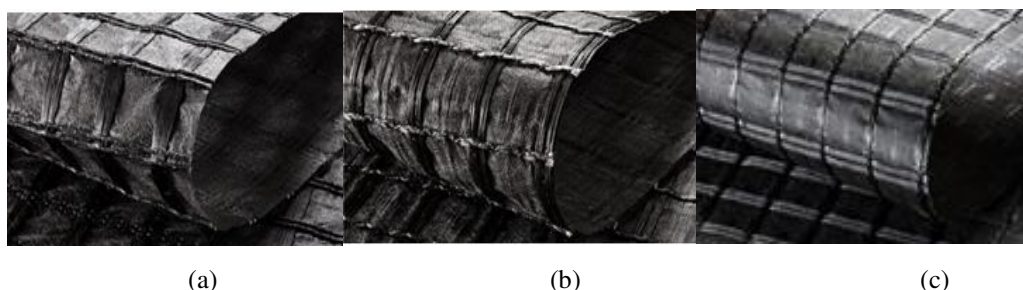
1.2 Ligante asfáltico

Na presente pesquisa, foi empregado o ligante asfáltico convencional CAP 50/70, oriundo da Refinaria Gabriel Passos (REGAP), localizada no município de Betim-MG, fornecido pela empresa Stratura Asfaltos S. A.

1.3 Geogrelhas

As geogrelhas avaliadas neste trabalho, apresentadas na Figura 2, são produzidas para reforço de camadas asfálticas, fabricadas a partir de filamentos poliméricos e aderidas a um geotêxtil não tecido ultraleve, sendo estes compostos cobertos por um material betuminoso. Os três tipos de geogrelhas analisadas são: fibra de vidro (FV), poliálcool vinílico (PVA) e de poliéster (PET). Tais geogrelhas foram fornecidas pela HUESKER Ltda., localizada em São José dos Campos-SP. As características tecnológicas destas geogrelhas, fornecidas pelo fabricante, são apresentadas na Tabela 1.

Figura 2: Geogrelhas usadas na pesquisa: (a) Fibra de Vidro; (b) Poli álcool vinílico; (c) Poliéster.



Fonte: (Huesker, 2018).

Tabela 1: Propriedades e características básicas fornecidas pelo fabricante das três geogrelhas analisadas

Propriedade	Geogrelha de Fibra de Vidro (FV)	Geogrelha de Poliálcool vinílico (PVA)	Geogrelha de Poliéster (PET)
Resistência à tração	64,6 kN/m	54,9kN/m	53,6 kN/m
Deformação na ruptura	2,4%	5,9%	9,3%
Resistência a 2% de deformação	56,48 kN/m	15,9 kN/m	12,2 kN/m
Resistência a 3% de deformação	-	23,2 kN/m	15,4 kN/m
Abertura da malha nominal	30 mm x30 mm	40 mm x40 mm	40 mm x40 mm

2 MÉTODOS

A presente pesquisa foi subdividida em duas etapas: uma primeira, referente ao programa experimental em ambiente de laboratório, e uma segunda etapa, na qual foi utilizado um programa computacional para realização de análises empírico-mecanísticas.

2.1 Programa experimental

2.1.1 Considerações iniciais

Nesta etapa, foram produzidas misturas asfálticas enquadradas em duas faixas granulométricas de serviço e empregando-se o método de dosagem *Marshall*. Tais misturas foram estudadas comparativamente, analisando-se misturas simples (sem reforço) e misturas reforçadas pela inserção de três geogrelhas para pavimentação.

Todos os ensaios e procedimentos envolvidos nesta pesquisa foram executados no Laboratório de Materiais Asfálticos e Misturas (LMAM) do Departamento de Engenharia Civil (DEC) da Universidade Federal de Viçosa (UFV), com exceção dos ensaios mecânicos de Módulo de Resiliência, Fadiga e *Creep* Estático, os quais foram realizados no Laboratório de Pavimentação da Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF).

2.1.2 Caracterização dos agregados minerais

A Tabela 2 apresenta os ensaios e as respectivas normas técnicas referentes à caracterização tecnológica dos agregados minerais. A coleta dos agregados foi efetuada de acordo com o procedimento normativo PRO 120 (DNER, 1997a).

Tabela 2: Ensaios de caracterização dos agregados minerais.

Ensaio	Norma
Índice de forma dos agregados graúdos	ME086 (DNER,1994a)
Ensaio de material pulverulento	ME 266 (DNER, 1997b)
Abrasão “ <i>Los Angeles</i> ” dos agregados graúdos	ME 035 (DNER,1998a)
Adesividade dos agregados graúdos ao ligante asfáltico	ME 078(DNER, 1994b)
Absorção dos agregados	ME 081 (DNER,1998b)
Massa específica real e aparente	ME 081 (DNER,1998b)
Massa específica do agregado miúdo	ME 194 (DNER,1998d)
Sanidade dos agregados graúdos	ME 089 (DNER,1994c)
Equivalente de areia	ME 054 (DNER,1997c)
Análise granulométrica dos agregados	ME 083 (DNER,1998c)

2.1.3 Caracterização do ligante asfáltico

Os ensaios realizados para a caracterização do ligante asfáltico convencional CAP 50/70 são apresentados na Tabela 3.

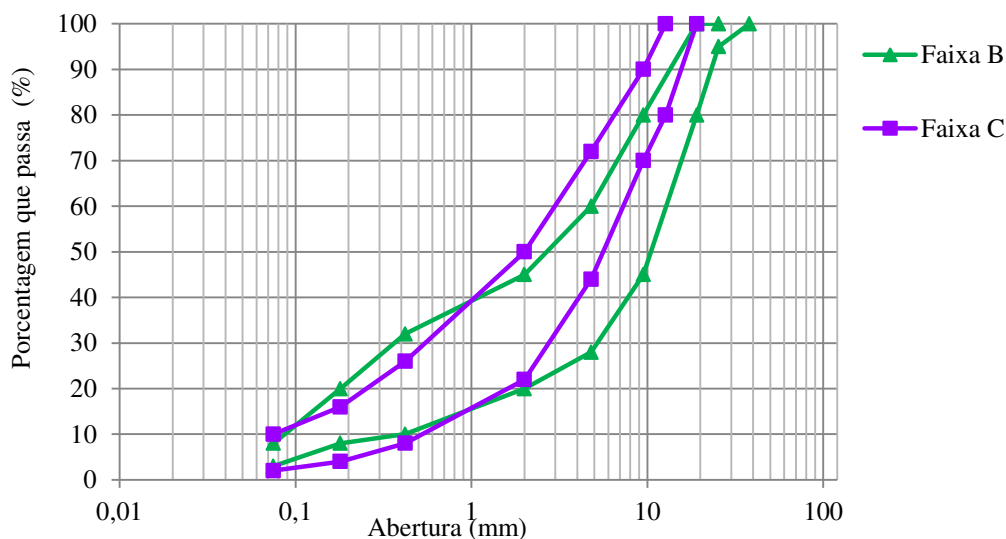
Tabela 3: Ensaios de caracterização do ligante asfáltico

Ensaio	Norma
Massa específica real	ME 009 (DNER, 1998e)
Densidade relativa	ME 009 (DNER, 1998e)
Penetração	ME 155 (DNIT, 2010)
Ponto de fulgor	ME 148 (DNER, 1994d)
Ponto de combustão	ME 148 (DNER, 1994d)
Ponto de amolecimento	ME 131 (DNIT, 2010a)
Solubilidade em Tricloroetileno	NBR 14855 (ABNT, 2002)
Viscosidade <i>Saybolt-Furol</i>	ME 004 (DNER, 1994f)

2.1.4 Composição granulométrica das misturas asfálticas

Para esta pesquisa, foram escolhidas as faixas granulométricas B e C para misturas asfálticas, baseando-se na especificação de serviço ES 031 (DNIT, 2006), utilizada para concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ). Para as faixas selecionadas, foram considerados os seus limites granulométricos, apresentados na Figura 3, visando à composição adequada das misturas de agregados adotadas na pesquisa (granulometrias de projeto).

Figura 3: Limites das faixas granulométricas de serviço B e C para concreto betuminoso usinado a quente



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

2.1.5 Dosagem das misturas asfálticas

A dosagem das misturas asfálticas foi realizada através do método *Marshall*, em vista de este ser um método tradicionalmente empregado no Brasil. Os procedimentos

referentes à dosagem das misturas asfálticas para tal método foram realizados de acordo com as diretrizes propostas pela norma ME 043 (DNER, 1995).

Com as composições granulométricas de projeto definidas, foram testados cinco teores de ligante pelo método *Marshall* e analisado o desempenho de cada mistura asfáltica. Os teores adotados foram de 4,00%, 4,50%, 5,00%, 5,50% e 6,00% para a faixa C, enquanto para a faixa B foram adotados os teores de 4,00%, 4,25%, 4,50%, 4,75% e 5,00%. Tais valores foram selecionados baseando-se em experiências de misturas asfálticas já produzidas no Laboratório de Materiais Asfálticos e Misturas do DEC/UFV.

O valor de 0,50% adotado para variação no teor de ligante na faixa C baseou-se no encontrado em literaturas, como Bernucci et al. (2008), por exemplo. A variação para a faixa B de 0,25% se deu como busca de um refinamento, visando uma otimização dos valores dos parâmetros da dosagem *Marshall*, em vista dos resultados encontrados para a variação de 0,50%. Foram confeccionados três corpos de prova para cada teor.

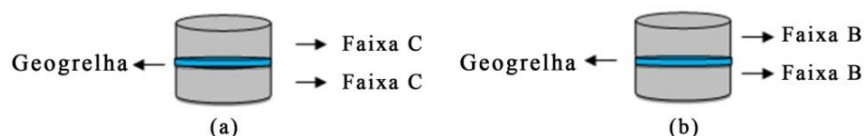
A mistura foi realizada com o ligante a 160°C e os agregados aquecidos a 175°C, sendo estas temperaturas obtidas através da curva de viscosidade-temperatura do ligante asfáltico, conforme recomenda o método de ensaio ME 004 (DNER, 1994e).

A determinação dos teores de projeto de ligante asfáltico se deu com base no critério Vv-RBV, de acordo com os limites máximo e mínimo destes parâmetros impostos pela ES 031 (DNIT,2006) para cada uma das faixas de serviço selecionadas.

2.1.6 Moldagem dos corpos de prova

A preparação dos corpos de prova foi realizada de acordo com a norma PRO 178 (DNIT, 2018a). Foram moldados corpos de prova simples, sem a inserção das geogrelhas, e corpos de prova reforçados com as três geogrelhas, como apresentado na Figura 4.

Figura 4: Corpos de prova com a inserção da geogrelha: (a) Faixa C; (b) Faixa B.



Fonte: (Autoria própria, 2017).

O procedimento de moldagem dos corpos de prova reforçados foi dado na seguinte sequência:

- Pesagem dos agregados e do ligante asfáltico para cada metade do corpo de prova, em recipientes separados, nas quantidades de 50% das frações obtidas nas dosagens de cada faixa (B e C) e 50% dos teores de projeto definidos;
- Aquecimento dos agregados e do ligante asfáltico em estufas separadas, de acordo com os procedimentos da PRO 178 (DNIT, 2018a);
- As misturas asfálticas aquecidas, sejam estas da faixa granulométrica B ou da faixa granulométrica C, referentes à primeira metade dos corpos de prova, foram homogeneizadas separadamente, em seus respectivos recipientes;
- Após a homogeneização, a mistura da primeira metade do corpo de prova retornava para estufa por um intervalo de 2 minutos para que a segunda metade fosse homogeneizada;
- A mistura da segunda metade do corpo de prova era então levada à estufa pelo mesmo intervalo de 2 minutos, enquanto a primeira metade era colocada no molde do compactador *Marshall*;
- Aplicavam-se então 2 golpes com o cilindro compactador com a finalidade de fazer um nivelamento da primeira mistura e, em sequência, inseria-se a geogrelha, recortada no formato cilíndrico do corpo de prova;
- Finalmente, retirava-se a mistura da segunda metade da estufa e esta era depositada no molde do compactador por cima da geogrelha e então era iniciada a compactação com 75 golpes de cada face do corpo de prova.

2.1.7 Ensaios mecânicos

Para a análise das propriedades mecânicas após a compactação das misturas asfálticas realizada através do compactador *Marshall*, foram executados, nos corpos de prova reforçados e nos não reforçados, ensaios de Estabilidade *Marshall*, Resistência à Tração por Compressão Diametral (RT), Módulo de Resiliência (MR), Fadiga à Tensão

Controlada, tendo como critério de ruptura o rompimento total do corpo de prova, e *Creep* Estático, seguindo os procedimentos das normas apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4: Ensaio para caracterização mecânica das misturas asfálticas pesquisadas

Ensaio	Método de Ensaio
Estabilidade <i>Marshall</i>	ME 043 (DNIT, 1995)
RT	ME 136 (DNIT, 2018b)
MR	ME 135 (DNIT, 2018c)
Fadiga	ME 183 (DNIT, 2018d)
<i>Creep</i> Estático	BS 598 111 (BSI, 1995)

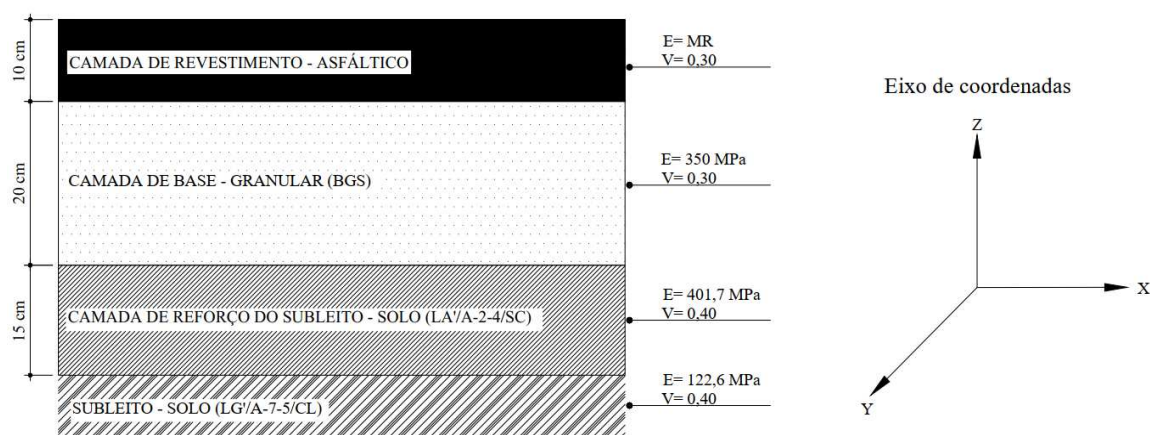
2.2 Análise empírico-mecânica

Para a realização da análise estrutural, foi definida, previamente, uma estrutura de pavimento-tipo, pré-dimensionada de maneira empírica. Para a realização das análises, foi empregado o *Mechanistic Empirical Pavement Analysis and Design Software* (me-PADS), um software capaz de modelar múltiplas camadas e cargas de pavimentos (MAINA, 2008).

As análises, cujo objetivo foi observar o efeito da inserção da geogrelha na camada de revestimento asfáltico no desempenho estrutural do pavimento, foram feitas de modo que a única variável a ser alterada correspondesse às referentes à camada asfáltica nas condições não reforçada e reforçada. Assim, os valores de Módulo de Resiliência, obtidos através dos ensaios de laboratório, para os corpos de prova de ambas as faixas granulométricas estudadas, nas condições sem reforço e com o reforço para as três geogrelhas, foram empregados no software como variável de entrada para a camada asfáltica, realizando-se uma análise elástico-linear, admitindo o Módulo de Resiliência (MR) igual ao Módulo de Elasticidade (E).

Outros dados de entrada adotados nesse software constituíram-se nas propriedades das camadas do pavimento [espessura, Módulo de Elasticidade e coeficiente de Poisson (ν)], localização das cargas e suas magnitudes e coordenadas dos pontos nos quais foram avaliadas as respostas estruturais do pavimento-tipo. A Figura 5 apresenta o pavimento-tipo adotado para as análises de tensões e deformações desta pesquisa.

Figura 5: Estrutura de pavimento-tipo adotada para as análises estruturais e eixo de coordenadas de referência.



Fonte: (Autoria própria, 2019).

Em relação aos parâmetros de entrada empregados, expostos na Figura 5, no que se refere ao coeficiente de Poisson (ν), foi considerada a afirmativa de Ponte et al. (2014) de que, quando não é possível a determinação desse coeficiente, é recomendado que se adote o valor de $\nu=0,30$. Tal valor foi empregado para a camada de revestimento asfáltico e para a camada de base (granular). O valor do Módulo de Elasticidade (E) da camada de base também foi extraído do estudo de Ponte et al. (2014).

Para definição do subleito e reforço do subleito, utilizaram-se as características dos materiais para tais camadas presentes no trabalho de Carmo (1998).

No que se refere ao nível de carregamento, foram empregados três níveis: 80 kN, 98 kN e 118 kN. A seleção de tais níveis foi baseada em algumas premissas: o carregamento de 80 kN (8,2 tf) constitui-se na carga correspondente ao eixo padrão de 18.000 lb, considerada baixa; o valor de 98 kN (10,0 tf) é referente à carga máxima permitida pela legislação brasileira para eixo simples de rodas duplas (ESRD); no que se refere ao carregamento de 118 kN (12,0 tf), tal valor representa uma carga 20% acima da máxima permitida pela referida legislação, sendo 10% o limite de tolerância legal. Ao se adotar uma carga 20% acima da permitida, objetiva-se expor as consequências causadas às estruturas de pavimento quando há excesso de carga nos eixos dos veículos comerciais nas estradas.

De modo semelhante, foram utilizados três níveis correspondentes de pressão de enchimento dos pneus. Para o carregamento de 80 kN, adotou-se uma pressão igual a 563 kPa, que constitui uma pressão-padrão utilizada na pista experimental da AASHTO e normatizada para a determinação da deflexão, de acordo com o método de ensaio ME

024 (DNER, 1994f). Para os carregamentos de 98 kN e 118kN, considerando-se pressões média e alta, respectivamente, foram adotados os valores de 633 kPa e 703 kPa.

Após as análises empírico-mecanísticas, os dados de saída do software *me-PADS* avaliados nesta pesquisa foram: as tensões horizontais atuantes nas fibras inferiores dos revestimentos reforçados e não reforçados e as deflexões recuperáveis máximas.

As deflexões máximas obtidas através do software foram estudadas de maneira comparativa às deflexões admissíveis calculadas segundo o procedimento PRO 011 (DNER, 1979), considerando o nível de carregamento para tráfego pesado ($N = 5 \times 10^7$) apresentado pelo Manual de Pavimentação (DNIT, 2006).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 14855: *Materiais betuminosos – Determinação da solubilidade em tricloroetileno*. Rio de Janeiro, 2002. 5p.

BERNUCCI, L.B.; MOTTA, L.M.G.; CERATTI, J.A.P.; SOARES, J.B. *Pavimentação asfáltica – Formação básica para engenheiros*. PETROBRÁS: ABEDA. Rio de Janeiro. 475p, 2008.

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. 10p. 1995.

CARMO, C.A.T. *A avaliação do módulo de resiliência através de ensaios triaxiais dinâmicos de dois solos compactados e a sua estimativa a partir de ensaios rotineiros*. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos. 131 f, 1998.

DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER – PRO 011/79 – *Avaliação estrutural dos pavimentos flexíveis - Procedimento de ensaio*. Rio de Janeiro. 1979.

_____.DNER- ME 086/94: *Agregado: determinação do índice de forma*. Rio de Janeiro. 1994a.

_____.DNER-ME 078/94: *Agregado graúdo - adesividade a ligante betuminoso*. Rio de Janeiro. 1994b.

_____.DNER-ME 089/94: *Agregados – avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio*. Rio de Janeiro. 1994c.

_____. DNER-ME 148/94: *Material betuminoso – determinação dos pontos de fulgor e de combustão: método de ensaio*. Rio de Janeiro, 1994d.

_____.DNER-ME 004/94:*Material betuminoso – determinação da viscosidade Saybolt-Furol a alta temperatura* (ABNT-MB 571). Rio de Janeiro. 1994e.

_____.DNER-ME 024/94:*Pavimento – determinação das deflexões pela viga Benkelman*. Rio de Janeiro. 1994f.

_____.DNER-ME 043/95: *Misturas betuminosas a quente – Ensaio Marshall para misturas betuminosas*. Rio de Janeiro. 1995.

- _____.DNER-ME 120/97: *Coleta de amostras de agregados*. Rio de Janeiro. 1997a.
- _____.DNER-ME 266/97: *Agregados – determinação do teor de materiais pulverulentos*. Rio de Janeiro. 1997b.
- _____.DNER-ME 054/97: *Equivalente de Areia – Método de ensaio*. Rio de Janeiro. 1997c.
- _____.DNER-ME 035/98: *Agregados: determinação da abrasão “Los Angeles”*. Rio de Janeiro. 1998a.
- _____.DNER-ME 081/98: *Agregados: determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo*. Rio de Janeiro. 1998b.
- _____.DNER-ME 194/98: *Agregados - determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco chapman*. Rio de Janeiro. 1998c.
- _____.DNER-ME 083/98: *Agregado – Análise granulométrica – Método de ensaio*. Rio de Janeiro. 1998d.
- _____.DNER-ME 009/98: *Petróleo e derivados – determinação da densidade – método do densímetro*. Rio de Janeiro. 1998e.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (2006). *DNIT – Manual de Pavimentação*. 3ª Ed. Rio de Janeiro: [s.n.], 2006.
- DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA TERRESTRE. DNIT 031/2006 ES *Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de serviço*. Rio de Janeiro. 2006.
- _____.DNIT ME 155/2010: ME: *Material asfáltico – Determinação da penetração: método de ensaio*. Rio de Janeiro, 2010a.
- _____.DNIT 131/2010: ME: *Materiais asfálticos – Determinação do ponto de amolecimento – Método do anel e bola – Método de ensaio*. Rio de Janeiro. 2010b.
- _____.DNIT 178/2018: ME: *Pavimentação asfáltica – Preparação de corpos de prova para ensaios mecânicos usando o compactador giratório Superpave ou o Marshall – Procedimento*. Rio de Janeiro. 2018a.
- _____.DNIT 136/2018: ME: *Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio*. Rio de Janeiro. 2018b.
- _____.DNIT 135/2018: ME: *Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio*. Rio de Janeiro. 2018c.
- _____.DNIT 183/2018: ME: *Pavimentação asfáltica – Ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada – Método de ensaio*. Rio de Janeiro. 2018d.
- HUESKER Ideen. Ingeniure. Innovationen. *Aplicações e Produtos*. Disponível em: <<http://www.huesker.com.br/>> Acesso em: 15 de novembro, 2018.
- MAINA, J. W.; DENNEMAN, E.; DE BEER, M. *Introduction of new road pavement response modelling software by means of benchmarking*. 27th Annual Southern African Transport Conference. 2008.
- PONTE, R.S.; BRANCO V. T. F. C.; HOLANDA A. S.; SOARES J. S. *Avaliação de diferentes metodologias para obtenção do Módulo de Resiliência de misturas asfálticas*. Transportes, v. 22, n.2, p. 85-94, 2014.

CAPÍTULO 3

PARÂMETROS MECÂNICOS DE DOIS TIPOS DISTINTOS DE REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS REFORÇADOS PELA INSERÇÃO DE GEOGRELHA

RESUMO: Com o desenvolvimento atual dos geossintéticos, as geogrelhas, principalmente, vêm sendo empregadas como reforço de pavimentos asfálticos novos e restaurados. Convencionalmente, a proposta de inserção de geogrelha na camada de revestimento asfáltico visa o desenvolvimento de uma solução em que a capacidade resistiva, frente às solicitações do tráfego, seja superior àquela apresentada por uma solução tradicional sem o emprego do geossintético. Neste aspecto, o objetivo deste trabalho é analisar a influência do reforço da geogrelha no comportamento de misturas asfálticas a quente convencionais. Para tal, foram dosadas misturas asfálticas pelo método *Marshall*, enquadradas em duas faixas granulométricas (faixas B e C da especificação de serviço do DNIT), e moldados corpos de prova com e sem reforço da geogrelha. Os ensaios para análise das propriedades mecânicas, realizados nos corpos de prova reforçados com geogrelha e nos não reforçados, foram de Estabilidade *Marshall*, Resistência à Tração por Compressão Diametral, Módulo de Resiliência, Fadiga e *Creep* Estático. Os resultados apontaram para um melhor comportamento mecânico das misturas asfálticas com a inserção da geogrelha, uma vez que os parâmetros mecânicos medidos através desses ensaios mostraram-se superiores aos encontrados para as misturas convencionais não reforçadas. Entretanto, para a avaliação do comportamento em fadiga, esse incremento mostrou-se dependente do nível de tensão aplicada, constatando-se que, para níveis de tensão mais baixos, as misturas com geogrelha foram capazes de resistir a um maior número de ciclos de carregamento na ruptura do que as misturas sem geogrelha.

PALAVRAS-CHAVE: Misturas asfálticas a quente, Reforço de revestimentos asfálticos, Geogrelha, Comportamento Mecânico.

ABSTRACT: With the current development of geosynthetics, the geogrids have been used as reinforcement of new and restored asphalt pavements. Conventionally, geogrid reinforcement in asphalt overlays aims to develop a solution in which the bearing capacity against traffic demands is greater than the presented by the traditional solution without the use of geosynthetics. In this respect, the purpose of this research is to analyze the influence of geogrid reinforcement on the mechanical behavior of conventional hot asphalt mixtures. In order to achieve this, Marshall mix design method was adopted to design the asphaltic mixtures within the DNIT service specification's gradation bands B and C. Test specimens were molded with the insertion of the geogrids and without the reinforcement. Marshall Stability tests, Tensile Resistance (Brazilian Test), Resilient Modulus tests, Fatigue tests and Static Creep tests were carried out to evaluate the mechanical properties of reinforced and non-reinforced specimens. The results pointed to a better mechanical performance of the asphalt mixtures reinforced with the geogrid, once the mechanical parameters measured through the performed tests were higher than those found for the conventional non-reinforced mixtures. However, it was found that the fatigue behavior is dependent on the applied

load and for lower stress levels, the hot asphalt mixtures reinforced with geogrid were able to withstand a greater number of load cycles to failure than the hot asphalt mixtures without reinforcement.

KEYWORDS: Hot asphalt mixtures, Asphalt reinforcement, Geogrid, Mechanical Performance.

1 INTRODUÇÃO

Com a disponibilidade de diversos tipos de produtos geossintéticos para reforço no mercado e analisando-se a grande variedade de condições de projetos, o reforço de pavimentos asfálticos com geossintético tornou-se uma solução viável para os procedimentos atuais da engenharia rodoviária, em detrimento das práticas convencionais que não fazem uso dessa categoria de reforço (LEE et al., 2014).

De acordo com Shukla e Yin (2004), entre as variadas opções de produtos para reforço no mercado, os geossintéticos são uma opção considerada bastante promissora, permitindo uma extensão na vida útil dos pavimentos, em vista da melhoria promovida nas propriedades de tração do sistema de asfalto reforçado, levando a um melhor custo-benefício do processo de manutenção rodoviária.

Fazendo uma análise em termos de Brasil, segundo Mascarenhas et al. (2016), como o meio rodoviário é responsável por grande parte do transporte de pessoas e bens econômicos, com o desenvolvimento do mercado e a construção de estradas para ligação de grandes polos comerciais, é possível observar um aumento do volume de tráfego, das cargas rodantes e, consecutivamente, o aumento da pressão de inflação dos pneus. Tal fato pode trazer, como consequência, a redução significativa da vida útil das vias que deveriam se manter íntegras durante o período de projeto adotado.

Pasquini et al. (2013) afirmam que pavimentos rodoviários podem estar sujeitos a altos volumes de tráfego, os quais podem acarretar problemas funcionais e estruturais de modo acelerado, exigindo, assim, manutenção frequente e de alto custo. Além disso, segundo os autores, os procedimentos tradicionais de recuperação de um pavimento podem ser ineficazes e não combater as causas que realmente prejudicam o pavimento. Neste sentido, os sistemas de reforço que incluem a geogrelha, por exemplo, podem ser uma escolha apropriada para emprego em camadas asfálticas, com o objetivo de melhorar as propriedades mecânicas dos pavimentos. Tais melhorias podem ser em termos de incrementos das resistências ao afundamento e à propagação de trincas.

A finalidade do emprego da geogrelha é que define qual a forma de uso desse material nos pavimentos flexíveis. Dessa forma, têm-se, basicamente, três posições de geogrelhas dentro de um pavimento flexível de usos mais recorrentes (AL-QUADI, 2008; KAKUDA, 2009): (i) como camada intermediária em recapeamentos asfálticos; (ii) como reforço de camada de base, instalada entre a camada de base e o revestimento asfáltico, melhorando aspectos como intertravamento, tensão de tração, confinamento e separação; (iii) como reforço de subleito, principalmente em casos de presença de solos moles.

Segundo Kwon et al. (2008), entre os vários produtos geossintéticos, acredita-se que as geogrelhas são a melhor opção para que seja alcançada uma melhoria no desempenho estrutural de pavimentos flexíveis, principalmente fornecendo reforço para a estrutura do pavimento através do intertravamento de agregados presentes em camadas de base, além de promover uma melhoria do confinamento na região situada abaixo da carga de roda dos veículos. Segundo esses autores, nos casos em que a geogrelha é inserida em camadas de base granular, estas promovem um reforço de tração, impedindo a sua expansão lateral.

A inclusão da geogrelha naturalmente causa o desenvolvimento de uma camada mais rígida, associada à ação interligada que se desenvolve em torno desse elemento de reforço (KONIETZKY et al., 2000, 2004; BUDKOWSKA e YU, 2003; PERKINS e SVANO, 2004; PERKINS et al., 2004, 2005).

Segundo Carmo et al. (2014), geogrelhas para reforço de pavimento asfáltico constituem um material particular, cujo principal objetivo é o de reforçar as novas capas asfálticas, aumentando sua resistência à fadiga e, portanto, melhorando a resposta das capas asfálticas no que se refere às tensões de tração de longa duração. Além disso, apresentam a finalidade de fornecer uma componente elástica que melhore a distribuição de tensões a fim de inibir a propagação de trincas.

De acordo com Lee et al. (2014), em termos de reabilitação ou manutenção, incluindo principalmente a superposição de camadas asfálticas, sendo estas estruturais ou apenas funcionais, o propósito geral da aplicação do geossintético é retardar o mecanismo pelo qual a reflexão de trincas se move de uma superfície já deteriorada da camada para a superfície da nova camada de asfalto executada. Para tal aplicação, o geossintético é inserido na interface entre a camada deteriorada e a nova camada de asfalto.

A inclusão do geossintético entre as camadas antiga e nova de revestimento

provoca uma redução na resistência da interface em relação à camada não reforçada, porém aumenta a resistência do pavimento à flexão, sendo o resultado final benéfico ao conjunto (FERROTTI et al., 2011; FERROTTI et al., 2012; PASQUINI et al., 2013). Esse efeito de redução da resistência ao cisalhamento na interface é tão maior quanto menor for a abertura de malha, sendo mais pronunciada em geotêxteis e geogrelhas com menor abertura de malha (GONZALEZ-TORRE et al., 2015a; GONZALEZ-TORRE et al., 2015b).

Ferrotti et al. (2012) executaram ensaios de cisalhamento direto em corpos de prova contendo geogrelhas e observaram que a redução da resistência ao cisalhamento nesse caso não é significativamente prejudicial.

Segundo Vilchez (2002), as geogrelhas utilizadas como camada intermediária em revestimentos asfálticos basicamente atuam como armadura dentro do concreto asfáltico, impedindo ou inibindo a reflexão de uma trinca proveniente da camada inferior. A geogrelha faz com que a trinca de reflexão dissipe a sua energia em um volume maior do novo revestimento, reduzindo, assim, a energia específica, originando microfissuras de menores severidades e velocidades de propagação, apresentando configurações sem distribuição de trincas definida.

De acordo com Vertematti (2015), a presença da geogrelha no revestimento faz com que se torne impossível a monopolização de energia dissipada para a progressão de apenas uma trinca dominante, formando-se, então, inúmeras microfissuras. O grau de transferência de tensões ao longo das paredes de cada uma dessas microfissuras é elevado, o que auxilia na redução de sua velocidade de crescimento por atenuar a concentração de tensões em sua extremidade. Tal processo resulta em uma camada que mantém elevadas rigidez, integridade e estanqueidade, proveniente do fato de que não ocorrem prejuízos na transmissão de esforços por entrosamento entre os agregados mais graúdos presentes na mistura asfáltica.

Destaca-se também que, nas pesquisas de Saride e Kumar (2017), Khodaii et al. (2009) e Lee et al. (2014), foi observado o efeito da temperatura na eficiência do geossintético como camada intermediária no concreto asfáltico. A temperatura pode influenciar tanto nas propriedades do geossintético, acelerando sua degradação, quanto nas propriedades do concreto asfáltico e da pintura de ligação, afetando a aderência entre as camadas e majorando as deformações permanentes na superfície. Apesar de tais constatações, os resultados obtidos para seções reforçadas com geossintéticos são superiores aos obtidos para seções sem a presença do reforço.

Considerando-se esse contexto da aplicabilidade de geogrelhas nas camadas de rolamento de pavimentos flexíveis e a relevância do modal rodoviário para o Brasil, o presente trabalho objetiva analisar a influência da presença da geogrelha no comportamento mecânico de misturas asfálticas a quente convencionais.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

Para a composição das misturas asfálticas a quente, foram empregados agregados minerais inertes de origem gnáissica e um ligante asfáltico convencional. No que se refere aos agregados, grãos e miúdo, foram utilizados brita 1, brita 0 e pó de pedra, provenientes da pedreira Ervália Ltda., localizada no município de Ervália-MG. Em relação ao ligante asfáltico, foi empregado o CAP 50/70, oriundo da refinaria Gabriel Passos (REGAP), localizada em Betim-MG, e fornecido pela empresa Stratura Asfalto S/A. Este ligante foi certificado pelo laboratório da Petrobrás sob o nº 2505-14G.

O geossintético analisado nesta pesquisa foi uma geogrelha desenvolvida para reforço de camadas asfálticas, produzida a partir de filamentos poliméricos, aderida a um geotêxtil não tecido ultraleve e coberto por um material betuminoso. Tal geogrelha, apresentada na Figura 1, foi produzida a partir de fios de poliéster de alto módulo e fornecida pela empresa HUESKER Ltda., localizada em São José dos Campos-SP. As características tecnológicas desta geogrelha, fornecidas pelo fabricante, são apresentadas na Tabela 1.

Figura 1: Geogrelha empregada na pesquisa.



Fonte: (Huesker, 2018).

Tabela 1: Propriedades e características fornecidas pelo fabricante da geogrelha empregada na pesquisa.

Propriedade	Magnitude
Resistência à tração	53,6 kN/m
Deformação na ruptura	9,3%
Resistência a 2% de deformação	12,2 kN/m
Resistência a 3% de deformação	15,4 kN/m
Abertura da malha nominal	40 mm x 40 mm

2.2 Métodos

A dosagem das misturas asfálticas foi realizada através do método *Marshall*, em vista de este ser um método tradicionalmente empregado no Brasil. Os procedimentos referentes à dosagem das misturas asfálticas para tal método foram realizados de acordo com as diretrizes propostas pela norma ME 043 (DNER, 1995).

Para tal, foram selecionadas duas faixas de trabalho contidas na especificação de serviço ES031 (DNIT, 2006), aplicável ao concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ). Como o objetivo deste trabalho é a análise do efeito da geogrelha em dois tipos distintos de revestimentos asfálticos, foram escolhidas as faixas B e C dessa especificação.

Com as composições granulométricas de projeto definidas, foram testados cinco teores de ligante pelo método *Marshall* e analisado o desempenho de cada mistura asfáltica. Os teores adotados foram de 4,00%, 4,50%, 5,00%, 5,50% e 6,00% para a faixa C, enquanto para a faixa B foram adotados os teores de 4,00%, 4,25%, 4,50%, 4,75% e 5,00%. Tais valores foram selecionados baseando-se em experiências de misturas asfálticas já produzidas no laboratório de Materiais Asfálticos e Misturas do DEC/UFV. O valor de 0,50% adotado para variação no teor de ligante na faixa C baseou-se no encontrado em literaturas, como Bernucci et al. (2008), por exemplo. A variação para a faixa B de 0,25% se deu como busca de um refinamento, visando uma otimização dos valores dos parâmetros da dosagem *Marshall*, em vista dos resultados encontrados para a variação de 0,50%. Foram confeccionados três corpos de prova para cada teor.

A mistura foi realizada com o ligante a 160°C e os agregados aquecidos a 175°C, sendo estas temperaturas obtidas através da curva de viscosidade-temperatura do ligante asfáltico, conforme recomenda o método de ensaio ME 004 (DNER, 1994).

A determinação dos teores de projeto de ligante asfáltico se deu com base no critério Vv-RBV, de acordo com os limites máximo e mínimo destes parâmetros impostos pela ES 031 (DNIT,2006) para cada uma das faixas de serviço selecionadas.

Posteriormente à definição dos respectivos teores de projeto dos dois tipos de misturas asfálticas, correspondentes às faixas B e C, através do método *Marshall*, foram compactados corpos de prova com o esforço recomendado pela ME 043 (DNER, 1995), de 75 golpes por face, com e sem a inserção da geogrelha. Ou seja, foram moldados corpos de prova não reforçados e reforçados com geogrelha para os dois teores de projeto definidos.

Para a análise das propriedades mecânicas após a compactação das misturas asfálticas realizada através do compactador *Marshall*, foram executados, nos corpos de prova reforçados e nos não reforçados, ensaios de Estabilidade *Marshall*, Resistência à Tração por Compressão Diametral (RT), Módulo de Resiliência (MR), Fadiga à Tensão Controlada, tendo como critério de ruptura o rompimento total do corpo de prova, e *Creep* Estático, seguindo os procedimentos das normas apresentadas na Tabela 2.

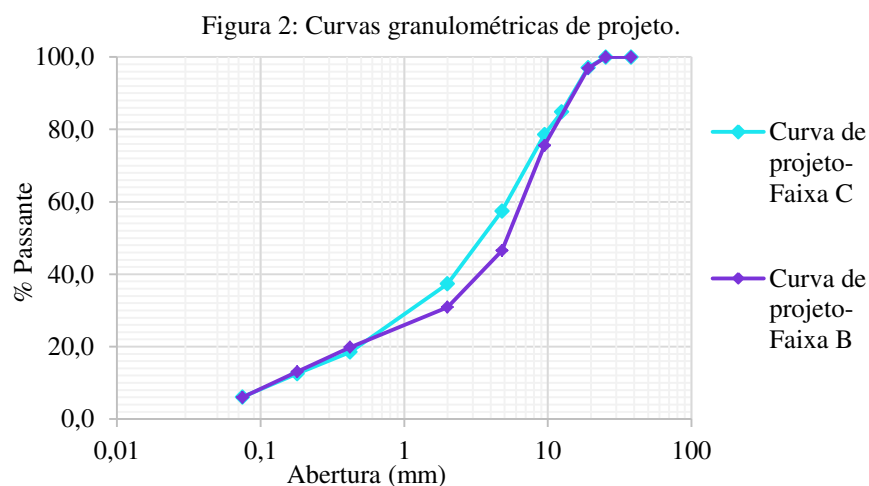
Tabela 2: Ensaios para caracterização mecânica das misturas asfálticas pesquisadas.

Ensaio	Método de Ensaio
Estabilidade <i>Marshall</i>	ME 043 (DNIT, 1995)
RT	ME 136 (DNIT, 2018a)
MR	ME 135 (DNIT, 2018b)
Fadiga	ME 183 (DNIT, 2018c)
<i>Creep</i> Estático	BS 598 111 (BSI, 1995)

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Composições granulométricas de projeto

As curvas granulométricas de projeto utilizadas para a composição das misturas asfálticas, correspondentes às faixas granulométricas B e C da ES 031 (DNIT, 2006), são apresentadas na Figura 2.



Fonte: (Autoria própria, 2018).

3.2 Dosagem *Marshall*

Os resultados da dosagem das misturas asfálticas de projeto são apresentados nas Tabelas 3 e 4, nas quais são explicitados os parâmetros volumétricos e seus respectivos teores de ligante asfáltico de projeto. Tais parâmetros foram determinados de modo que se enquadrassem dentro dos limites preconizados pela especificação de serviço ES 031 (DNIT, 2006).

Tabela 3: Parâmetros volumétricos da dosagem *Marshall* para a mistura de projeto Faixa B.

Parâmetro	Resultados	Limites-Faixa B
Teor de Projeto (%)	4,20	-
Volume de Vazios (%)	4,36	4,0 a 6,0
Relação Betume/ Vazios (%)	70,39	65 a 72

Tabela 4: Parâmetros volumétricos da dosagem *Marshall* para a mistura de projeto Faixa C.

Parâmetro	Resultados	Limites-Faixa C
Teor de Projeto (%)	4,70	-
Volume de Vazios (%)	4,19	3,0 a 5,0
Relação Betume/ Vazios (%)	76,10	75 a 82

3.3 Parâmetros mecânicos

3.3.1 Ensaios de Estabilidade *Marshall*, Resistência à Tração por Compressão Diametral e Módulo de Resiliência

A Tabela 5 apresenta uma visão geral dos resultados dos ensaios de Estabilidade *Marshall*, Resistência à Tração por Compressão Diametral (RT) e Módulo de Resiliência (MR). É válido ressaltar que os resultados são referentes aos corpos de prova com e sem a inserção de geogrelha (misturas reforçadas e não reforçadas, respectivamente).

Tabela 5: Resultados dos ensaios mecânicos realizados.

	Mistura sem geogrelha		Mistura com geogrelha	
Faixa	B	C	B	C
Estabilidade (kgf)	919	775	1236	1265
RT (MPa)	0,95	0,91	1,14	1,22
MR (MPa)	3947	4073	6951	7745

Analisando-se de modo geral os resultados apresentados na Tabela 5, é possível observar que, no que se refere ao comportamento mecânico das misturas analisadas neste trabalho, para os ensaios propostos, os corpos de prova com a inserção da geogrelha apresentaram um incremento nos seus parâmetros mecânicos. Infere-se que tal melhoria é proveniente da interação satisfatória entre a geogrelha e as misturas asfálticas a quente, pois, partindo-se os corpos de prova (exumação), conforme Figura 3, foi observada uma completa aderência das fibras da geogrelha com a mistura.



Figura 3: Geogrelha aderida à mistura asfáltica a quente.
Fonte: (Autoria própria, 2018).

Segundo Vilchez (2002), um dos principais fatores que influenciam no funcionamento das geogrelhas como reforço de pavimentos é sua aderência ao concreto asfáltico. Bastos (2010) afirma que tal aderência entre a geogrelha e a mistura asfáltica

proporciona um ancoramento do geossintético na camada asfáltica e que, para ocorrer uma absorção de tensões por parte da geogrelha, quando esta sofrer estímulo à sua deformação, não deve haver escorregamento ou deslocamento relativo desta em relação ao concreto asfáltico. Assim, como foi observada uma total aderência, presume-se que foi possível a mobilização da melhoria proporcionada pelo reforço para a mistura asfáltica como um todo.

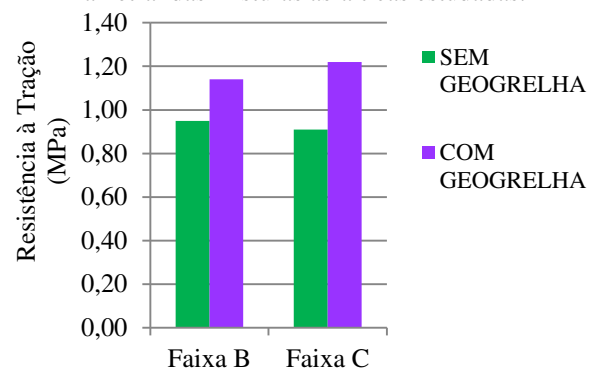
No que se refere à melhoria no comportamento mecânico relacionado à Estabilidade *Marshall*, sabendo que a força aplicada durante o ensaio cresce até que ocorra deslocamento ou quebra da mistura asfáltica, sendo este o ponto de perda da estabilidade, um dos efeitos da presença da geogrelha consiste em promover um melhor intertravamento do sistema, deixando-o menos susceptível à quebra. Dessa forma, o sistema geogrelha-mistura asfáltica consegue mobilizar uma maior resistência a esse mecanismo comparativamente à mistura asfáltica sem reforço, constituindo-se em um sistema com maior estabilidade.

No ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral, em que o corpo de prova se rompe devido à tensão de tração gerada ao longo do plano diametral vertical solicitado, ainda que a geogrelha não esteja alocada nesse plano, infere-se que na região de contato da geogrelha com a mistura asfáltica, na qual se tem total aderência, a geogrelha promova uma redistribuição das tensões internas ao absorver parte das tensões de tração na região central do corpo de prova, aumentando dessa forma a resistência à tração interna no plano diametral vertical em relação aos corpos de prova não reforçados. Considera-se que esse incremento também está relacionado com o fato de que a geogrelha empregada nesta pesquisa apresente uma alta resistência à tração, em conformidade com Lao e Ramos (2009), para quem essa capacidade de reforço está intimamente vinculada à magnitude dessa propriedade mecânica do reforço geossintético.

Em relação ao ensaio de Módulo de Resiliência, considerando que este se dá mediante aplicação de um carregamento repetido e que são analisadas as deformações horizontais originadas, estima-se que a geogrelha, por estar aderida à mistura asfáltica e confinada na mesma, absorve as tensões de tração a cada ciclo na parte central do corpo de prova, reduzindo, conseqüentemente, os deslocamentos horizontais recuperáveis, implicando em incremento da rigidez elástica do sistema. Em conformidade com Bastos (2010), é provável que a elevada resistência à tração da geogrelha empregada também justifique o incremento de rigidez da mistura asfáltica reforçada.

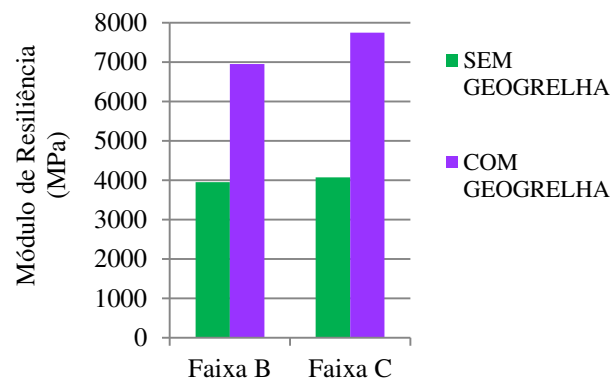
As Figuras 4, 5 e 6 apresentam, respectivamente, os resultados de Resistência à Tração por Compressão Diametral, Módulo de Resiliência e Estabilidade *Marshall*, possibilitando-se observar as diferenças nestas propriedades, para cada um dos dois revestimentos estudados.

Figura 4: Resultados de Resistência à Tração por Compressão Diametral das misturas asfálticas estudadas.



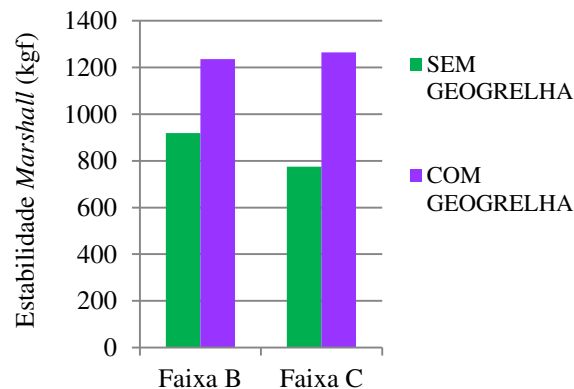
Fonte: (Autoria própria, 2019).

Figura 5: Resultados de Módulo de Resiliência das misturas asfálticas estudadas.



Fonte: (Autoria própria, 2019).

Figura 6: Resultados de Estabilidade *Marshall* das misturas asfálticas estudadas.



Fonte: (Autoria própria, 2019).

Em relação ao ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral, é possível perceber que o incremento no valor do parâmetro, em vista da inserção da geogrelha, apresentou-se mais expressivo para o revestimento com faixa granulométrica C que para o revestimento com faixa granulométrica B, sendo que, no revestimento faixa C, o aumento foi de 34,07%, enquanto que no revestimento faixa B, de 20,00%.

No que se refere ao ensaio de Módulo de Resiliência, tal comportamento também é observado. No revestimento com faixa granulométrica C, o incremento proporcionado pela geogrelha foi de 90,20% em relação à mesma mistura não reforçada, e no revestimento com faixa granulométrica B, de 76,10%.

Na Estabilidade *Marshall*, o incremento proporcionado pela geogrelha ao parâmetro foi de 63,20% no revestimento com faixa granulométrica C e de 34,50% no de faixa granulométrica B, sendo novamente mais expressivo o incremento no revestimento com faixa granulométrica C.

Estima-se que essa diferença de eficiência de incremento nas propriedades mecânicas estudadas entre os dois revestimentos, por parte da geogrelha, esteja ligada com o fato de que, como estes revestimentos apresentam granulometrias diferentes, a interação dos agregados da mistura com a abertura da malha da geogrelha seja distinta.

Segundo Lee et al. (2014), as geogrelhas têm, entre os principais efeitos que controlam sua ação de reforço, o confinamento e o intertravamento, e estes são originados da resistência que surge da interação entre as aberturas de malha da geogrelha e o agregado presente na mistura asfáltica. Assim, pressupõe-se que o revestimento faixa C, que conta com uma graduação mais densa e com uma maior porcentagem da fração de finos, teve um melhor intertravamento com a malha da geogrelha do que o revestimento faixa B, cuja granulometria é mais aberta e com maior porcentagem de agregados de maiores dimensões, fato que pode ter possibilitado uma interação com a geogrelha não tão homogênea quanto à ocorrida com o revestimento faixa C.

Observando os valores desses percentuais de incremento proporcionado pela geogrelha e as Figuras 4, 5 e 6, sem distinção de revestimento asfáltico, é possível perceber que estes foram mais significativos no ensaio de Módulo de Resiliência quando comparados aos percentuais de incremento apresentados pelos ensaios de Resistência à Tração por Compressão Diametral e Estabilidade *Marshall*, para ambos os revestimentos. Essa análise leva à especulação de uma possível mobilização mais expressiva do reforço da geogrelha por parte de um carregamento repetido,

proporcionado por ensaio dinâmico, em detrimento da mobilização gerada por uma solicitação estática.

Estima-se a possibilidade de que, ao sofrer a ação do carregamento repetido, a geogrelha absorva as tensões de forma progressiva ao mesmo tempo em que sofre deformação, de modo que, ao receber a ação da próxima aplicação de carga, ela já sofreu o estímulo à deformação, tendo seu efeito de reforço previamente mobilizado, aumentando ainda mais a resistência do sistema mistura-geogrelha frente à solicitação.

Salienta-se que este estado prévio não é propiciado por um carregamento puramente estático, no qual a carga terá sempre que promover a deformação inicial da geogrelha para que esta possa ter seu efeito de reforço inicialmente mobilizado e, a partir daí, influenciar a resposta mecânica do sistema mistura-geogrelha face à solicitação aplicada, sem ter sofrido nenhuma mobilização prévia.

3.3.2 Ensaio de Fadiga à Tensão Controlada

Os resultados dos ensaios de fadiga por compressão diametral à tensão controlada, realizados com seis níveis de tensões nos valores de 15%, 20%, 25%, 30%, 35% e 40% do valor da resistência à tração dos corpos de prova com e sem a inserção da geogrelha, são apresentados através da Tabela 6 e da Figura 7.

Na Tabela 6, estão as constantes obtidas através do ajuste dos dados experimentais coletados, para o modelo matemático apresentado na Equação 1, com base nos resultados apresentados pelos corpos de prova das misturas asfálticas de projeto correspondentes às faixas granulométricas C e B, com e sem a inserção da geogrelha.

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

Na qual:

N_f : número de ciclos de carga;

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

k_1 e k_2 : constantes determinadas na curvas do ensaio.

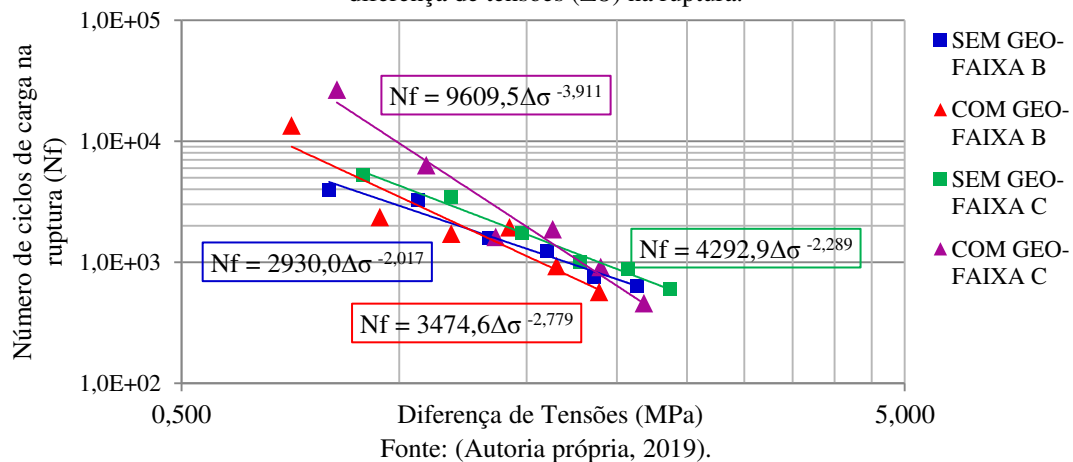
Tabela 6: Parâmetros do modelo matemático do ensaio de fadiga obtidos através do ajuste dos dados experimentais.

Mistura Asfáltica	Condição de Reforço	Constantes da equação: $Nf = k_1 * \Delta\sigma^{k_2}$		R^2
		k_1	k_2	
Faixa B	Sem Geogrelha	2930,0	-2,017	0,9689
	Com Geogrelha	3474,6	-2,779	0,8811
Faixa C	Sem Geogrelha	4292,9	-2,289	0,9838
	Com Geogrelha	9609,5	-3,911	0,9527

Analisando-se esses dados obtidos, é possível perceber que, para ambas as faixas de serviço, os corpos de prova com geogrelha apresentaram uma maior inclinação, traduzida por maiores valores dos coeficientes k_2 em módulo, quando comparados com os coeficientes da condição sem geogrelha. Segundo Branco (2004), espera-se que misturas asfálticas com maior valor de MR e com retas de fadiga de maior inclinação apresentem uma tendência de maior vida de fadiga. Assim, em uma análise preliminar, no contexto da presente pesquisa, em que os corpos de prova com geogrelha apresentam maiores valores de MR e retas de fadiga de maior inclinação, estima-se que os mesmos devam apresentar um melhor comportamento quanto às solicitações que levam à fadiga das misturas asfálticas.

Na Figura 7, estão traçadas as curvas de fadiga, expressas em função do número de aplicações da carga (Nf) e da diferença de tensões ($\Delta\sigma$), para as misturas asfálticas de projeto das faixas granulométricas B e C, considerando-se a ausência e a inserção da geogrelha.

Figura 7: Vida de fadiga (Nf) das misturas asfálticas estudadas (com e sem geogrelha) em função da diferença de tensões ($\Delta\sigma$) na ruptura.



Pela Figura 7, é possível observar que as retas de regressão de fadiga das misturas asfálticas sem geogrelha, que apresentam uma menor inclinação, são

concorrentes com as retas das misturas asfálticas com geogrelha, que apresentam uma inclinação maior. Portanto, a possível melhora em relação à vida de fadiga, promovida pela inserção do elemento de reforço, será condicionada ao nível de tensões analisado, traduzido pela diferença de tensões ($\Delta\sigma$), variando de forma que, nos níveis mais baixos de tensão, as misturas com geogrelha suportam um maior número de ciclos de aplicação de carga na ruptura, conduzindo a uma maior vida de fadiga. Para níveis maiores de tensão solicitante tal comportamento é invertido e a mistura não reforçada pode apresentar uma maior vida de fadiga.

Essa variação de comportamento frente ao aumento do nível de tensão está ligada com a sensibilidade das misturas asfálticas ao fenômeno de fadiga. Otto (2009) realizou um estudo dos resultados de fadiga obtidos em sua pesquisa, constatando que um maior coeficiente angular indica uma maior suscetibilidade à aplicação de solicitações. Essa maior suscetibilidade sugere que a mistura asfáltica é mais sensível à variação de tensões e sofre interferências e alterações mais expressivas do carregamento em sua estrutura, apresentando uma maior tendência a sofrer danos por fadiga. Para Morilha (2004), essa maior suscetibilidade à variação de tensões indica um comportamento menos homogêneo da mistura asfáltica em relação aos níveis de tensão aplicados, produzindo um pior comportamento da mistura asfáltica em serviço.

Nesta pesquisa, em que os coeficientes angulares das misturas com geogrelha foram superiores aos das misturas sem geogrelha, como pode ser observado através dos valores destes coeficientes apresentados na Tabela 6, considerando-se a literatura pesquisada, sabe-se que tais resultados se constituem em um indicativo de uma maior sensibilidade das misturas asfálticas reforçadas ao fenômeno de fadiga, indicando que estas sofreram uma maior interferência dos ciclos de carga aplicada em sua estrutura, o que alterou seu comportamento mecânico mais significativamente, de forma que elas apresentaram danos mais expressivos resultantes do fenômeno de fadiga.

Além disso, tais misturas apresentaram um comportamento mais heterogêneo em relação aos níveis de tensão aplicados, fator que também pode ser indicativo de um pior desempenho de vida de fadiga dependendo do nível de tensão aplicado.

Neste sentido, Marcon (2016) afirma que misturas asfálticas com maiores valores de k_2 , em módulo, são consideradas mais propensas a sofrer deformações por tração. Assim, como as misturas com geogrelha apresentaram equações de vida de fadiga com maiores valores deste coeficiente, isto indica que estas apresentaram uma maior disposição em sofrer deformações por tração no transcorrer do ensaio. Portanto,

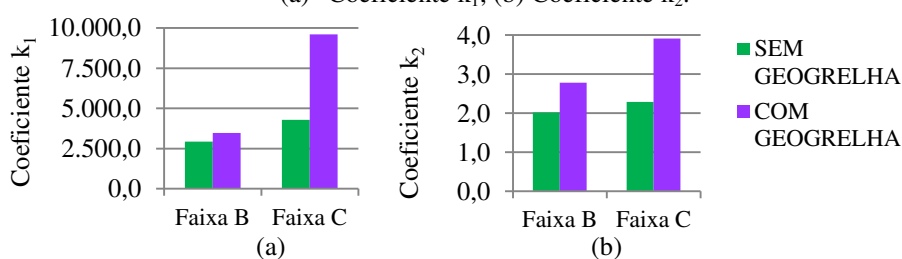
as misturas reforçadas apresentaram um maior decréscimo de resistência, em vista deste maior acúmulo progressivo de deformações, para níveis maiores de tensões aplicadas, quando comparadas com as misturas não reforçadas.

Segundo Ceratti (2014), o carregamento cíclico aplicado gera microtrincas nos revestimentos asfálticos que promovem a perda da rigidez das misturas asfálticas, e o acúmulo dessas deformações produz o fenômeno de fadiga. Assim, estima-se que as misturas com geogrelha apresentam uma maior perda de rigidez durante o ensaio quando solicitadas a níveis maiores de tensão comparativamente à perda de rigidez sofrida pelas misturas sem geogrelha. Por isso, as misturas com e sem geogrelha têm suas retas de fadiga concorrentes, em vista de que essa maior perda de rigidez resulta em uma menor capacidade, por parte das misturas com geogrelha, em suportar ciclos na ruptura para um mesmo nível de tensão ao qual a mistura não reforçada também estaria solicitada, como pode ser observado na Figura 7.

Considerando que o fenômeno de fadiga está relacionado com a redução da rigidez do material, uma explicação para a possibilidade de maior perda de rigidez apresentada pelas misturas asfálticas reforçadas pela geogrelha seria a seguinte: sendo as misturas asfálticas com geogrelha mais rígidas que as misturas asfálticas sem geogrelha, elas absorveram mais tensões durante o ensaio, e, por serem mais suscetíveis à deformação por tração, essas tensões absorvidas produziram mais deformações de tração progressivas, gerando pontos de fraqueza mais expressivos. Consequentemente, estes pontos de fraqueza resultariam em uma mistura fraturada com resistência ainda menor, refletindo em uma maior perda de rigidez durante o ensaio, tendo, dessa forma, sua vida de fadiga reduzida ao ser comparada com a vida de fadiga das misturas não reforçadas, para maiores níveis de tensão aplicados.

Na Figura 8, apresentam-se, de forma comparativa, as diferenças de influência da inserção da geogrelha nos coeficientes do modelo matemático de vida de fadiga, obtido através do tratamento estatístico dos dados dos ensaios de fadiga realizados.

Figura 8: Coeficientes do modelo matemático de vida de fadiga das misturas estudadas: (a) Coeficiente k_1 ; (b) Coeficiente k_2 .



Fonte: (Autoria própria, 2019).

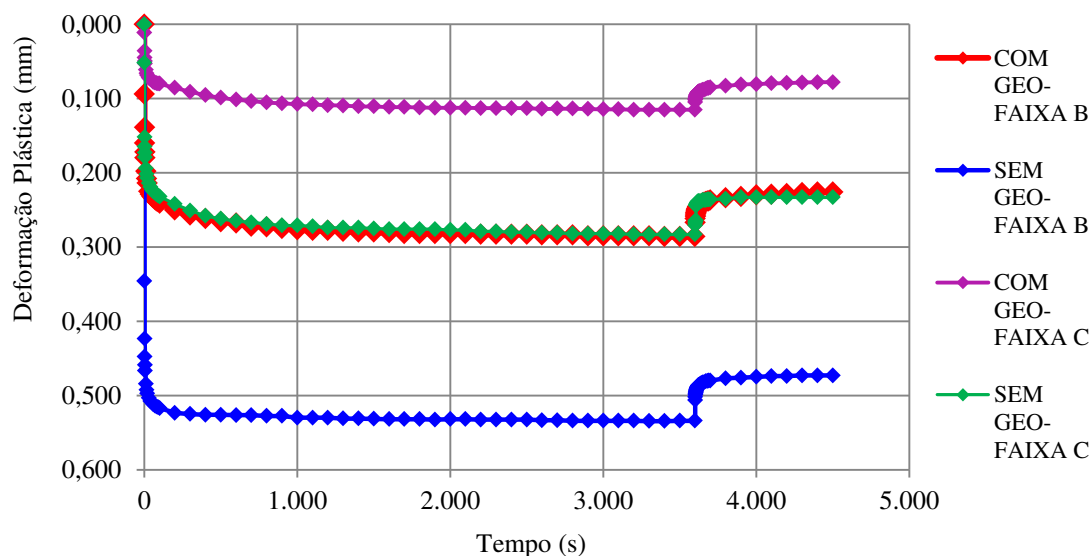
Analisando a Figura 8 em conjunto com a Tabela 6, é possível verificar que a mudança nos valores dos coeficientes k_1 e k_2 das misturas sem geogrelha, em comparação com as misturas Faixa C com geogrelha, foi bem mais significativa que nos coeficientes das misturas Faixa B com geogrelha.

Percebe-se, portanto, que, nas misturas com geogrelha Faixa C, o elemento de reforço foi mobilizado de maneira mais expressiva. Estima-se que essa melhor mobilização esteja ligada ao fato de que a aderência da geogrelha a uma faixa granulométrica com maior porcentagem de finos, menor quantidade de agregados de maiores dimensões e, conseqüentemente, menor número de vazios seja mais homogênea e propicie uma melhor interação entre a geogrelha e a mistura asfáltica, originando um sistema mais solidarizado, de forma que a eficiência da geogrelha em alterar o comportamento de uma mistura asfáltica frente às solicitações que levam à fadiga da mistura esteja associada a uma maior capacidade em mobilizar seu reforço, provavelmente proporcionada pela aderência.

3.3.3 Ensaio de *Creep* Estático

Para avaliação da deformação permanente nas misturas asfálticas não reforçadas e reforçadas com geogrelha, foram realizados ensaios de *Creep* Estático, cujos resultados obtidos no transcorrer do ensaio são apresentados na Figura 9.

Figura 9: Deformação plástica *versus* tempo dos corpos de prova das misturas asfálticas estudadas (com e sem geogrelha).



Fonte: (Autoria própria, 2019).

A partir de uma análise do gráfico da Figura 9, percebe-se que a inserção da geogrelha nas misturas asfálticas, tanto da Faixa B quanto da Faixa C, promoveu uma redução da magnitude das deformações plásticas resultantes da aplicação do esforço de compressão, durante o ensaio de *Creep* Estático.

Considerando que a compressão simples proporcionada durante o ensaio de *Creep* Estático origina deformações acumulativas irreversíveis, estima-se que a interferência da geogrelha, que produz uma redução nessas deformações plásticas, esteja ligada ao fato de que a geogrelha, ao receber a ação desse carregamento compressivo, se deforma juntamente com a mistura asfáltica. Assim, parte das tensões compressivas é absorvida pela geogrelha deformada, e, como esta forma um sistema solidarizado com a mistura asfáltica, o sistema mistura-geogrelha, conseqüentemente, se deforma menos que a mistura asfáltica sem o elemento de reforço, que absorve sozinha as tensões de compressão.

Através da Tabela 7, apresentam-se, de forma sintetizada, os parâmetros deformação total após período de recuperação (D_t), módulo de fluência (M_F) e inclinação da curva (I_{CURVA}), obtidos no ensaio de *Creep* Estático.

Tabela 7: Parâmetros obtidos nos ensaios de *Creep* Estático das misturas asfálticas com e sem geogrelha.

Mistura Asfáltica	Condição de Reforço	D_t (mm/mm)	M_F (4500s) (MPa)	I_{CURVA} (%)
Faixa B	Sem Geogrelha	0,0124	7,87	0,59
	Com Geogrelha	0,0049	19,95	2,58
Faixa C	Sem Geogrelha	0,0061	16,02	3,38
	Com Geogrelha	0,0017	57,06	5,27

Com base na análise da Tabela 7, percebe-se que as misturas asfálticas com geogrelha apresentaram um valor inferior do índice D_t ao serem comparadas com as misturas asfálticas sem geogrelha, indicando uma menor susceptibilidade das misturas com geogrelha à deformação permanente. Assim, de acordo com Simões (2018), as misturas sem geogrelha, por apresentarem maiores valores desse índice, são misturas asfálticas que estarão mais sujeitas a sofrer deformações permanentes em situação de campo.

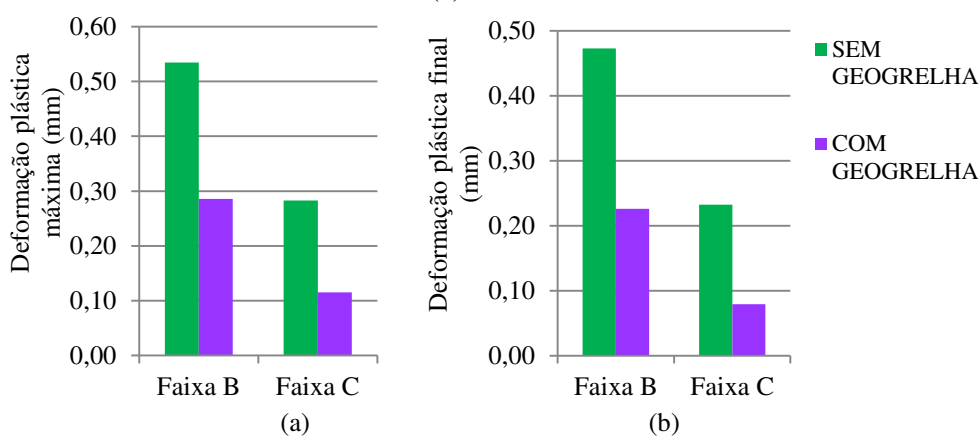
Considerando-se o parâmetro de módulo de fluência (M_F), segundo Ka Yan Ng (2013), este pode ser utilizado para determinar a capacidade de uma mistura asfáltica resistir à deformação permanente, considerando que quanto maior o valor de M_F maior será a capacidade de resistir a tais deformações. Dessa forma, foi possível observar que

a presença da geogrelha foi capaz de produzir um aumento na capacidade das misturas asfálticas em resistir às deformações permanentes, em vista dos maiores valores de M_F apresentados por elas em comparação com as misturas asfálticas não reforçadas.

No que se refere ao parâmetro I_{CURVA} , correspondente à inclinação do estágio secundário da curva deformação versus tempo de aplicação da carga, percebe-se que ambas as misturas asfálticas apresentaram maiores valores para as condições de reforço com geogrelha. Segundo Mugayar (2004), tal parâmetro consiste em um indicativo da velocidade de deformação permanente na mistura asfáltica, em que quanto maior o valor deste parâmetro maior a suscetibilidade da mistura asfáltica a uma velocidade de deformação mais elevada. Assim, nesta pesquisa, as misturas asfálticas com geogrelha se mostraram mais susceptíveis ao surgimento rápido e prematuro de deformações permanentes que as misturas asfálticas sem geogrelha, sendo este um fator não desejável para misturas asfálticas.

A Figura 10 apresenta, respectivamente, os valores das deformações plásticas máximas e finais, possibilitando-se observar as diferenças dessas deformações entre cada um dos dois revestimentos estudados.

Figura 10: Deformações plásticas geradas no ensaio de *Creep* Estático: (a) Máxima; (b) Final.



Fonte: (Autoria própria, 2019).

Observando-se os gráficos da Figura 10, percebe-se que a influência da presença da geogrelha na redução das deformações plásticas máximas e finais foi maior nas misturas asfálticas Faixa B. Enquanto nas misturas Faixa C, a redução da magnitude das deformações plásticas, máxima e final, foi de 40,6% e 34,0%, respectivamente, nas misturas Faixa B, o percentual de redução dessas deformações foi de 53,5% e 47,8%, respectivamente.

Essas diferenças, observadas em relação ao efeito do reforço no comportamento mecânico das misturas asfálticas no ensaio de *Creep* Estático, podem estar relacionadas com a mobilização do reforço proporcionado pela geogrelha. Considerando que a geogrelha apresenta uma maior aderência às misturas asfálticas Faixa C, estima-se que a maior mobilização do reforço, observada para as misturas asfálticas Faixa B, estaria relacionada com a maior deformação permitida à geogrelha quando inserida nas misturas Faixa B, em vista da configuração deste ensaio, no qual a geogrelha está em uma posição perpendicular ao carregamento.

Através de uma análise comparativa entre os dados das misturas não reforçadas, percebe-se que as misturas asfálticas Faixa B sofrem deformações plásticas de maiores magnitudes que as das misturas asfálticas Faixa C, em vista do carregamento compressivo. Assim, estima-se que, apesar das misturas Faixa C proporcionarem uma aderência mais homogênea entre geogrelha e mistura asfáltica, fator este que, a princípio, levaria a uma maior mobilização do reforço da geogrelha nas misturas Faixa C, para o caso do ensaio de *Creep* Estático e considerando sua aplicação de esforços compressíveis, a maior mobilização do reforço se deu para as misturas Faixa B, que apresentaram uma maior redução das deformações plásticas.

Uma possível explicação para esta maior mobilização provavelmente está ligada ao fato de as misturas Faixa B serem mais deformáveis, e, ao sofrer ação do carregamento compressivo perpendicular ao seu plano, a geogrelha inserida nas misturas Faixa B pôde se deformar mais do que nas misturas Faixa C. Dessa forma, como uma maior deformação foi permitida à geogrelha, esse condicionante superou a condição de menor aderência proporcionada pelas misturas Faixa B, promovendo mobilização ainda mais eficiente do reforço da geogrelha. Dessa maneira, foi promovida uma maior absorção de tensões, o que ocasionou redução mais significativa da magnitude das deformações plásticas nas misturas asfálticas com geogrelha Faixa B quando comparada com a redução das deformações plásticas apresentadas pelas misturas com geogrelha Faixa C.

4 CONCLUSÃO

Esta pesquisa teve como objetivo avaliar o efeito da inserção de uma geogrelha em parâmetros mecânicos de dois revestimentos asfálticos densos. Apesar das

limitações apresentadas por ensaios de laboratório em relação à situação de campo, foi possível constatar alterações nas propriedades mecânicas analisadas em vista da presença do elemento de reforço nas misturas asfálticas.

Pelos resultados encontrados, e considerando-se as particularidades deste trabalho, a inserção deste geossintético promoveu uma melhoria no comportamento mecânico de ambos os revestimentos no que se refere ao aumento dos valores de Estabilidade *Marshall*, Resistência à Tração por Compressão Diametral e Módulo de Resiliência.

Considerar a vida de fadiga da mistura asfáltica com geogrelha, apenas através do ensaio de Fadiga à Tensão Controlada realizado, não possibilita uma conclusão definitiva em relação ao fato de o geossintético promover ou não uma melhora para tal parâmetro. No entanto, mediante este ensaio, foi possível constatar que o possível incremento promovido pela inserção da geogrelha às misturas asfálticas depende do nível de tensão solicitante. Para níveis de tensão mais baixos, as misturas com geogrelha foram capazes de resistir a um maior número de ciclos de carregamento na ruptura do que as misturas sem geogrelha. Entretanto, quando a solicitação é composta por níveis mais altos de tensão, este comportamento se inverte e as misturas com geogrelhas passam a suportar um menor número de ciclos de carregamento na ruptura do que as misturas sem geogrelha.

Outra observação proveniente do ensaio de Fadiga à Tensão Controlada foi que as misturas asfálticas com geogrelha, apresentando retas de vida de fadiga mais inclinadas, se mostraram mais suscetíveis a sofrer deformações acumulativas por tração, sendo de certa forma mais propensas ao fenômeno de fadiga.

No ensaio de *Creep* Estático, a presença da geogrelha ocasionou uma redução da magnitude das deformações plásticas para os dois revestimentos asfálticos estudados, o que sugere uma maior resistência das misturas asfálticas com geogrelha frente à deformação permanente, quando comparadas com as mesmas misturas asfálticas sem a presença da geogrelha.

Em relação à interação da geogrelha com as misturas asfálticas a quente, foi observada uma total aderência da geogrelha à mistura, caracterizada pela solidarização entre estas, o que resultou em uma influência efetiva da presença da geogrelha no desempenho mecânico para os ensaios analisados.

O efeito causado pela inserção de uma mesma geogrelha no incremento dos parâmetros mecânicos analisados mostrou-se distinto em revestimentos asfálticos

diferentes, provavelmente devido às diferenças de interação física entre o geossintético e as respectivas granulometrias de projeto desses revestimentos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AL-QUADI, I.L. *Synthesis on the use of geosynthetics in pavements and the development of a roadmap to geosynthetically-modified pavements*. Federal Highway Administration. 2008.

BASTOS, G.A. *Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas Reforçadas com Geogrelhas para Pavimentos Flexíveis*. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. Rio de Janeiro. 247 p, 2010.

BERNUCCI, L.B.; MOTTA, L.M.G.; CERATTI, J.A.P.; SOARES, J.B. *Pavimentação asfáltica – Formação básica para engenheiros*. PETROBRÁS: ABEDA. Rio de Janeiro. 475p, 2008.

BRANCO, V. T. F. C. *Caracterização de Misturas Asfálticas com o uso de Escória de Aciaria como Agregado*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 153 p, 2004.

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. 10p. 1995.

BUDKOWSKA, B.B.; YU, J. *Mitigation of short term rutting by interlocking layer developed around a geogrid-sensitivity analysis*. Comput. Geotech. 30, p.61–79, 2003.

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). Maceió/AL. Anais CD-ROM. 2014.

CERATTI, J. A. P.; NÚÑEZ, W. P.; BRITO, L. A. T.; COLPO, G. B. *Análise de fadiga de misturas asfálticas através do ensaio de flexão em viga quatro pontos*. Relatório Final – CONCEPA/ ANTT. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Rio Grande do Sul. 157p, 2014.

DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER – ME 004/94 – *Material betuminoso – determinação da viscosidade Saybolt-Furol a alta temperatura (ABNT-MB 571)*. Rio de Janeiro. 1994.

_____.DNER-ME 043/95:*Misturas betuminosas a quente – Ensaio Marshall para misturas betuminosas*. Rio de Janeiro. 1995.

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

_____.DNIT 136/2018: ME: *Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio*. Rio de Janeiro. 2018a.

_____.DNIT 135/2018: ME: *Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio*. Rio de Janeiro. 2018b.

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

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

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

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

GONZÁLEZ-TORRE, I.; CASTRO-FRESNO, D.; VEJA-ZAMANILLO A.; CALZADA-PEREZ, M. A. *Damage evaluation during installation of geosynthetics used in asphalt pavements*. Geosynthetics International. 2015. ABMS Aplicativo ABMS eventos é lançado para a COBRAE2017, <https://www.abms.com.br/aplicativo-abms-eventos-e-lancado-para-a-cobrae-2017>, acessa-do em 16/10/2017.

HUESKER Ideen. Ingeniure. Innovationen. *Aplicações e Produtos*. Disponível em: <<http://www.huesker.com.br/>> Acesso em: 15 de novembro, 2018.

KAKUDA, F.M. *Aplicações de geossintéticos em estruturas de pavimentos flexíveis. Exame de qualificação oao doutorado*. EESC-USP. São Carlos, 2009.

KA YAN NG, A. *Contribuição ao estudo da deformação permanente de misturas asfálticas densas à luz de ensaios de fluência por compressão uniaxial estática e dinâmica*. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes. São Carlos, SP. 148p, 2013.

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

KNONW, J.; TUTUMLUER, E.; KONIETZKY, H. *Aggregate base residual stresses affecting geogrid reinforced flexible pavement response*. International Journal of Pavement Engineering. v. 9, n. 4, p. 275-285, 2008.

KONIETZKY, H.; TE KAMP, L.; HAINBUCHNER, E. *Tensar geogrid modeling part II: interaction of the geogrid with soil (pullout test), Progress Report, Prepared for Tensar International, ITASCA Consultants GmbH, Gelsenkirchen, Germany*. 30p, 2000.

KONIETZKY, H.; TE KAMP, L.; GROßGER, T.; JENNER, C. *Use of DEM to model the interlocking effect of geogrids under static and cyclic loading*. In Numerical Modeling in Micromechanics via Particle Methods, edited by Y. Shimizu, R. Hart and P. Cundall, pp. 3–12, (A.A. Balkema: Rotterdam), 2004.

LAO, V.L.E.S.T.; RAMOS, C.R *Estudo e emprego de grelha polimérica anti-reflexão de trincas em pavimentos flexíveis*. XV Congresso Íbero-Latino Americano de Asfalto (CILA). Lisboa. 2009.

LEE, J.; KIM, Y. R.; LEE, J. *Rutting performance evaluation of asphalt mix with diferente types of geosynthetics using MMLS3*. International Journal of Pavement Engineering. v. 16, n.10, p. 894-905, 2014.

MARCON, M. F. *Estudo e comparação do desempenho mecânico e reológico entre concretos asfálticos modificados por polímero SBS, borracha moída de pneu e nano materiais*. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 179 p, 2016.

MASCARENHAS, Z; LOPES, M; GASPAR, M; VASCONCELOS, K; BERNUCCIL. L.B. *Dosagem de mistura do tipo Large Stone Asphalt Mixture pelo compactador giratório Superpave*. XXX Congresso Nacional de Pesquisa em Transporte da ANPET. Rio de Janeiro. Anais de 2016, 2016.

MORILHA, J.A. *Estudo sobre a ação de modificadores o envelhecimento dos ligantes asfálticos e nas propriedades mecânicas e de fadiga das misturas asfálticas*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis/SC. 185p, 2004.

MUGAYAR, A. N. *Avaliação dos efeitos do tipo de asfalto e da distribuição granulométrica do agregado nas fluências estática e dinâmica de misturas asfálticas densas*. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes. São Carlos, SP. 137 p, 2004.

OTTO, G. G. *Misturas Asfálticas Mornas- Verificação da Fadiga e do Módulo Complexo*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis/SC. 179p, 2009.

PASQUINI, E.; BOCCI, M.; FERROTTI, G.; CANESTRARI, F. *Laboratory characterisation and field validation of geogrid-reinforced asphalt pavements*. Road Materials and Pavement Design. v. 14, n. 1, p. 17-35, 2013.

PERKINS, S.W.;SVANO, G. *Assessment of interface shear growth from measured geosynthetic strains in a reinforced pavement subject to repeated loads*, In Compendium of Papers CD-ROM, 83rd Transportation Research Board (TRB) Annual Meeting, Washington, DC. 2004.

PERKINS, S.W.; CHRISTOPHER, B.R.; CUELHO, E.L.; EIKSUND, G.R.; HOFF, I.; SCHWARTZ, C.W.; SVANO, G.; WANT, A. *Development of design methods for geosynthetic reinforced flexible pavements*, US Department of Transportation, Federal Highway Administration (FHWA), FHWA Report DTFH61-01-X-00068, May 263 p. 2004.

PERKINS, S.W.; CHRISTOPHER, B.R.; EIKSUND, G.R.; SCHWARTZ, C.W.; SVANO, G. *Modeling effects of reinforcement on lateral confinement of roadway aggregate*. In Proceedings CD-ROM of the GeoFrontiers Conference, Geotechnical Special Publication 130, Advances In Pavement Engineering, edited by C.W. Schwartz, E. Tutumluer and L. Tashman, p. 26, January 24–26 (ASCE: Austin, TX), 2005.

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

SHUKLA, S.K.; YIN, J.H. *Functions and installation of paving geosynthetics*. Proceedings of the 3rd Asian Regional Conference on Geosynthetics, Seoul, June (21–23). p. 314–321, 2004.

SIMÕES, F. A. *Análise do comportamento mecânico em fluência de misturas asfálticas dosadas pela metodologia Superpave*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Viçosa. 112p, 2018.

VERTEMATTI, J. C. *Manual Brasileiro de Geossintéticos*. CTG-ABINT. São Paulo. 570p, 2015.

VILCHEZ, G.M. *Contribuição para a elaboração de um método de projeto de restauração de pavimentos asfálticos utilizando geossintéticos em sistemas anti-reflexão de trincas*. Tese de Doutorado - Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA, São José dos Campos, São Paulo. 121p, 2002.

CAPÍTULO 4

INFLUÊNCIA DE DIFERENTES TIPOS DE GEOGRELHAS EM PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MISTURAS ASFÁLTICAS A QUENTE

RESUMO: As geogrelhas são uma classe de geossintéticos que vêm sendo empregadas como elemento de reforço em pavimentação, atuando de maneira a proporcionar uma elevada resistência à tração dentro do revestimento asfáltico. Neste aspecto, considerando que diferentes tipos de geogrelhas podem ser fabricados a partir de variados materiais poliméricos, implicando em desempenhos estruturais diferenciados desse elemento de reforço, esta pesquisa objetivou analisar a influência de diferentes geogrelhas nas propriedades mecânicas de misturas asfálticas a quente de projeto, correspondentes a duas faixas de serviço da especificação do DNIT. O programa experimental incluiu: (i) caracterização dos materiais componentes das misturas asfálticas; (ii) dosagem das misturas asfálticas através do método *Marshall*; (iii) moldagem de corpos de prova com o compactador *Marshall* sem a geogrelha; (iv) compactação de corpos de prova com a inserção de três geogrelhas para pavimentação com as seguintes matérias-primas: poli álcool vinílico (PVA), poliéster (PET) e fibra de vidro; (v) ensaios mecânicos de Resistência à Tração por Compressão Diametral e Módulo de Resiliência; (vi) ensaios de Estabilidade *Marshall*. Os resultados apontaram o incremento da Resistência à Tração e da Estabilidade *Marshall* para as misturas asfálticas, quando estas foram reforçadas com os três tipos de geogrelha. As respostas dos sistemas reforçados, traduzidas pelos ganhos de resistência e rigidez proporcionados por cada um dos elementos de reforço, mostraram-se dependentes das particularidades de cada ensaio e das particularidades de cada tipo de geogrelha. Neste aspecto, a geogrelha que promoveu o maior incremento em todos os ensaios realizados foi a de menor rigidez. A despeito das diferenças, os resultados realçaram a habilidade das geogrelhas em restringir, comparativamente à mistura não reforçada, os mecanismos de ruptura mecânica por tração e por compressão característicos dos ensaios adotados, destacando o potencial técnico das mesmas em incrementar o período de vida útil de pavimentos asfálticos.

PALAVRAS-CHAVE: Geogrelhas; Matérias-Primas; Misturas asfálticas a quente; Propriedades Mecânicas.

ABSTRACT: Geogrids are geosynthetic materials that have been used as a reinforcement element in pavement structures, providing a high tensile strength within the asphalt overlay. In this respect, considering that different geogrid types can be manufactured from various polymeric materials, implying different structural performances of these reinforcement elements, this research aimed to analyze the influence of different geogrid types on the mechanical properties of hot asphalt mixtures designed within two DNIT service specification's gradation bands. The experimental program included: (i) characterization of the asphalt mixtures composite materials (ii) design of asphalt mixtures using Marshall mix design method; (iii) preparation of test specimens with the Marshall compactor without the geogrid reinforcement; (iv) compaction of test specimens with the insertion of three geogrids types composed of the following raw materials: polyvinyl alcohol (PVA), polyester (PET) and glass fiber; (v)

Tensile Resistance (Brazilian Test), Resilient Modulus tests; (vi) Marshall stability tests. The results pointed an increasing of tensile strength and Marshall stability of the asphalt mixture reinforced with the three geogrid types. The mechanical responses of the reinforced systems, represented by the increase in strength and stiffness provided by each reinforcement element, were shown to be dependent on the particularities of each test and the particularities of each geogrid type. In this regard, the geogrid with lower stiffness promoted the greatest increase of mechanical properties considering all the performed tests. Despite the differences, the results emphasized the capability of the geogrids to restrict the traction and compression failure mechanisms in the tests adopted in comparison to the non-reinforced mixture, highlighting their technical potential to increase the service life of asphalt pavements.

KEYWORDS: Geogrids; Raw Materials; Hot asphalt mixtures; Mechanical Properties.

1 INTRODUÇÃO

As geogrelhas são uma classe de geossintéticos que vêm sendo empregadas em pavimentação no recapeamento de camadas asfálticas deterioradas, funcionando como um sistema antirreflexão de trincas, em substituição às soluções tradicionais. Além disso, elas podem ser empregadas como elemento de reforço em pavimentos flexíveis novos. Nos anos 90, Collin et al. (1996) já afirmavam que o uso de geossintéticos para se alcançar uma melhoria no desempenho de pavimentos flexíveis já experimentava um largo crescimento na última década.

No que se refere às estruturas de pavimento em si, de acordo com pesquisas da CNT (2017), no Brasil, 99% dos pavimentos são flexíveis, com o uso, na maioria dos casos, de asfalto. Em relação à situação desses pavimentos, Ramos e Fontanelle (2016) afirmam que, apesar de nos últimos anos a frota de veículos ter aumentado de maneira considerável, os incentivos à infraestrutura rodoviária não cresceram com a mesma proporção. Dessa maneira, desenvolveram-se problemas no setor viário e, consequentemente, houve um aumento da deterioração dos pavimentos.

Segundo Bastos (2010), o crescimento constante da frota de veículos automotores, especialmente dos veículos comerciais que cada vez mais apresentam incrementos de suas capacidades de transporte de cargas pesadas, em conjunto com o excesso de carga e com os defeitos envolvidos nas práticas de restauração, têm resultado em uma procura por materiais que auxiliem no aumento da vida útil dos pavimentos, desempenhando, de maneira efetiva, a função de elemento de reforço. Neste cenário, o uso de geogrelhas em camadas asfálticas se torna uma solução adequada.

Segundo Correia e Zornberg (2016), geossintéticos têm sido utilizados para melhoria do desempenho estrutural de pavimentos quando empregados como reforço em camadas de base que usam agregados, o que também é relatado em várias pesquisas que analisaram dados de campo e oriundos de ensaios de laboratório (PERKINS, 1999; ZORNBERG e GUPTA, 2010; TANG et al., 2015; WU et al., 2015). No entanto, os autores ressaltam o fato de que geossintéticos de reforço, inseridos abaixo de camadas asfálticas, são empregados quase que exclusivamente para reduzir o desenvolvimento da reflexão de trincas na camada asfáltica, não considerando a capacidade de uma geogrelha, por exemplo, de aumentar a capacidade estrutural do pavimento em geral.

Cleveland et al. (2002) realizaram um estudo de campo envolvendo o uso de geossintéticos como elemento de reforço de camadas asfálticas, nos Estados Unidos, no qual não foi obtido sucesso. O estudo, que utilizou geogrelhas poliméricas, geotêxteis não tecidos e geocompostos e que tinha como objetivo avaliar estes diferentes produtos geossintéticos e o efeito que causavam nas camadas asfálticas, não atendeu às expectativas e não possibilitou nenhuma conclusão sobre o que era pesquisado em vista dos vários problemas ocorridos durante o processo de instalação destes materiais. Neste aspecto, Correia (2014) afirma que uma instalação deficiente pode prejudicar as condições de trabalho dos geossintéticos como elemento de reforço de uma camada asfáltica, diminuindo a eficiência do desempenho do pavimento.

De acordo com Lee et al. (2014), diferentes tipos de reforços têm diferentes mecanismos de reforço. As geogrelhas, por exemplo, têm sua ação de reforço governada, principalmente, pelos efeitos de confinamento, de intertravamento e de mecanismos de ligação. Os mecanismos de confinamento e intertravamento são provenientes da resistência originada da interação existente entre as aberturas de malha da geogrelha e o agregado presente na mistura asfáltica. Tal mecanismo é afetado, principalmente, pelo tamanho das aberturas da geogrelha e sua relação com o tamanho máximo do agregado, pela razão entre a área do filamento e a área total da geogrelha, pela resistência do filamento e por sua espessura.

A adesão entre a superfície do reforço, ou seja, a superfície da geogrelha, e o cimento asfáltico de petróleo presente na mistura, ou com a camada de betume como um todo, é que promove a ligação na camada reforçada (HOZAYEN et al., 1993).

Brown et al. (1985) relataram que geogrelhas de polipropileno, colocadas sob camadas de asfalto, promoveram uma diminuição dos afundamentos por trilhas de rodas na camada, variando em 20% a 58%. Um estudo experimental conduzido por

Laurinavičius e Oginskas (2006), envolvendo geogrelhas inseridas em camadas de asfalto sobrepostas, relatou uma redução de 50% na profundidade dos sulcos originados dos afundamentos.

A percentagem de melhoria no desempenho de um pavimento mediante a inclusão de geogrelha depende de diversos fatores, podendo-se citar, entre estes, as propriedades do material a partir do qual a geogrelha foi produzida (ABU-FARSAKH e CHEN, 2011). Segundo Correia (2014), a seleção adequada da matéria-prima do geossintético é tão importante quanto a execução apropriada do processo de instalação do elemento de reforço, e ainda é uma questão sem resposta definitiva.

Bühler (2007) apresenta o fato de que, a princípio, o material considerado ideal para uso com finalidade de reforço de pavimentos seria aquele que apresentasse maior rigidez, pois, dessa maneira, seria capaz de proporcionar maior durabilidade. Todavia, algumas pesquisas contradizem tal lógica, de maneira a apresentar a aderência como o principal fator de escolha da geogrelha, ressaltando que o vínculo proporcionado na região de interface da camada asfáltica seria o critério preponderante. A partir de ensaios em amostras à fadiga, esse autor observou que determinado tipo de geogrelha que apresentava rigidez superior às demais mostrou uma efetividade inferior ao ser comparada com outra geogrelha de menor rigidez, que apresentava melhor aderência ao concreto asfáltico.

De acordo com Aguiar (2004), o comportamento das geogrelhas e dos geossintéticos, de um modo geral, é condicionado pelas matérias-primas que os originaram, sendo estas polímeros e aditivos. No que se referem aos polímeros empregados, estes são sintéticos, cuja maioria é fabricada a partir do petróleo. Já os aditivos são produtos responsáveis por alterar características dos polímeros ou modificar o processo de fabricação.

Os geossintéticos são constituídos, essencialmente, por polímeros que, para atenderem às necessidades de engenharia dessa classe de materiais, devem proporcionar aos mesmos propriedades como resistência mecânica, rigidez, durabilidade, elasticidade, resistência química, entre outras. Tais propriedades sofrem influência de variadas características, podendo-se citar o peso molecular, a morfologia, a cristalinidade e a temperatura de transição vítrea. Analisando as propriedades mecânicas dos polímeros, estas se elevam à medida que existe uma maior atração eletroquímica entre as macromoléculas formadoras (VERTEMATTI, 2015).

Segundo Vertematti (2015), essa possibilidade de se encontrar no mercado

produtos fabricados a partir de matérias-primas diferentes, com propriedades físicas, químicas e mecânicas distintas, constitui uma grande vantagem técnica, pois, para cada necessidade específica dos mais diversos tipos de obras e locais, um tipo de polímero pode fornecer as características exigidas pelo projeto.

Collin et al. (1996) afirmam que o projeto de um pavimento flexível é baseado em uma teoria desenvolvida conjuntamente com ensaios de laboratório, ensaios de campo e na experiência. De acordo com Graziani et al. (2014), usualmente, as seleções do tipo apropriado de geossintético e da posição na qual ele será empregado no pavimento são baseadas em critérios empíricos ou derivados de resultados obtidos em ensaios de laboratório. Assim, a realização de programas experimentais envolvendo ensaios de laboratório empregando geogrelhas se alinha com o desenvolvimento de projetos de pavimentos asfálticos que consideram esse elemento.

Neste cenário, e sabendo-se que geogrelhas produzidas a partir de matérias-primas diferentes, ou seja, polímeros diferentes, apresentam propriedades diferentes, e considerando o fato, segundo Carmo et al. (2014), que geogrelhas proporcionam uma alta resistência à tração dentro da capa asfáltica, complementando as propriedades mecânicas da camada de revestimento, o presente trabalho teve como objetivo analisar o efeito da inserção de três geogrelhas distintas nas propriedades mecânicas de duas misturas asfálticas projetadas para compor tal camada estrutural de um pavimento.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

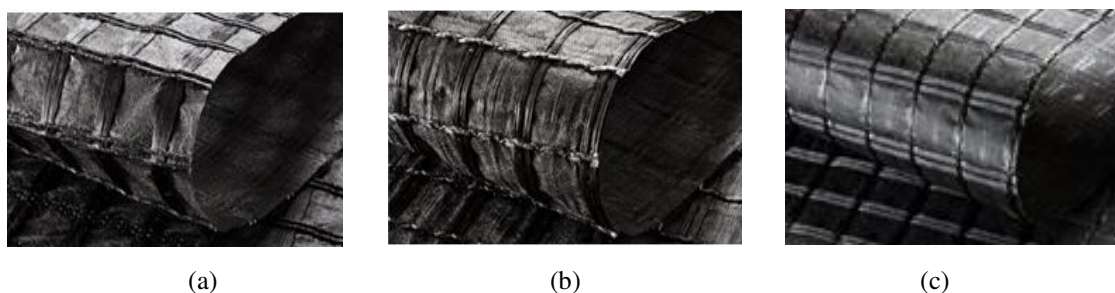
2.1 Materiais

Para a composição das misturas asfálticas a quente, foram utilizados agregados minerais de formação gnáissica e um ligante asfáltico convencional. Em relação ao ligante asfáltico, foi empregado o CAP 50/70, proveniente da refinaria Gabriel Passos (REGAP), localizada em Betim-MG, e fornecido pela empresa Stratura Asfalto S/A. Este ligante foi certificado pelo laboratório da Petrobrás sob o nº 2505-14G. No que se refere aos agregados, grãos e miúdo, foram utilizados brita 1, brita 0 e pó de pedra, oriundos da pedreira Ervália Ltda., localizada no município de Ervália-MG.

As geogrelhas avaliadas neste trabalho são produzidas para reforço de camadas asfálticas, fabricadas a partir de filamentos poliméricos e aderidas a um geotêxtil não

tecido ultraleve, sendo estes compostos cobertos por um material betuminoso. Os três tipos de geogrelhas analisadas são: poliéster (PET), poli álcool vinílico (PVA) e de fibra de vidro (FV). Tais geogrelhas foram fornecidas pela empresa HUESKER Ltda., localizada em São José dos Campos-SP. As características tecnológicas destas geogrelhas, fornecidas pelo fabricante, são apresentadas na Tabela 1, e em sequência, na Figura 1, são apresentados tais geossintéticos.

Figura 1: Geogrelhas usadas na pesquisa: (a) Fibra de Vidro; (b) Poli álcool vinílico; (c) Poliéster.



Fonte: (Huesker, 2018).

Tabela 5: Propriedades e características básicas fornecidas pelo fabricante das três geogrelhas analisadas

Propriedade	Geogrelha de Fibra de Vidro (FV)	Geogrelha de Poliálcool vinílico (PVA)	Geogrelha de Poliéster (PET)
Resistência à tração	64,6 kN/m	54,9kN/m	53,6 kN/m
Deformação na ruptura	2,4%	5,9%	9,3%
Resistência a 2% de deformação	56,48 kN/m	15,9 kN/m	12,2 kN/m
Resistência a 3% de deformação	-	23,2 kN/m	15,4 kN/m
Abertura da malha nominal	30 mm x30 mm	40 mm x40 mm	40 mm x40 mm

2.2 Métodos

Foram realizadas as caracterizações do ligante asfáltico e dos agregados minerais, de acordo com os procedimentos de norma apresentados nas Tabelas 2 e 3, seguidas do enquadramento da combinação destes últimos nas faixas granulométricas B e C contidas na especificação de serviço ES031 (DNIT, 2006), aplicável ao concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ).

Tabela 2: Ensaios de caracterização dos agregados minerais.

Ensaio	Norma
Índice de forma dos agregados graúdos	ME086 (DNER,1994a)
Ensaio de material pulverulento	ME 266 (DNER, 1997a)
Abrasão “ <i>Los Angeles</i> ” dos agregados graúdos	ME 035 (DNER,1998a)
Adesividade dos agregados graúdos ao ligante asfáltico	ME 078(DNER, 1994b)
Absorção dos agregados	ME 081 (DNER,1998b)
Massa específica real e aparente	ME 081 (DNER,1998b)
Massa específica do agregado miúdo	ME 194 (DNER,1998d)
Sanidade dos agregados graúdos	ME 089 (DNER,1994c)
Equivalente de areia	ME 054 (DNER,1997b)
Análise granulométrica dos agregados	ME 083 (DNER,1998c)

Tabela 3: Ensaios de caracterização do ligante asfáltico

Ensaio	Norma
Massa específica real	ME 009 (DNER, 1998e)
Densidade relativa	ME 009 (DNER, 1998e)
Penetração	ME 155 (DNIT, 2010)
Ponto de fulgor	ME 148 (DNER, 1994d)
Ponto de combustão	ME 148 (DNER, 1994d)
Ponto de amolecimento	ME 131 (DNIT, 2010a)
Solubilidade em Tricloroetileno	NBR 14855 (ABNT, 2002)
Viscosidade <i>Saybolt-Furol</i>	ME 004 (DNER, 1994e)

O método de dosagem da mistura adotado foi o *Marshall*, seguindo-se os procedimentos do ME 043 (DNER, 1995). A preparação dos corpos de prova foi realizada de acordo com a norma PRO 178 (DNIT, 2018a).

Com as composições granulométricas de projeto definidas, foram testados cinco teores de ligante asfáltico pelo método *Marshall* e analisado o desempenho de cada mistura asfáltica. Os teores adotados foram de 4,00%, 4,50%, 5,00%, 5,50% e 6,00%, para a faixa C, enquanto que, para a faixa B, foram adotados os teores de 4,00%, 4,25%, 4,50%, 4,75% e 5,00%. Tais valores foram selecionados baseando-se em experiências de misturas asfálticas já produzidas no laboratório de Materiais Asfálticos e Misturas do DEC/UFV. O valor de 0,50% adotado para variação no teor de ligante na faixa C baseou-se no encontrado em literaturas, como Bernucci et al. (2008), por exemplo. A variação de 0,25% para a faixa B se deu como busca de um refinamento, visando uma otimização dos valores dos parâmetros da dosagem *Marshall*, em vista dos resultados

encontrados para a variação de 0,50%. Foram confeccionados três corpos de prova para cada teor.

A mistura foi realizada com o ligante a 160°C e os agregados aquecidos a 175°C, sendo estas temperaturas obtidas através da curva de viscosidade-temperatura do ligante asfáltico, conforme recomenda o método de ensaio ME 004 (DNER, 1994e).

A determinação dos teores de projeto de ligante asfáltico se deu com base no critério Vv-RBV, de acordo com os limites máximo e mínimo destes parâmetros impostos pela ES 031 (DNIT, 2006) para cada uma das faixas de serviço selecionadas.

Posteriormente à definição dos respectivos teores de projeto dos dois tipos de misturas asfálticas correspondentes às faixas B e C, através do método *Marshall*, foram compactados corpos de prova com o esforço recomendado pelo ME 043 (DNER, 1995) de 75 golpes por face, com e sem a inserção da geogrelha. Ou seja, foram moldados corpos de prova não reforçados e reforçados com geogrelha para os dois teores de projeto definidos.

Para a análise das propriedades mecânicas das misturas asfálticas de projeto, após a compactação realizada através do compactador *Marshall*, foram executados, nos corpos de prova reforçados e nos não reforçados, ensaios de Estabilidade *Marshall*, Resistência à Tração por Compressão Diametral (RT) e Módulo de Resiliência (MR), seguindo os procedimentos das normas apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4: Ensaios para caracterização mecânica das misturas asfálticas

Ensaio	Método de Ensaio
Estabilidade <i>Marshall</i>	ME 043 (DNIT, 1995)
Resistência à Tração por Compressão Diametral	ME 136 (DNIT, 2018b)
Módulo de Resiliência	ME 135 (DNIT, 2018c)

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização dos agregados

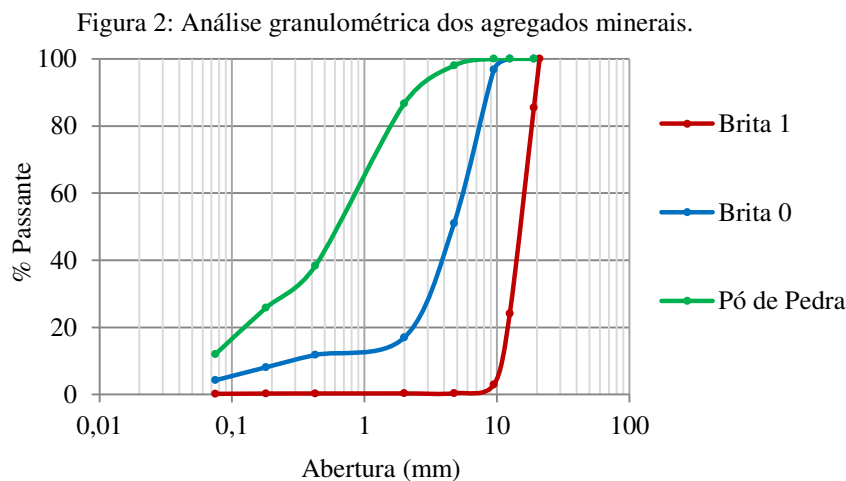
A caracterização dos agregados minerais utilizados nesta pesquisa é apresentada na Tabela 5.

Tabela 5: Resultados dos ensaios de caracterização dos agregados minerais.

Ensaio	Resultado
Índice de forma dos agregados graúdos	0,68
Ensaio de material pulverulento	16,66%.
Abrasão "Los Angeles" dos agregados graúdos	45%
Adesividade dos agregados graúdos ao ligante betuminoso	Satisfatório com adição de 0,10% de material dopante
Absorção - Brita 0	1,14%
Massa específica real- Brita 0	2,794 g/cm ³
Massa específica aparente- Brita 0	2,722 g/cm ³
Absorção - Brita 1	1,14%
Massa específica real - Brita 1	2,794 g/cm ³
Massa específica aparente - Brita 1	2,722 g/cm ³
Massa específica do agregado miúdo	2,794 g/cm ³
Sanidade dos agregados graúdos	0,38%
Equivalente de areia	59%
Análise granulométrica dos agregados	-

Os resultados obtidos atendem o exigido pelas normas, com exceção do ensaio de adesividade agregado/ligante, que apresentou uma não conformidade com o exigido. Essa não conformidade foi reparada a partir do acréscimo de um material melhorador de adesividade ao ligante, em 0,10% em peso do ligante asfáltico.

Na Figura 2, é apresentada a granulometria dos agregados minerais utilizados.



Fonte: (Autoria própria, 2019).

3.2 Caracterização do ligante asfáltico

Os resultados referentes à caracterização do CAP 50/70 são apresentados na Tabela 6.

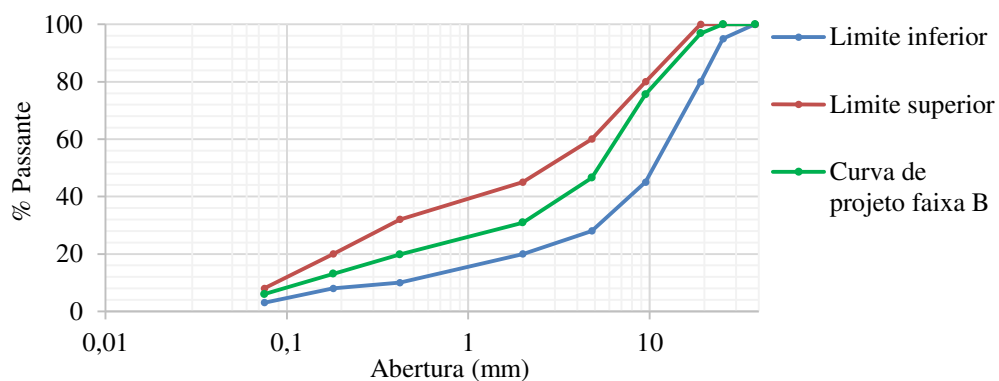
Tabela6: Resultados dos ensaios de caracterização do ligante asfáltico.

Ensaio	Resultado
Massa específica real	1,010 g/cm ³
Densidade relativa	1,006
Penetração	57 dmm
Ponto de fulgor	343°C
Ponto de combustão	365°C
Ponto de amolecimento	51°C
Solubilidade em Tricloroetileno	100%
Viscosidade <i>Saybolt-Furol</i>	135 °C – 172 segundos 150 °C – 64 segundos

3.3 Composições granulométricas de projeto

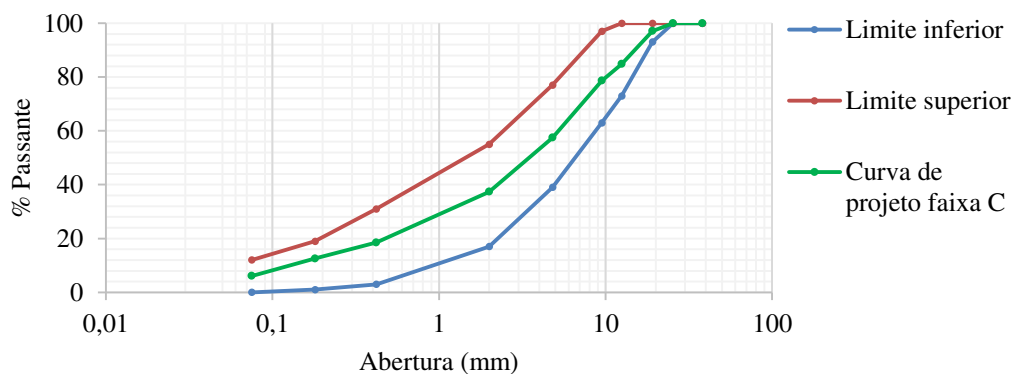
As curvas granulométricas de projeto utilizadas para a composição das misturas asfálticas são apresentadas nas Figuras 3 e 4, juntamente com os limites das respectivas Faixas B e C prescritas pela ES 031 (DNIT, 2006).

Figura 3: Curva granulométrica de projeto e limites da Faixa B



Fonte: (Autoria própria, 2019).

Figura 4: Curva granulométrica de projeto e limites da Faixa C.



Fonte: (Autoria própria, 2019).

3.4 Dosagem das misturas asfálticas

Na Tabela 7, são apresentados os resultados dos parâmetros volumétricos das misturas asfálticas de projeto analisadas e seus respectivos teores de projeto de ligante asfáltico, obtidos através da dosagem *Marshall*. Estes valores de teores de ligante de projeto foram determinados de modo que os parâmetros volumétricos correspondentes se enquadrassem dentro dos limites impostos pela especificação de serviço ES 031 (DNIT, 2006).

Tabela 7: Parâmetros volumétricos da dosagem *Marshall* para as misturas asfálticas de projeto

Parâmetro	Faixa B	Faixa C
Teor de Projeto (%)	4,20	4,70
Volume de Vazios (%)	4,36	4,19
Relação Betume-Vazios (%)	70,39	76,10

3.5 Ensaios mecânicos

Os resultados dos ensaios de Resistência à Tração por Compressão Diametral, Módulo de Resiliência e de Estabilidade *Marshall*, realizados nos corpos de prova sem a inserção da geogrelha e nos corpos de prova com cada uma das três geogrelhas analisadas nesta pesquisa, são apresentados na Tabela 8. Em relação à identificação das geogrelhas, a geogrelha de fibra de vidro será referida como GEO 1, a de poli álcool vinílico como GEO 2 e a de poliéster como GEO 3.

Tabela 8: Resultados dos ensaios mecânicos realizados sobre as misturas asfálticas pesquisadas.

Ensaio	Resistência à Tração por Compressão Diametral (MPa)		Módulo de Resiliência (MPa)		Estabilidade <i>Marshall</i> (kgf)	
	B	C	B	C	B	C
Faixa						
Sem Geogrelha	0,95	0,91	3947	4073	919	775
GEO 1 (FV)	1,07	1,18	4951	5394	1104	1063
GEO 2 (PVA)	1,02	1,15	4401	5102	967	1113
GEO 3 (PET)	1,14	1,22	6951	7745	1236	1265

De acordo com Silva (2007), as geogrelhas trabalham de modo a induzir maior estabilidade às estruturas nas quais são inseridas, essencialmente devido as suas características de resistência a esforços de tração. Observando-se os resultados apresentados na Tabela 8, foi possível perceber essa ação das geogrelhas nas misturas

asfálticas analisadas. Foi constatado que as três geogrelhas inseridas nas misturas asfálticas promoveram um incremento nas propriedades mecânicas de Resistência à Tração por Compressão Diametral, Módulo de Resiliência e Estabilidade *Marshall*. Preliminarmente, tal incremento pode ser explicado pelo fato de que as três geogrelhas apresentaram total aderência às misturas asfálticas analisadas.

Segundo Vilchez e Silva (2000), a condição imprescindível para que um elemento de reforço introduzido a um revestimento asfáltico possa desempenhar com eficiência sua função é que este apresente uma ótima aderência com a mistura asfáltica. Para Montestruque et al. (2015), a aderência entre camadas é um fator muito importante para o bom desempenho do pavimento. A resistência e rigidez global da estrutura não dependem apenas da resistência e rigidez individual de cada camada, dependendo também da aderência entre elas.

Ao sofrer estímulo à deformação mediante os carregamentos aplicados durante os ensaios, as geogrelhas tiveram sua função de reforço mobilizada e, em vista da aderência, trabalharam como um sistema solidarizado com as misturas asfálticas, resultando em corpos de prova com um comportamento mecânico superior aos corpos de prova sem as geogrelhas.

Essa aderência observada entre as três geogrelhas e as misturas asfálticas, exemplificada na Figura 5, pode ser explicada pelo fato de essas geogrelhas incorporarem revestimentos com asfalto, que, segundo o fabricante, apresentam teores de asfalto de aproximadamente 79% em massa em relação aos sólidos do revestimento asfáltico. Dessa forma, o asfalto presente nas malhas das geogrelhas e o asfalto presente nas misturas asfálticas a quente apresentam, para a temperatura de compactação, uma adesividade entre si capaz de promover uma aderência total entre as geogrelhas e as misturas asfálticas a quente, a qual permanece após o resfriamento dos corpos de prova à temperatura ambiente.

Figura 5: Geogrelha aderida à mistura asfáltica a quente.



Fonte: (Autoria própria, 2018).

Aguiar (2004) e Bühler et al. (2006) afirmam que as geogrelhas usadas em pavimentação que são fornecidas com cobertura betuminosa apresentam um favorecimento à aderência ao revestimento asfáltico. A afirmativa desses autores corrobora a justificativa da origem da aderência apresentada nesta pesquisa.

Nas Figuras 6, 7 e 8, apresentam-se em forma de gráficos, respectivamente, os resultados de Estabilidade *Marshall*, Resistência à Tração por Compressão Diametral e Módulo de Resiliência, nas quatro condições analisadas neste trabalho, para cada uma das misturas asfálticas de projeto estudadas.

Figura 6: Resultados de Estabilidade *Marshall* das misturas asfálticas pesquisadas nas quatro condições propostas, para cada uma das faixas B e C.

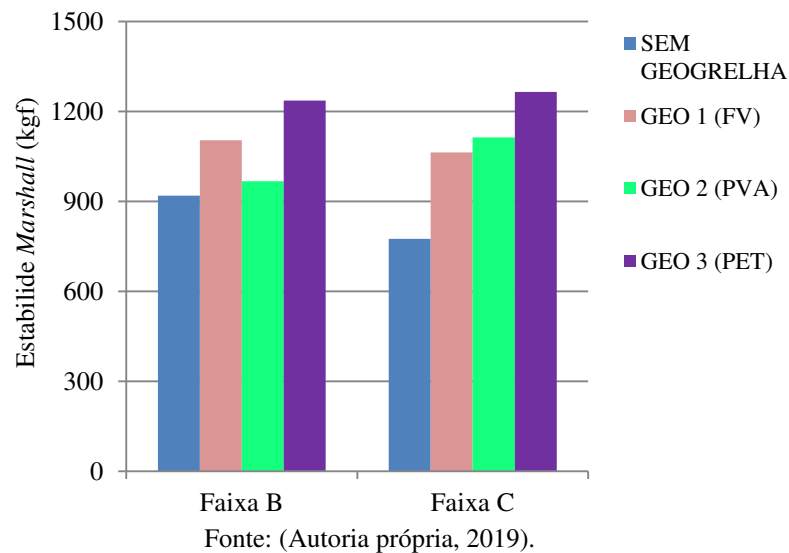


Figura 7: Resultados de Resistência à Tração por Compressão Diametral das misturas asfálticas pesquisadas nas quatro condições propostas, para cada uma das faixas B e C.

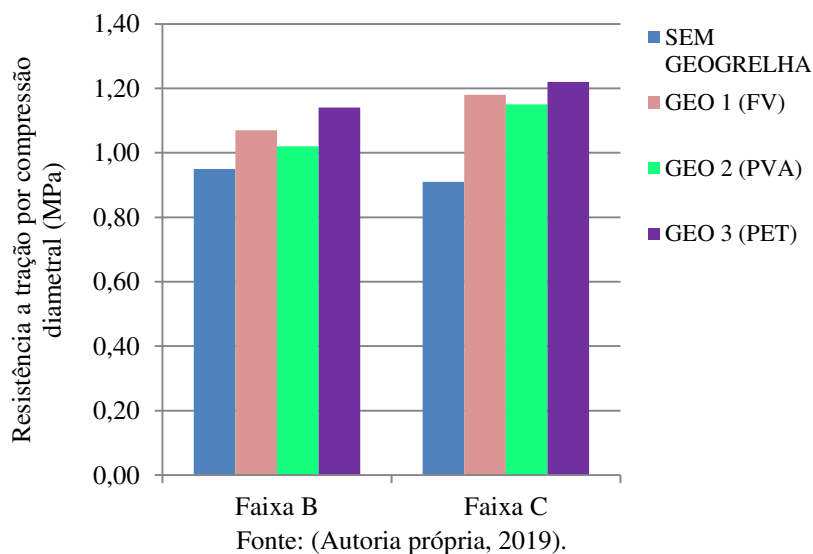
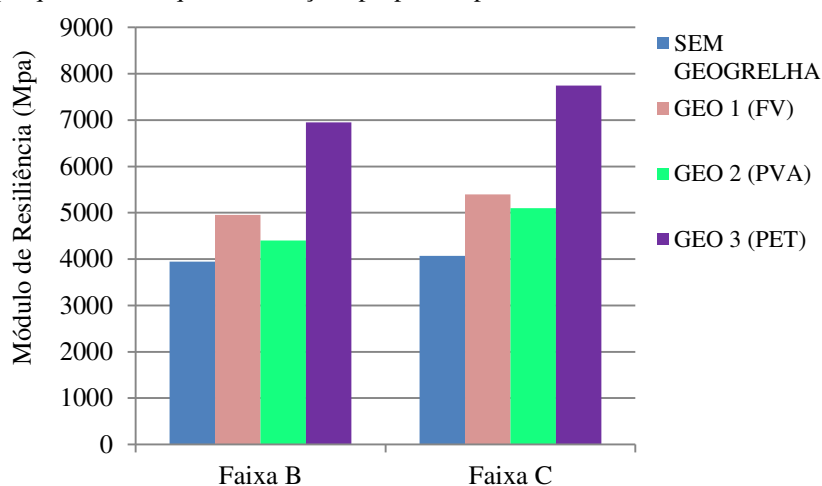


Figura 8: Resultados de Módulo de Resiliência das misturas asfálticas pesquisadas nas quatro condições propostas, para cada uma das faixas B e C.



Fonte: (Autoria própria, 2019).

No que se refere ao ensaio de Estabilidade *Marshall*, considerando que a perda de estabilidade ocorre no instante do deslocamento ou quebra da mistura asfáltica, um dos efeitos da inserção das geogrelhas consiste em promover no sistema uma menor tendência à quebra. Esse aumento na Estabilidade *Marshall*, que pode ser observado no gráfico da Figura 6, é reflexo do maior intertravamento dos sistemas mistura asfáltica-geogrelha, promovido pelas malhas das geogrelhas.

Neste aspecto, Ante (2012) aponta as aberturas de malha das geogrelhas como um fator que permite uma melhor interação com o material no qual está em contato. Assim, as três geogrelhas, através das respectivas interações das aberturas da malha com as misturas asfálticas a quente e do atrito existente nas interfaces entre a superfície da malha e as misturas asfálticas, propiciaram sistemas mais travados, com uma menor suscetibilidade ao deslocamento, e mais estáveis que os sistemas constituídos apenas pela mistura asfáltica.

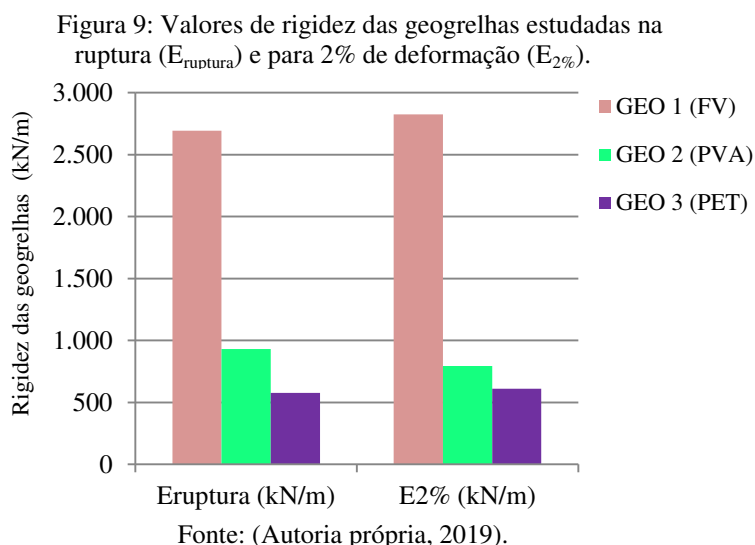
Analisando-se o gráfico da Figura 7, é possível constatar que as três geogrelhas promoveram um aumento na Resistência à Tração por Compressão Diametral das misturas asfálticas. De acordo com Montestruque et al. (2015), a geogrelha absorve tensões de tração quando trabalha em cooperação com a camada asfáltica apenas se estiver bem ancorada, pois só deve trabalhar ou mobilizar essa resistência se houver estímulo à sua deformação. Assim, ao sofrer estímulo à deformação durante o ensaio, mediante a aplicação do carregamento externo, estima-se que a geogrelha absorva parte das tensões de tração e, conseqüentemente, os corpos de prova com geogrelha se

mostrem como estruturas mais resistentes aos esforços de tração quando comparados com aqueles sem a geogrelha.

Pela Figura 8, observa-se que as geogrelhas também promoveram incremento nos valores de Módulo de Resiliência, para as misturas asfálticas de projeto de ambas as faixas de serviço consideradas. Sabendo-se que, durante a realização deste ensaio, são aplicados carregamentos cíclicos e que estes originam deformações horizontais no corpo de prova, estima-se que as geogrelhas trabalham de modo a absorver as tensões de tração a cada ciclo de carregamento, na parte central do corpo de prova, reduzindo, assim, os deslocamentos horizontais recuperáveis, aumentando a rigidez elástica do sistema. É válido ressaltar que tal comportamento pressupõe que a geogrelha, confinada na mistura asfáltica, apresente total aderência a esta, trabalhando assim como um sistema solidarizado com a mistura.

Considerando-se as particularidades de cada geogrelha empregada, verifica-se, contudo, que os aumentos de Estabilidade *Marshall*, Resistência à Tração por Compressão Diametral (RT) e Módulo de Resiliência (MR) foram dados em proporções distintas. Considerando-se os tipos de ensaios realizados e as particularidades desta pesquisa, a geogrelha que teve um efeito de reforço mais expressivo na promoção da melhoria das propriedades mecânicas das misturas asfálticas foi a GEO 3, cuja matéria-prima é o poliéster, seguida da GEO 1 (fibra de vidro) e da GEO 2 (poli álcool vinílico).

A seguir, apresenta-se, através da Figura 9, um gráfico com os dados de rigidez a 2% de deformação e na ruptura, obtidos através da divisão dos valores de resistência pelos valores de deformação apresentados na Tabela 1, referentes às três geogrelhas estudadas.



Como pode ser observado na Figura 9, as geogrelhas analisadas nesta pesquisa possuem rigidezes distintas, em vista das diferentes propriedades mecânicas que cada uma apresenta (Tabela 1), o que, considerando a afirmação de Siera (2003), são resultados das distintas composição química e estrutura do polímero que constitui cada uma. Segundo a autora, o peso molecular de um polímero influencia significativamente no comportamento dos polímeros, de modo que o aumento do peso molecular ocasiona um aumento da resistência à tração, por exemplo. Portanto, em vista do fato de serem constituídas de materiais poliméricos distintos, elas possuem diferentes propriedades mecânicas e tais propriedades proporcionaram influências diferenciadas nas misturas asfálticas.

Com base na Figura 9, é possível perceber que a geogrelha que apresenta uma menor rigidez é a GEO 3 (PET), sendo esta a geogrelha que, como apresentado nas Figuras 6, 7 e 8, promoveu os maiores incrementos nos parâmetros mecânicos aqui analisados. Segundo Vilchez (2002), para que uma geogrelha tenha sua função de reforço mobilizada, é necessário que esta sofra deformação. Assim, estima-se que, para as configurações dos ensaios e para o tipo de corpo de prova (formato e dimensões reduzidas) dessa pesquisa (Figura 10), por ser uma geogrelha que já é predisposta a permitir uma maior deformação, a GEO 3 (PET) teve uma mobilização mais eficiente de seu efeito de reforço nestes corpos de prova de dimensões reduzidas, sendo que tais corpos de prova podem limitar a deformação, restringindo, de certa forma, a mobilização da geogrelha.

Figura 10: Corpo de prova reforçado com geogrelha moldado pelo compactador *Marshall*.



Fonte: (Autoria própria, 2018).

Lao e Ramos (2009) afirmam que, entre os fatores necessários para que a geogrelha cumpra sua função de reforço de maneira satisfatória, destaca-se a necessidade de que a mesma apresente uma elevada resistência à tração, para que seja possível absorver as tensões solicitantes, e que possua uma perfeita aderência com as camadas asfálticas, de forma que seja permitida a distribuição e transferência de esforços de tração entre a geogrelha e a mistura asfáltica. Dessa forma, considerando a total aderência à mistura asfáltica apresentada, e em vista da maior mobilização da GEO 3 (PET), esta teria uma maior capacidade de absorver e redistribuir as tensões, o que, consequentemente, resultaria em uma queda nas solicitações à mistura e reduziria as deformações.

Ao reduzir de maneira mais expressiva as deformações horizontais recuperáveis, a GEO 3 (PET) promoveria um sistema mistura-geogrelha mais rígido, ou seja, com um maior Módulo de Resiliência. Além disso, por ser um elemento de elevada resistência à tração, tendo essa propriedade mobilizada de maneira mais significativa, reduz, de modo mais expressivo, as solicitações que efetivamente alcançam as misturas asfálticas, resultando em um sistema mistura asfáltica-geogrelha com uma maior Resistência à Tração por Compressão Diametral.

Ainda, em vista da maior rigidez das misturas asfálticas reforçadas com GEO 3, estas absorvem mais os esforços compressivos aplicados durante o ensaio de Estabilidade *Marshall*, de maneira a reduzir mais expressivamente as solicitações que causariam uma tendência à quebra ou deslocamento das misturas asfálticas, aumentando de modo mais significativo esse parâmetro do que as outras duas geogrelhas.

Fazendo-se uma análise comparativa dos resultados das demais geogrelhas, percebe-se, pela Figura 9, que a GEO 1 (FV) é a de maior rigidez entre as geogrelhas analisadas nesta pesquisa, e, portanto, comparativamente a esta, a GEO 2 (PVA) apresenta uma maior predisposição de se deformar, mobilizando, a princípio, uma maior capacidade de reforço para os corpos de prova. Entretanto, observando-se novamente os resultados das Figuras 6, 7 e 8, é constatada uma maior tendência por parte da GEO 1 (FV) em incrementar os parâmetros mecânicos aqui analisados.

Estima-se que essa tendência nos resultados esteja ligada ao fato de que, como a GEO 1(FV) apresenta uma maior resistência à tração (Tabela 1) e uma maior rigidez, essa maior capacidade de absorver as tensões solicitantes supera o fato de esta geogrelha ter uma menor parcela do seu reforço mobilizada por se deformar menos em vista das configurações dos ensaios aqui estudados. Apesar de ser menor, essa parcela

mobilizada apresenta um grau superior de predisposição de absorver tensões, uma vez que a capacidade resistiva desta geogrelha é maior, comparativamente à parcela de resistência mobilizada pela GEO 2 (PVA).

4 CONCLUSÃO

A partir dos resultados encontrados e considerando-se as particularidades desta pesquisa, foi possível constatar que geogrelhas com propriedades mecânicas distintas, como rigidez e resistência à tração, apresentam diferentes mobilizações do efeito de reforço, quando analisados os incrementos provocados por esses geossintéticos na Estabilidade *Marshall*, Resistência à Tração por Compressão Diametral e Módulo de Resiliência de misturas asfálticas a quente. Sendo assim, na escolha de uma geogrelha para ser utilizada como reforço de camada asfáltica, devem ser analisadas suas propriedades mecânicas, pois estas influenciam de forma distinta o desempenho mecânico de um revestimento asfáltico.

A despeito das diferenças, os resultados realçaram a habilidade das três geogrelhas em restringir, comparativamente à mistura não reforçada, os mecanismos de ruptura mecânica por tração e a tendência à quebra da mistura asfáltica, além de proporcionar uma maior rigidez às misturas asfálticas de projeto, para as duas faixas de serviço consideradas na pesquisa.

No que se refere à eficiência no incremento das propriedades mecânicas das misturas asfálticas a quente provocado pelas geogrelhas, para que a função de reforço da geogrelha seja mobilizada de maneira adequada e transmitida para a mistura, de forma que trabalhem como um sistema solidarizado, esta deve apresentar aderência satisfatória à mistura asfáltica.

Além disso, um estímulo adequado à deformação da geogrelha se mostrou um fator de grande importância no impulsionamento da sua capacidade em absorver tensões. A geogrelha de menores rigidez e resistência à tração foi aquela que promoveu o sistema mistura asfáltica-geogrelha mais rígido, provavelmente pela maior suscetibilidade à deformação em um corpo de prova padrão *Marshall*.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABU-FARSAKH, M.; CHEN, Q. *Evaluation of Geogrid Base Reinforcement in Flexible Pavement Using Cyclic Plate Load Testing*, International Journal of Pavement Engineering, v. 12, p.275-288, 2011.

AGUIAR, P. R. *Manual brasileiro de geossintéticos*. São Paulo: Ed .Edgard Blücher, 2004.

ANTE, J. R. O. *Geossintéticos como reforço de revestimentos em pavimentação*. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Brasília. 116p, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 14855: *Materiais betuminosos – Determinação da solubilidade em tricloroetileno*. Rio de Janeiro, 2002. 5p.

BASTOS, G. A. *Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas Reforçadas com Geogrelhas para Pavimentos Flexíveis*. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. Rio de Janeiro. 247 p, 2010.

BERNUCCI, L.B.; MOTTA, L.M.G.; CERATTI, J.A.P.; SOARES, J.B. *Pavimentação asfáltica – Formação básica para engenheiros*. PETROBRÁS: ABEDA. Rio de Janeiro. 475p, 2008.

BROWN, S. F.; HUGHIS, D. A. B.; BRODRICK, B. V. *Polymer Grid Reinforcement*, Thomas Telford Limited, London, UK, p.158–165, 1985.

BÜHLER, A., SEVERO, L.E.P.; VANACOR L.F.; RUWER, P.; MONTEZ, F.; VILCHEZ, G.M. *Avaliação de viabilidade e implantação de geogrelhas poliméricas no combate ao trincamento por fadiga*. Revista Estradas, v. 10, 2006.

BÜHLER, A. *Estudo do Efeito de Grelhas de Reforço na Restauração de Pavimentos*. Tese de Doutorado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, ITA, São José dos Campos/SP. 323 p, 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). Maceió/AL. Anais CD-ROM, 2014.

CLEVELAND, G. S.; BUTTON, J. W.; LYTTON, R. L. *Geosynthetics in flexible and rigid pavements overlays systems to reduce reflection cracking*. Report N° FHWA/TX-02/1777. Texas Department of Transportation Research and Technology Implementation Office. Texas, p. 1-297p. 2002.

COLLIN, J. G., KINNEY, T.C.; FU, X. *Full Scale Highway Load Test of Flexible Pavement Systems with Geogrid Reinforced Base Courses*. Geosynthetics Internacional. v. 3, n. 4, p. 537-549, 1996.

CORREIA, N. S. *Desempenho de pavimentos flexíveis utilizando geogrelha como reforço de capa asfáltica*. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos/SP. 205 p. 2014.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES. *Pesquisa CNT de Rodovias 2017*. Relatório Gerencial. Brasília/DF.402 p, 2017.

CORREIA, N. S.; ZORNBERG, J. G. *Mechanical response of flexible pavements enhance with geogrid-reinforced asphalt overlays*. Geosynthetics Internacional. v. 23, n. 3, p.183-193, 2016.

DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER – ME 004/94 – *Material betuminoso – determinação da viscosidade Saybolt-Furol a alta temperatura* (ABNT-MB 571). Rio de Janeiro. 1994e.

_____.DNER- ME 086/94 – *Agregado: determinação do índice de forma*. Rio de Janeiro. 1994a.

_____.DNER-ME 078/94: *Agregado graúdo - adesividade a ligante betuminoso*. Rio de Janeiro. 1994b.

_____.DNER-ME 089/94: *Agregados – avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio*. Rio de Janeiro. 1994c.

_____. DNER-ME 148/94: *Material betuminoso – determinação dos pontos de fulgor e de combustão: método de ensaio*. Rio de Janeiro, 1994d.

_____.DNER-ME 043/95: *Misturas betuminosas a quente – Ensaio Marshall para misturas betuminosas*. Rio de Janeiro. 1995.

_____.DNER-ME 266/97: *Agregados – determinação do teor de materiais pulverulentos*. Rio de Janeiro. 1997.

_____.DNER-ME 054/97: *Equivalente de Areia – Método de ensaio*. Rio de Janeiro. 1997b.

_____.DNER-ME 035/98: *Agregados: determinação da abrasão “Los Angeles”*. Rio de Janeiro. 1998a.

_____.DNER-ME 081/98: *Agregados: determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo*. Rio de Janeiro. 1998b.

_____.DNER-ME 194/98: *Agregados - determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco chapman*. Rio de Janeiro. 1998c.

_____.DNER-ME 083/98: *Agregado – Análise granulométrica – Método de ensaio*. Rio de Janeiro. 1998d.

_____.DNER-ME 009/98: *Petróleo e derivados – determinação da densidade – método do densímetro*. Rio de Janeiro. 1998e.

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

_____.DNIT 155/2010: ME: *Material asfáltico – Determinação da penetração: método de ensaio*. Rio de Janeiro, 2010a

_____.DNIT 131/2010: ME: *Materiais asfálticos – Determinação do ponto de amolecimento – Método do anel e bola – Método de ensaio*. Rio de Janeiro. 2010b.

_____.DNIT 178/2018: ME: *Pavimentação asfáltica – Preparação de corpos de prova para ensaios mecânicos usando o compactador giratório Superpave ou o Marshall – Procedimento*. Rio de Janeiro. 2018a.

_____.DNIT 136/2018: ME: *Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio*. Rio de Janeiro. 2018b.

_____.DNIT 135/2018: ME: *Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio*. Rio de Janeiro. 2018c.

GRAZIANI, A.; PASQUINI, E.; FERROTTI, G.; VIRGILI, A.; CANESTRARI, F. *Structural response of grid-reinforced bituminous pavements*. Materials and Structures, v. 47, n. 8, p. 1391–1408, 2014.

HOZAYEN, H.; GERVAIS, M.; ABD EL HALIM, A.O.; HAAS, R. *Analytical and experimental investigations of operating mechanisms in reinforced asphalt pavement*. Journal of the Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 1388, p. 80–87, 1993.

HUESKER Ideen. Ingeniure. Innovationen. *Aplicações e Produtos*. Disponível em: <<http://www.huesker.com.br/>> Acesso em: 15 de novembro, 2018.

LAO, V.L.E.S.T.; RAMOS, C.R *Estudo e emprego de grelha polimérica anti-reflexão de trincas em pavimentos flexíveis*. XV Congresso Íbero-Latino americano de Asfalto (CILA).Lisboa. 2009.

LAURINAVICIUS, A.; OGINSKAS, R. *Experimental research on the development of rutting in asphalt concrete pavements reinforced with geosynthetic materials*. Journal of Civil Engineering and Management, v. 12, n. 4, p. 311–317, 2006.

LEE, J.; KIM, Y. R.; LEE, J. *Rutting performance evaluation of asphalt mix with diferente types of geosynthetics using MMLS3*. International Journal of Pavement Engineering. v. 16, n.10, p. 894-905, 2014.

MONTESTRUQUE, G.; BERNUCCI, L.; LEITE, F.; CARMO, C. *Avaliação da adherencia de geogrelhas entre camadas asfálticas*. Memorias XVIII Congreso Ibero Latino americano del Asfalto, ISBN 978-950-630-031-9. p. 919-929. Bariloche, Argentina. 2015.

PERKINS, S. W. *Mechanical response of geosynthetic reinforced flexible pavements*. Geosynthetics International. v. 6, n. 5, p. 347–382, 1999.

RAMOS, C.M; FONTENELE H.B. *Avaliação de pavimentos com uma escala visual*. XXX Congresso Nacional de Pesquisa em Transporte da ANPET. Rio de Janeiro. Anais. 2016.

SIEIRA, A. C. C. F. *Estudo Experimental dos Mecanismos de Interação Solo-Geogrelha*. Tese de Doutorado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. Rio de Janeiro. 353 p, 2003.

SILVA, A. E. *Aplicação de “Georeforços” em Obras Viárias*. Seminário de Geotecnia do Rio Grande do Sul – Geo RS’2007. Rio Grande do Sul. 2007.

TANG, X., SOFFELS, S. M.; PALOMINO, A. M. *Mechanistic empirical approach to characterizing permanent deformation of reinforced soft soil subgrade*. Geotextiles and Geomembranes, p. 1–13, 2015.

VERTEMATTI, J. C. *Manual Brasileiro de Geossintéticos*. CTG-ABINT. São Paulo. 570p, 2015.

VILCHEZ, G. E. M.; SILVA, A. E. F. *Principais efeitos da incorporação de geogrelhas no concreto asfáltico*. In: Seminário Nacional de modernas técnicas rodoviárias, 2, Florianópolis. Anais. 2000.

VILCHEZ, G. E. M. *Contribuição para a elaboração de um método de projeto de restauração de pavimentos asfálticos utilizando geossintéticos em sistemas anti-reflexão de trincas*. Tese de Doutorado - Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA, São José dos Campos, São Paulo. 121p, 2002.

WU, H.; HUANG, B.; SHU, X.; ZHAO, S. *Evaluation of geogrid reinforcement effects on unbound granular pavement base courses using loaded wheel tester*. Geotextiles and Geomembranes, v. 43, n. 5, p. 462–469, 2015.

ZORNBERG, J. G.; GUPTA, R. *Geosynthetics in pavements: North American contributions. Theme speaker lecture*. Proceedings of the 9th International Conference on Geosynthetics, Brazilian Chapter of the International Geosynthetics Society, Guarujá, SP, Brazil, v. 1, p. 379–400, 2010.

CAPÍTULO 5

ANÁLISE ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS COM DIFERENTES REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS REFORÇADOS POR GEOGRELHAS

RESUMO: Diversos estudos envolvendo estruturas de pavimentos têm sido desenvolvidos visando à maximização de seus desempenhos funcional e estrutural. Uma proposta que vem sendo amplamente empregada visando essa maximização corresponde ao uso de geogrelhas como elemento de reforço. Em relação especificamente à aplicação da geogrelha na camada de revestimento asfáltico, o número de pesquisas direcionadas à análise estrutural ainda é limitado, visto que estas quase que exclusivamente avaliam o efeito do reforço geossintético sobre as propriedades mecânicas da camada de revestimento. Neste contexto, o objetivo desta pesquisa foi analisar o efeito da inserção de geogrelhas no desempenho estrutural de um pavimento-tipo. Para tal, foram realizadas uma etapa experimental e uma etapa de análise empírico-mecanística, com o uso de um programa computacional. O programa experimental foi constituído pela dosagem de misturas asfálticas a quente, nas faixas granulométricas B e C da especificação de serviço do DNIT, através do método *Marshall*. Definidas as misturas asfálticas de projeto, foram moldados corpos de prova sem geogrelha e com inserção de geogrelha, considerando-se três tipos distintos desse geossintético. Em tais corpos de prova, foram realizados os ensaios de Resistência à Tração por Compressão Diametral e Módulo de Resiliência. Na sequência, foi realizado um total de 24 análises empírico-mecanísticas, utilizando-se o programa *me-PADS*, variando-se os tipos de revestimento asfáltico (reforçados e não reforçados), para as duas faixas de serviço mencionadas, em uma estrutura de pavimento-tipo pré-dimensionada. Os resultados mostraram um incremento, por parte das geogrelhas, nas propriedades mecânicas analisadas em laboratório. Em relação à análise estrutural, os revestimentos reforçados com as geogrelhas apresentaram maiores níveis de tensão de tração nas fibras inferiores e menores valores de deflexões recuperáveis quando comparados com as respostas estruturais do pavimento-tipo com camadas de revestimento não reforçadas. Esses resultados, que são reflexo da maior rigidez dos revestimentos reforçados, se mostraram como satisfatórios apenas para os revestimentos com misturas asfálticas de faixa granulométrica C, onde tal condição indicou uma tendência à maior resistência à ruptura por tração do revestimento. No que se refere às deflexões máximas, para ambos os revestimentos, todas as geogrelhas promoveram uma redução em seus valores, deixando estes ainda mais distantes do valor de deflexão admissível definido por norma comparativamente aos revestimentos não reforçados.

PALAVRAS-CHAVE: Geogrelhas; Resistência à Tração por Compressão Diametral; Módulo de Resiliência; Análise Empírico-Mecanística

ABSTRACT: Several studies involving pavement structures have been developed aiming to maximize their structural capacity. A proposal widely used to improve structural performance of pavements corresponds to the application of geogrids as reinforcement element. In relation to geogrid application in asphalt overlayers, studies directed to the structural analysis are still limited, once they are almost exclusively to evaluate the effect of geosynthetics on the mechanical properties of asphalt surface

courses. In this respect, the purpose of this study is to investigate the effect of the geogrid insertion on the structural performance of a pavement. This study was consisted of an experimental stage and a mechanistic-empirical analysis using a computer program. The experimental program comprised the design of hot asphalt mixtures within the DNIT service specification's gradation bands B and C using Marshall mix design method. Then, test specimens were molded with the insertion of three different geogrid types and without geogrid reinforcement. Tensile Resistance (Brazilian Test) and Resilient Modulus tests were carried out on molded specimens. Further, a total of 24 mechanistic-empirical analysis were performed on a pre-designed pavement structure using me-PADS program, varying the asphalt overlayers types (reinforced and non-reinforced) for the two gradation bands adopted in this study. The results pointed an increase in the mechanical properties analyzed in laboratory due to the geogrids insertion. Regarding the structural analysis, the geogrid-reinforced asphalt overlayer presented higher tensile stress levels in the lower fibers and lower values of recoverable deflections when compared to the structural responses of the non-reinforced asphalt overlayer. These results reflected an increase in stiffness of the reinforced asphalt overlayer, and proved to be satisfactory only for asphalt mixtures designed within the gradation band C which exhibited a higher tensile strength to failure. Geogrid insertions have reduced the maximum deflections in both types of asphalt surface courses, keeping them even more distant from the maximum permissible deflection values when compared to those for non-reinforced asphalt overlayers.

KEYWORDS: Geogrids; Tensile Resistance (Brazilian Test); Resilient Modulus Tests; Mechanistic-Empirical Analysis.

1 INTRODUÇÃO

A maior parte dos trechos rodoviários no Brasil é composta por pavimentos com revestimento asfáltico. A cultura referente ao uso desse tipo de estrutura de pavimento vem desde a década de 1970, tempo em que o uso de pavimentos flexíveis era uma solução economicamente mais viável que um pavimento rígido (SANTOS, 2011).

Diversos estudos, envolvendo tanto estruturas de pavimentos rígidos quanto flexíveis, têm sido desenvolvidos visando à maximização de seus desempenhos funcional e estrutural e a minimização de seus custos, sejam de implantação ou de manutenção.

Nesse contexto de maximização do desempenho de pavimentos, uma proposta que vem sendo amplamente empregada no meio técnico pertinente à engenharia viária corresponde ao uso de geogrelhas como elementos de reforço das camadas estruturais dos mesmos. Austin e Gilchrist (1996) relataram que o uso de geogrelha em uma

camada de concreto asfáltico contribui para reduzir o desenvolvimento de deformações permanentes, restringindo a suscetibilidade da mesma aos afundamentos em trilhas de roda (ATR). Em seus estudos, os autores constataram, através da comparação de resultados envolvendo camadas de concreto asfáltico reforçadas e não reforçadas, uma redução de até 70% nas dimensões dos sulcos das deformações.

Relatos provenientes de um estudo de campo realizado por Buhler (2007) mostram que a presença da geogrelha foi capaz de reduzir a profundidade dos sulcos, presentes nos ATR, em 40% em relação aos resultados obtidos em uma seção de controle não reforçada.

Em pesquisa que envolveu análises baseadas em testes em larga escala em camadas de misturas asfálticas reforçadas e não reforçadas, Correia e Zornberg (2016) constataram uma melhoria considerável no desempenho estrutural dos pavimentos em vista da presença da geogrelha. Tal melhoria foi traduzida pela redução das deformações permanentes nas camadas asfálticas, das tensões verticais nas camadas do pavimento e dos deslocamentos resilientes na superfície de rolamento.

Graziani et al. (2014) desenvolveram um estudo envolvendo um trecho experimental construído com uma camada asfáltica reforçada com geogrelha, a partir do qual foi realizada uma análise sobre a sua resposta estrutural, focada em um monitoramento das deformações. Os resultados mostraram uma redução geral de 65% da magnitude das tensões de tração na seção reforçada em relação à seção não reforçada.

Canestrati et al. (2015), em seus estudos para investigar os impactos causados pelo reforço de geogrelha presente na interface entre duas camadas de asfalto, também constataram uma diminuição das deformações permanentes nos corpos de prova reforçados em relação aos corpos de prova não reforçados.

De acordo com Neto (2004), os ensaios laboratoriais apenas fornecem modelos de comportamento dos materiais em determinada condição experimental, não permitindo uma comparação direta com o comportamento apresentado pelo material em condições reais de campo. Para que seja possível avaliar o desempenho estrutural de misturas asfálticas sob situações de carregamentos reais, são empregados métodos mecanísticos de análise. Tais métodos têm como base teorias que preveem as tensões e deformações oriundas do carregamento atuante na estrutura do pavimento, buscando compará-las com as tensões resistentes e as deformações limites de cada camada

estrutural, tendo, dessa forma, um panorama da estrutura quando solicitada em situações reais de campo.

Modernamente, esse tipo de análise estrutural é realizado através de programas computacionais. Esses programas permitem, de maneira precisa, definir o estado de tensões em sistemas de camadas elásticas submetidas a esforços de tráfego. Para tanto, tal aplicação exige o conhecimento prévio dos parâmetros elásticos dos materiais que compõem cada camada do pavimento, que devem ser determinados em laboratório ou em campo ou estimados com base na experiência do analista (IWANAGA, 2007).

Métodos de ensaio capazes de fornecer, de maneira relativamente rápida e econômica, as características elásticas essenciais dos materiais das camadas dos pavimentos têm permitido uma maior frequência de aplicações da teoria da elasticidade à pavimentação, através das análises estruturais. Segundo Pinto e Preussler (2010), tem-se observado, nos últimos anos, uma crescente tendência do uso da teoria de camadas elásticas nos projetos de pavimentos novos e de reforço de pavimentos antigos.

A Teoria de Sistemas de Camadas Elásticas (TSCE) foi desenvolvida por Donald Burmister, que partiu do equacionamento geral da Teoria da Elasticidade em três dimensões para a formulação do problema. O modelo de Burmister apoia-se nas seguintes hipóteses: (i) todas as camadas são elásticas e lineares em termos de respostas dos materiais; (ii) todas as camadas são infinitas na direção horizontal e possuem espessura constante; (iii) não existem descontinuidades nas camadas do pavimento, exceto na superfície do revestimento; (iv) não existem forças de gravidade agindo no sistema; e (v) não existem nem deformações nem tensões iniciais residuais (BALBO, 2007).

Réus e Fontenele (2014) desenvolveram um estudo empregando um software baseado na Teoria de Sistemas de Camadas Elásticas, no qual as autoras avaliaram comparativamente os efeitos que a variação de espessuras e módulos de elasticidade das camadas, bem como do tráfego, provocam nas respostas estruturais referentes à tensão de tração na fibra inferior do revestimento e na tensão de compressão no topo do subleito e, conseqüentemente, no desempenho estrutural de um pavimento flexível.

Bastos (2010), utilizando esse tipo de software e considerando o comportamento elástico-linear dos materiais envolvidos, obteve bacias de deflexão que foram utilizadas para retro análises correspondentes a estruturas de pavimentos reforçadas com geogrelha e sem geogrelha com subleito inundado.

Em sua pesquisa envolvendo a inserção do reforço geossintético na camada de base de um pavimento, com o objetivo de avaliar o efeito da inserção de geogrelha na fadiga de um revestimento asfáltico, Kakuda (2010) considerou uma estrutura de pavimento hipotético e determinou as tensões geradas na fibra inferior do revestimento asfáltico utilizando o programa Elsym5 e os módulos de resiliência determinados a partir de retroanálise. Os resultados encontrados demonstraram uma extensão na vida de fadiga para as estruturas reforçadas com geogrelha.

Neste contexto, e considerando a importância de pesquisas envolvendo análise do comportamento estrutural de pavimentos reforçados com geogrelha, a presente pesquisa propõe a análise empírico-mecanística de estruturas de pavimento-tipo cujas camadas de revestimento são reforçadas com três geogrelhas, de modo a contribuir com a compreensão da efetiva influência desses elementos de reforço nestas estruturas.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

Para a composição das misturas asfálticas a quente, foram utilizados agregados minerais de formação gnáissica e um ligante asfáltico convencional. Em relação ao ligante asfáltico, foi empregado o CAP 50/70, proveniente da refinaria Gabriel Passos (REGAP), localizado em Betim-MG, e fornecido pela empresa Stratura Asfalto S/A. Este ligante foi certificado pelo laboratório da Petrobrás sob o nº 2505-14G. No que se refere aos agregados, grãos e miúdo, foram utilizados brita 1, brita 0 e pó de pedra, oriundos da pedreira Ervália Ltda., localizada no município de Ervália-MG.

As geogrelhas avaliadas neste trabalho são produzidas para reforço de camadas asfálticas, fabricadas a partir de filamentos poliméricos e aderidas a um geotêxtil não tecido ultraleve, sendo estes compostos cobertos por um material betuminoso. Os três tipos de geogrelhas analisadas são: poliéster (PET), poli álcool vinílico (PVA) e de fibra de vidro (FV). Tais geogrelhas foram fornecidas pela empresa HUESKER Ltda., localizada em São José dos Campos-SP. As características tecnológicas básicas destas geogrelhas, fornecidas pelo fabricante, são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 6: Propriedades e características básicas fornecidas pelo fabricante das três geogrelhas analisadas

Propriedade	Geogrelha de Fibra de Vidro (FV)	Geogrelha de Poliálcool vinílico (PVA)	Geogrelha de Poliéster (PET)
Resistência à tração	64,6 kN/m	54,9kN/m	53,6 kN/m
Deformação na ruptura	2,4%	5,9%	9,3%
Resistência a 2% de deformação	56,48 kN/m	15,9 kN/m	12,2 kN/m
Resistência a 3% de deformação	-	23,2 kN/m	15,4 kN/m
Abertura da malha nominal	30 mm x30 mm	40 mm x40 mm	40 mm x40 mm

2.2 Métodos

Foram realizadas as caracterizações do ligante asfáltico e dos agregados minerais, de acordo com os procedimentos de norma apresentados nas Tabelas 2 e 3, seguidas do enquadramento da combinação destes últimos nas faixas granulométricas B e C contidas na especificação de serviço ES031 (DNIT, 2006), aplicável ao concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ).

Tabela 2: Ensaios de caracterização dos agregados minerais.

Ensaio	Norma
Índice de forma dos agregados graúdos	ME086 (DNER,1994a)
Ensaio de material pulverulento	ME 266 (DNER, 1997a)
Abrasão “Los Angeles” dos agregados graúdos	ME 035 (DNER,1998a)
Adesividade dos agregados graúdos ao ligante asfáltico	ME 078(DNER, 1994b)
Absorção dos agregados	ME 081 (DNER,1998b)
Massa específica real e aparente	ME 081 (DNER,1998b)
Massa específica do agregado miúdo	ME 194 (DNER,1998d)
Sanidade dos agregados graúdos	ME 089 (DNER,1994c)
Equivalente de areia	ME 054 (DNER,1997b)
Análise granulométrica dos agregados	ME 083 (DNER,1998c)

Tabela 3: Ensaios de caracterização do ligante asfáltico

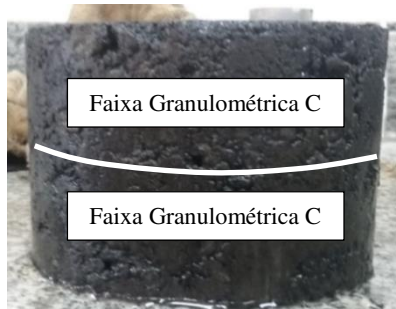
Ensaio	Norma
Massa específica real	ME 009 (DNER, 1998e)
Densidade relativa	ME 009 (DNER, 1998e)
Penetração	ME 155 (DNIT, 2010)
Ponto de fulgor	ME 148 (DNER, 1994d)
Ponto de combustão	ME 148 (DNER, 1994d)
Ponto de amolecimento	ME 131 (DNIT, 2010a)
Solubilidade em Tricloroetileno	NBR 14855 (ABNT, 2002)
Viscosidade Saybolt-Furol	ME 004 (DNER, 1994f)

Em sequência à definição dos respectivos teores de projeto de ligante dos dois tipos de misturas asfálticas correspondentes às faixas B e C, através do método

Marshall, foram compactados corpos de prova com o esforço recomendado pela ME 043 (DNER, 1995) de 75 golpes por face, com e sem a inserção das geogrelhas. Assim, foram moldados corpos de prova não reforçados e reforçados com cada uma das três geogrelhas, para os dois teores de projeto definidos.

Na Figura 1, apresenta-se um corpo de prova Faixa C reforçado com geogrelha, com a demarcação da posição da geogrelha dentro do corpo de prova.

Figura 1: Corpo de prova reforçado com geogrelha.



Fonte: (Autoria própria, 2018).

Os ensaios mecânicos realizados nos corpos de prova reforçados e não reforçados foram os de Resistência à Tração por Compressão Diametral (RT), de acordo com a ME 136 (DNIT, 2018a), e de Módulo de Resiliência (MR), de acordo com a ME 135 (DNIT, 2018b).

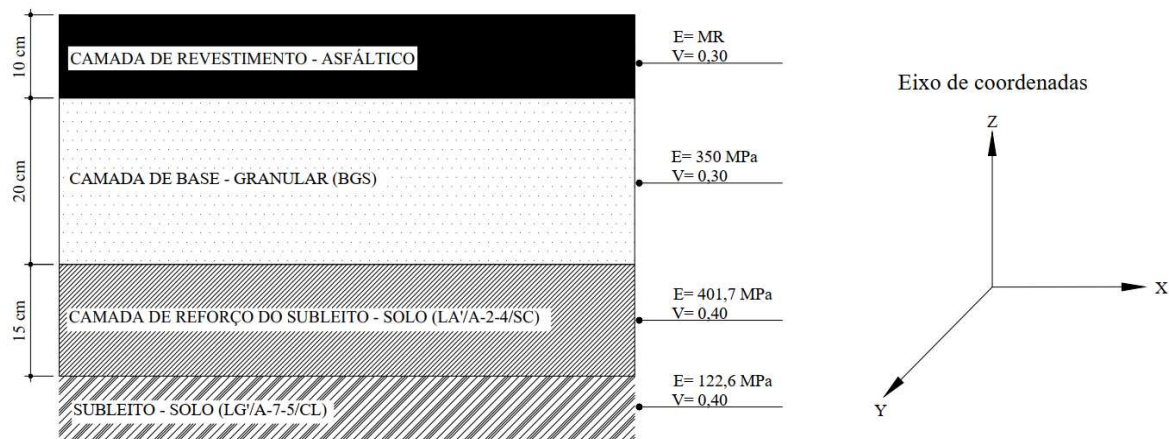
Para a realização da análise estrutural, foi definida, previamente, uma estrutura de pavimento-tipo, pré-dimensionada de maneira empírica. Para a realização das análises, foi empregado o *Mechanistic Empirical Pavement Analysis and Design Software* (*me-PADS*), um software capaz de modelar múltiplas camadas e cargas de pavimentos (MAINA, 2008).

As análises, cujo objetivo foi observar o efeito da inserção da geogrelha na camada de revestimento asfáltico sobre o desempenho estrutural do pavimento, foram feitas de modo que a única variável a ser alterada foi a referente à camada asfáltica, nas condições não reforçada e reforçada. Assim, com base nos valores de Módulo de Resiliência obtidos através dos ensaios de laboratório, para os corpos de prova de ambas as faixas granulométricas estudadas, nas condições sem reforço e com reforço para as três geogrelhas, foram realizadas análises elástico-lineares por meio do *me-PADS*, admitindo o Módulo de Resiliência (MR) igual ao Módulo de Elasticidade (E).

Os dados de entrada adotados nesse software constituíram-se nas propriedades das camadas do pavimento [espessura, Módulo de Elasticidade (E) e coeficiente de

Poisson (ν)], localização das cargas e suas magnitudes e coordenadas dos pontos nos quais foram avaliadas as respostas estruturais do pavimento-tipo. A Figura 2 apresenta o pavimento-tipo adotado para as análises de tensões e deformações desta pesquisa.

Figura 2: Estrutura de pavimento-tipo adotada para as análises estruturais e eixo de coordenadas de referência.



Fonte: (Autoria própria, 2019).

Em relação aos parâmetros de entrada empregados, expostos na Figura 2, no que se refere ao coeficiente de Poisson, foi considerada a afirmativa de Ponte et al. (2014) de que, quando não é possível a determinação desse coeficiente, é recomendado que se adote o valor de $\nu=0,30$. Tal valor foi empregado para a camada de revestimento asfáltico e para a camada de base (granular). O valor do Módulo de Elasticidade da camada de base também foi extraído do estudo de Ponte et al. (2014). Para a definição do subleito e reforço do subleito, utilizaram-se as características dos materiais para tais camadas presentes no trabalho de Carmo (1998).

No que se refere ao nível de carregamento, foram empregados três níveis: 80 kN, 98 kN e 118 kN. A seleção de tais níveis foi baseada em algumas premissas: o carregamento de 80 kN (8,2 tf) constitui-se na carga correspondente ao eixo padrão de 18.000 lb, considerada baixa; o valor de 98 kN (10,0 tf) é referente à carga máxima permitida pela legislação brasileira para eixo simples de rodas duplas (ESRD); no que se refere ao carregamento de 118 kN (12,0 tf), tal valor representa uma carga 20% acima da máxima permitida pela referida legislação, sendo 10% o limite de tolerância legal. Ao se adotar uma carga 20% acima da permitida, objetiva-se expor as consequências causadas às estruturas de pavimento quando há excesso de carga nos eixos dos veículos comerciais nas estradas.

De modo semelhante, foram utilizados três níveis correspondentes de pressão de enchimento dos pneus: para o carregamento de 80 kN, adotou-se uma pressão igual a 563 kPa, que constitui uma pressão-padrão utilizada na pista experimental da AASHTO e normatizada para a determinação da deflexão, de acordo com o método de ensaio ME 024 (DNER, 1994); para os carregamentos de 98 kN e 118 kN, considerando-se pressões média e alta, respectivamente, foram adotados os valores de 633 kPa e 703 kPa.

Após as análises empírico-mecanísticas, os dados de saída do software *me-PADS* avaliados nesta pesquisa foram: as tensões horizontais atuantes nas fibras inferiores dos revestimentos reforçados e não reforçados e as deflexões recuperáveis máximas.

As deflexões máximas obtidas através do software foram estudadas de maneira comparativa à deflexão admissível calculada segundo o procedimento PRO 011 (DNER, 1979), considerando o nível de carregamento para tráfego pesado ($N = 5 \times 10^7$) apresentado pelo Manual de Pavimentação (DNIT, 2006).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização dos agregados

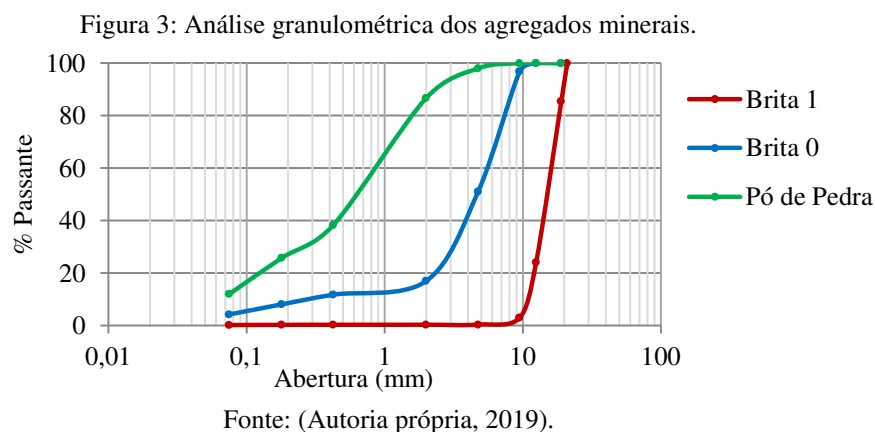
A caracterização dos agregados minerais utilizados nesta pesquisa é apresentada na Tabela 4.

Tabela 4: Resultados dos ensaios de caracterização dos agregados minerais.

Ensaio	Resultado
Índice de forma dos agregados graúdos	0,68
Ensaio de material pulverulento	16,66%.
Abrasão " <i>Los Angeles</i> " dos agregados graúdos	45%
Adesividade dos agregados graúdos ao ligante betuminoso	Satisfatório com adição de 0,1% de material dopante
Absorção - Brita 0	1,14%
Massa específica real- Brita 0	2,794 g/cm ³
Massa específica aparente- Brita 0	2,722 g/cm ³
Absorção - Brita 1	1,14%
Massa específica real - Brita 1	2,794 g/cm ³
Massa específica aparente - Brita 1	2,722 g/cm ³
Massa específica do agregado miúdo	2,794 g/cm ³
Sanidade dos agregados graúdos	0,38%
Equivalente de areia	59%
Análise granulométrica dos agregados	-

Os resultados obtidos atendem o exigido pelas normas, com exceção do ensaio de adesividade agregado/ligante, que apresentou uma não conformidade com o exigido. Essa não conformidade foi reparada a partir do acréscimo de um material melhorador de adesividade ao ligante, em 0,10% em peso do ligante asfáltico.

Na Figura 3, é apresentada a granulometria dos agregados minerais utilizados.



3.2 Caracterização do ligante asfáltico

Os resultados referentes à caracterização do CAP 50/70 são apresentados na Tabela 5.

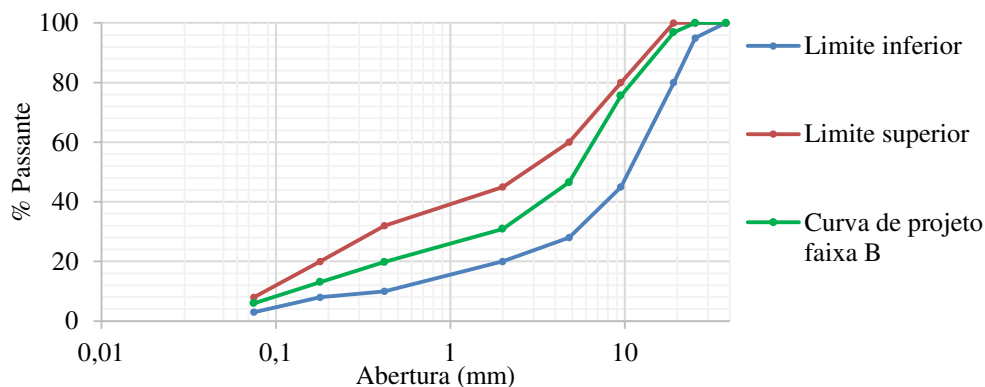
Tabela 5: Resultados dos ensaios de caracterização do ligante asfáltico

Ensaio	Resultado
Massa específica real	1,010 g/cm ³
Densidade relativa	1,006
Penetração	57 dmm
Ponto de fulgor	343°C
Ponto de combustão	365°C
Ponto de amolecimento	51°C
Solubilidade em Tricloroetileno	100%
Viscosidade <i>Saybolt-Furol</i>	135 °C – 172 segundos 150 °C – 64 segundos

3.3 Composições granulométricas de projeto

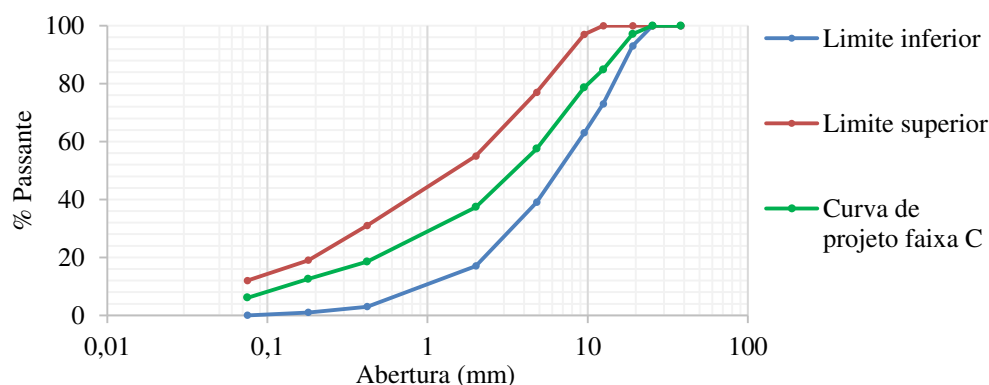
As curvas granulométricas de projeto utilizadas para a composição das misturas asfálticas são apresentadas nas Figuras 4 e 5, juntamente com os limites das respectivas Faixas B e C prescritas pela ES 031 (DNIT, 2006).

Figura 4: Curva granulométrica de projeto e limites da Faixa B.



Fonte: (Autoria própria, 2019).

Figura 5: Curva granulométrica de projeto e limites da Faixa C.



Fonte: (Autoria própria, 2019).

3.4 Dosagem das misturas asfálticas

Na Tabela 6, são apresentados os resultados dos parâmetros volumétricos das misturas asfálticas de projeto analisadas e seus respectivos teores de ligante asfáltico de projeto, obtidos através da dosagem *Marshall*. Estes valores de teores de ligante de projeto foram determinados de modo que os parâmetros volumétricos correspondentes se enquadrassem dentro dos limites impostos pela especificação de serviço ES 031 (DNIT, 2006).

Tabela 6: Parâmetros volumétricos obtidos através da Dosagem *Marshall* para as misturas asfálticas de projeto.

Parâmetro	Faixa B	Faixa C
Teor de Projeto (%)	4,20	4,70
Volume de Vazios (%)	4,36	4,19
Relação Betume-Vazios (%)	70,39	76,10

3.5 Ensaios Mecânicos de Resistência à Tração por Compressão Diametral e Módulo de Resiliência

Os resultados referentes aos ensaios de Resistência à Tração por Compressão Diametral (RT) e Módulo de Resiliência (MR), realizados nos corpos de prova das misturas asfálticas Faixa B e Faixa C, com e sem a inserção das três geogrelhas, são apresentados na Tabela 7.

Em relação à identificação das geogrelhas, a geogrelha de fibra de vidro (FV) será referida como GEO 1, a de poli álcool vinílico (PVA) como GEO2 e a de poliéster como (PET) GEO3.

Tabela 7: Resultados dos ensaios mecânicos.

Mistura Asfáltica	Condição de Reforço	Resistência à Tração por Compressão Diametral (MPa)	Módulo de Resiliência (MPa)
Faixa B	SEM GEOGRELHA	0,95	3947
	GEO 1 (FV)	1,07	4951
	GEO 2 (PVA)	1,02	4401
	GEO 3 (PET)	1,14	6951
Faixa C	SEM GEOGRELHA	0,91	4073
	GEO 1 (FV)	1,18	5394
	GEO 2 (PVA)	1,15	5102
	GEO 3 (PET)	1,22	7745

Observando-se estes resultados, é possível perceber que a presença das três geogrelhas gerou um incremento nos valores de Resistência à Tração por Compressão Diametral e de Módulo de Resiliência quando comparados aos resultados obtidos para a condição não reforçada. Estima-se que tal incremento é proveniente da mobilização da função de reforço das geogrelhas, que foi transmitida ao sistema mistura asfáltica-geogrelha em decorrência da total aderência desses elementos geossintéticos às misturas asfálticas a quente estudadas.

3.6 Análises empírico-mecanísticas

Considerando-se os resultados dos ensaios mecânicos das misturas asfálticas não reforçadas e reforçadas com as três geogrelhas, realizados na etapa experimental desta pesquisa, e os três níveis de carregamento e de pressão de enchimento dos pneus previstos, foram totalizadas 24 análises empírico-mecanísticas para o pavimento-tipo.

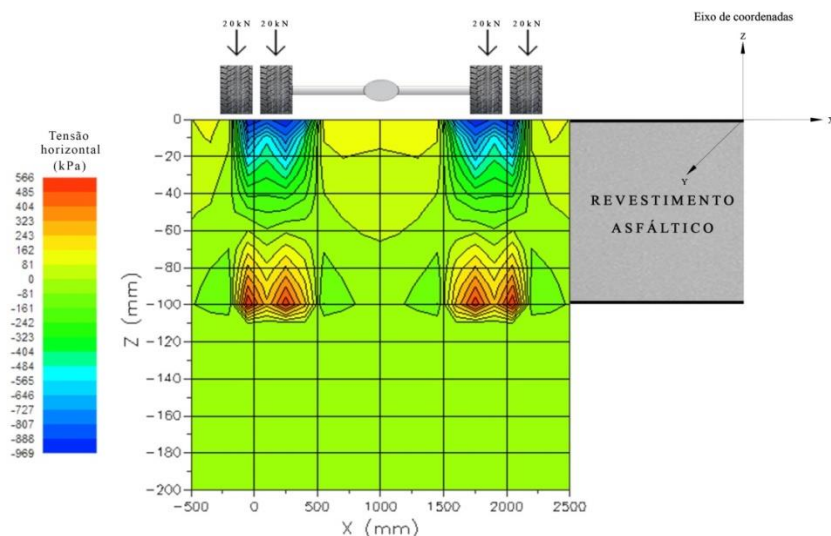
Tais análises contaram com oito estruturas de pavimento-tipo que tiveram apenas a camada de revestimento asfáltico alterada, variando-se as misturas asfálticas de projeto entre Faixa B e Faixa C e as condições de reforço já apresentadas na Tabela 7.

Para as tensões horizontais, foram identificados como críticos os pontos do bordo inferior do revestimento asfáltico, nos quais as tensões de tração foram máximas. Através das Figuras 6 e 7, é possível observar a distribuição das tensões horizontais de tração e compressão geradas no pavimento, atuantes no plano vertical coincidente com o plano de atuação do carregamento, além dos pontos de atuação das tensões horizontais de tração máximas.

Na Figura 6, para fins ilustrativos, tem-se a seção transversal representativa das tensões horizontais atuantes na estrutura de pavimento-tipo em decorrência do carregamento aplicado, com o revestimento asfáltico constituído por mistura asfáltica Faixa C, na condição não reforçada, submetida ao nível de carregamento $Q_1=80$ kN de carga por eixo e à pressão de enchimento $P_1=563$ kPa. Na Figura 7, são apresentadas as tensões horizontais para esta mesma situação, porém na condição de revestimento asfáltico reforçado com a geogrelha GEO 1 (FV).

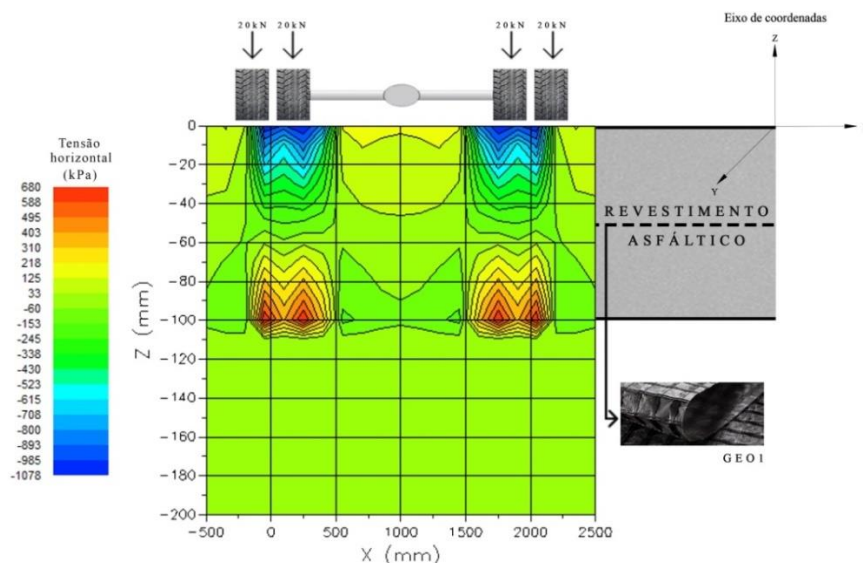
Os resultados das tensões horizontais de tração máxima, considerando os três níveis de carregamento (Q_{eixo}) e de pressão de enchimento dos pneus (P_{pneu}), são apresentados nos gráficos das Figuras 8 e 9. Nestes gráficos, também são apresentadas as resistências à tração por compressão diametral de cada condição, obtidas na etapa experimental deste trabalho.

Figura 6: Tensões horizontais de tração (+) e compressão (-) na estrutura do pavimento-tipo analisado para a condição não reforçada do revestimento asfáltico Faixa C: $Q_1=80$ kN e $P_1=563$ kPa.



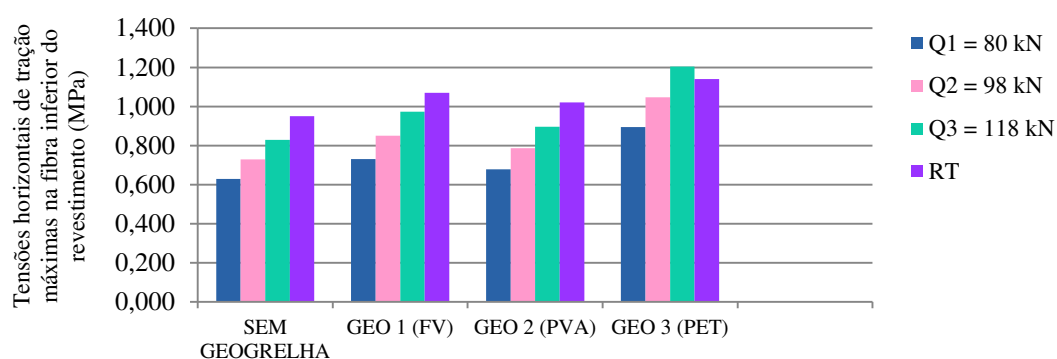
Fonte: (Autoria própria, 2019).

Figura 7: Tensões horizontais de tração (+) e compressão (-) na estrutura do pavimento-tipo analisado para a condição reforçada com a geogrelha GEO 1 (FV) do revestimento asfáltico Faixa C: $Q_1=80$ kN e $P_1=563$ kPa.



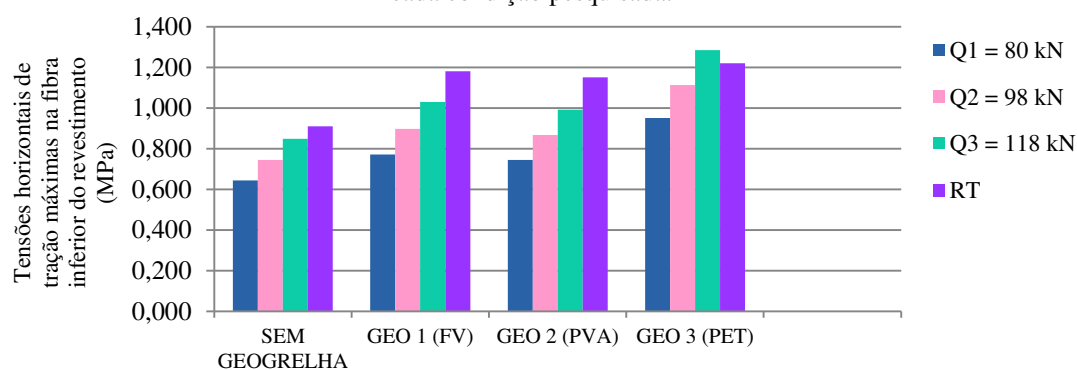
Fonte: (Autoria própria, 2019).

Figura 8: Tensões horizontais de tração máximas atuantes na fibra inferior da camada de revestimento (misturas asfálticas Faixa B) e correspondente resistência à tração por compressão diametral (RT) para cada condição pesquisada.



Fonte: (Autoria própria, 2019).

Figura 9: Tensões horizontais de tração máximas atuantes na fibra inferior da camada de revestimento (misturas asfálticas Faixa C) e correspondente resistência à tração por compressão diametral (RT) para cada condição pesquisada.



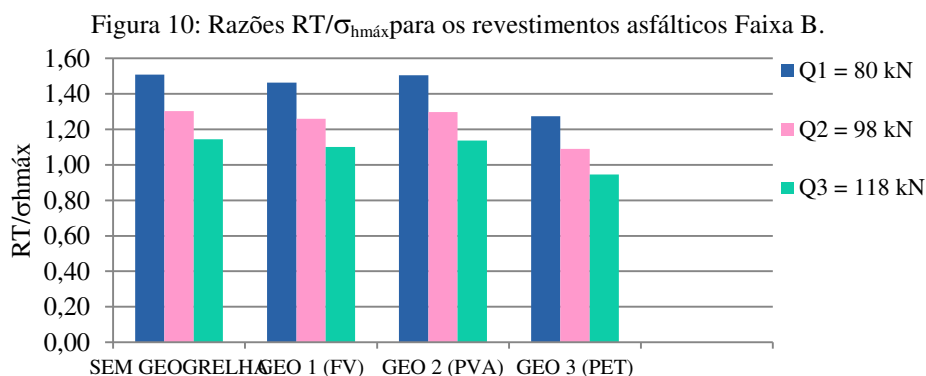
Fonte: (Autoria própria, 2019).

Observando-se os resultados apresentados nestes gráficos, percebe-se que as tensões horizontais de tração máxima nas fibras inferiores foram maiores para as condições de reforço com geogrelhas, comparativamente com os respectivos revestimentos não reforçados. Tal comportamento está ligado com o aumento de rigidez proporcionado pela geogrelha às misturas asfálticas.

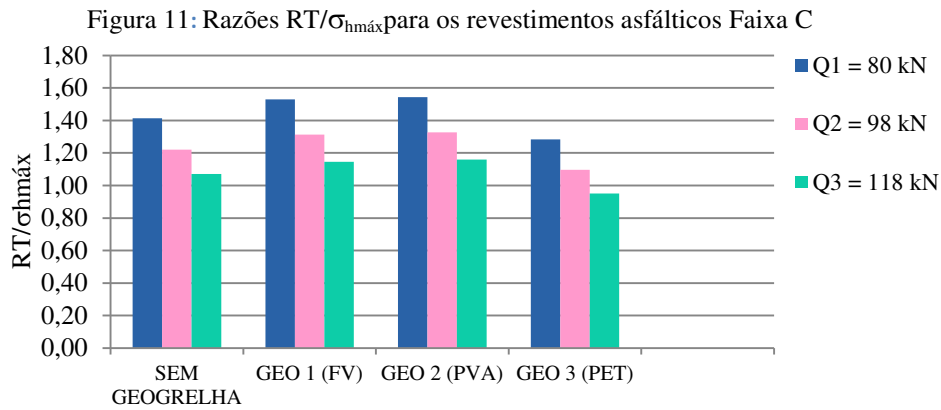
Considerando as diferentes proporções de rigidez incrementadas por distintas geogrelhas aos revestimentos asfálticos, faz-se válido observar as interferências causadas por esses incrementos nas respostas estruturais do pavimento. Como é possível perceber através das Figuras 8 e 9, quanto maior for esse aumento na rigidez das misturas asfálticas, reflexo de um maior MR apresentado pelos sistemas mistura asfáltica-geogrelha, conseqüentemente, mais expressiva será a concentração de tensões na camada de revestimento e, por conseguinte, maior a magnitude da tensão horizontal de tração na fibra inferior, independente da faixa de serviço correspondente à mistura asfáltica de projeto da camada de revestimento.

Além disso, pode ser observado que, apesar dos maiores níveis de tensão de tração na fibra inferior apresentados pelos revestimentos com geogrelha, estes foram capazes de resistir a essas tensões de tração em todas as condições analisadas, exceto para a condição de reforço com GEO 3 (PET) no nível de carregamento de 118 kN, situação em que a solicitação superou a resistência à tração. Assim, para essa condição particular de carregamento (20% acima do permitido), constata-se que o excesso de carga nos eixos dos veículos comerciais pode ter como consequência a ruptura por tração da camada de revestimento da estrutura do pavimento.

Nas Figuras 10 e 11, apresentam-se as respectivas relações entre a resistência à tração por compressão diametral (RT) de cada revestimento estudado e a tensão horizontal de tração máxima ($\sigma_{hm\acute{a}x}$) atuante, para cada um dos cenários investigados.



Fonte: (Autoria própria, 2019).



Fonte: (Autoria própria, 2019).

Essa razão entre a RT , obtida na etapa experimental, e as tensões horizontais de tração máximas, obtidas nas análises empírico-mecanísticas, pode ser analisada sob a perspectiva de um fator de segurança à ruptura do revestimento asfáltico por tração estática. Em uma análise comparativa entre os revestimentos reforçados e os não reforçados, observa-se um comportamento distinto entre os diferentes tipos de revestimentos.

Nos revestimentos com misturas asfálticas Faixa B, essa razão foi maior para condição sem geogrelha do que para as condições com as três geogrelhas, indicando uma menor tendência à ruptura por tração por parte da mistura não reforçada, independente do carregamento aplicado. Ressalta-se, obviamente, que o aumento do nível de carregamento solicitante reduz essa razão, visto que a resistência à tração da mistura asfáltica é um fator constante e as tensões de tração atuantes aumentam com o acréscimo de solicitação aplicada ao revestimento.

Para os revestimentos com misturas asfálticas Faixa C, a razão $RT/\sigma_{hm\acute{a}x}$ foi maior para o caso dos revestimentos com geogrelhas, com exceção dos reforçados com GEO 3 (PET), comparativamente aos revestimentos sem geogrelha. Esse aumento indica que a presença das GEO 1 (FV) e GEO 2 (PVA) promoveu no revestimento Faixa C uma compatibilização mais eficiente entre a rigidez proporcionada por esses elementos de reforço, responsável pelo aumento nos níveis das tensões de tração nas fibras inferiores do revestimento, e o ganho também proporcionado na resistência à tração dos revestimentos com geogrelha.

O caso específico da GEO 3 (PET), no qual a inserção dessa geogrelha em ambos revestimentos (Faixa B e Faixa C) ocasionou uma redução da relação $RT/\sigma_{hm\acute{a}x}$, implica na conclusão de que um ganho elevado de rigidez para o revestimento asfáltico,

promovido pela presença da geogrelha, pode se reverter em problema ao pavimento, dependendo do nível de solicitação aplicada. Como pode ser observado, o aumento do nível do carregamento foi reduzindo a compatibilização entre os esforços solicitantes e a resistência do revestimento asfáltico, até o ponto em que, para o carregamento de 118 kN, as tensões horizontais de tração atuantes se tornaram superiores à resistência à tração do revestimento. Nesta situação, a razão $RT/\sigma_{hm\acute{a}x}$ apresentou valores menores que a unidade, indicando a ocorrência de ruptura por tração nos revestimentos asfálticos

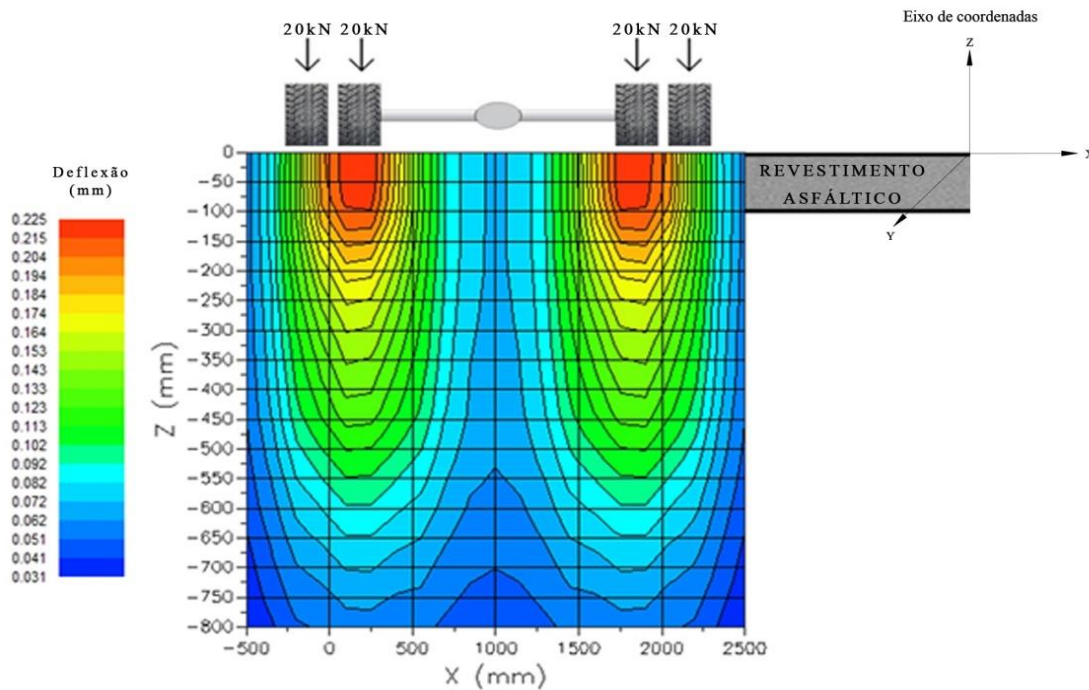
Em relação a essa diferença de comportamento entre os revestimentos Faixa B e Faixa C, é possível que esta esteja ligada com a mobilização distinta do elemento de reforço, em vista da especulação de melhor aderência promovida pelos revestimentos Faixa C. Analisando-se os gráficos das Figuras 10 e 11, percebe-se que a influência da presença das geogrelhas nos revestimentos Faixa C foi maior que nos revestimentos Faixa B. Na condição sem geogrelha, nos revestimentos Faixa C, as razões $RT/\sigma_{hm\acute{a}x}$ são inferiores às da Faixa B, independente do carregamento solicitante, e já nas condições de reforço com GEO 1 (FV) e GEO 2 (PVA), as razões $RT/\sigma_{hm\acute{a}x}$ da Faixa C são superiores, ultrapassando as razões da Faixa B, para todos os carregamentos aplicados.

Dessa forma, supõe-se que o efeito do reforço da geogrelha seja mais expressivo nas misturas Faixa C e, conseqüentemente, que os revestimentos compostos por tais misturas apresentam uma redução na tendência de ruptura de tração, desde que a geogrelha inserida na mistura asfáltica não promova uma rigidez excessiva.

No que se refere às deflexões verticais recuperáveis obtidas através do software *me-PADS*, foram identificados como críticos os pontos da superfície do revestimento asfáltico nos quais as suas magnitudes foram máximas. Para fins de ilustração, as Figuras 12 e 13 apresentam as respectivas distribuições desse parâmetro no pavimento, ao longo do plano vertical coincidente com o plano de atuação do carregamento, para $Q_1= 80$ kN e $P_1= 563$ kPa, para as estruturas de pavimento com revestimento asfáltico Faixa C, não reforçado e reforçado com geogrelha GEO 3 (PET), respectivamente.

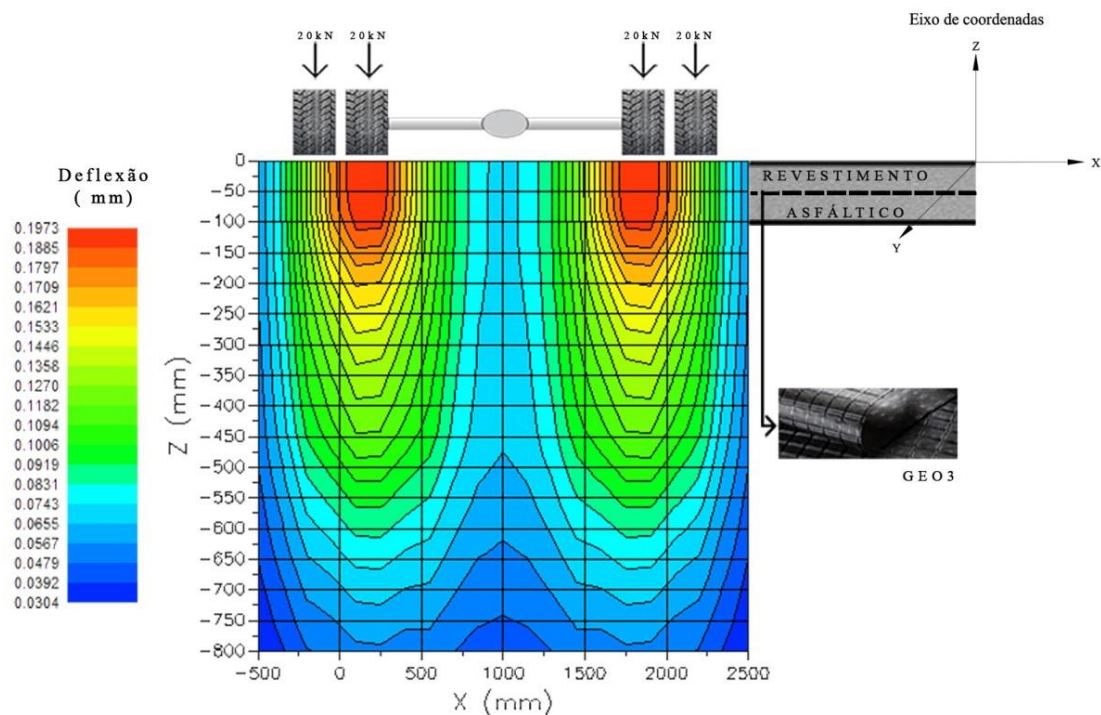
Em sequência, nas Figuras 14 e 15, são apresentadas as deflexões verticais recuperáveis máximas no topo da camada asfáltica do pavimento-tipo analisado, para cada um dos carregamentos estudados, para todas as condições de reforço propostas, comparativamente à deflexão admissível calculada, considerando-se, nesse cálculo, a carga por eixo de 80kN e o número de solicitações $N=5.10^7$.

Figura 12: Deflexões verticais recuperáveis na estrutura do pavimento-tipo analisado com revestimento asfáltico Faixa C não reforçado: $Q1=80\text{kN}$ e $P1=563\text{kPa}$.



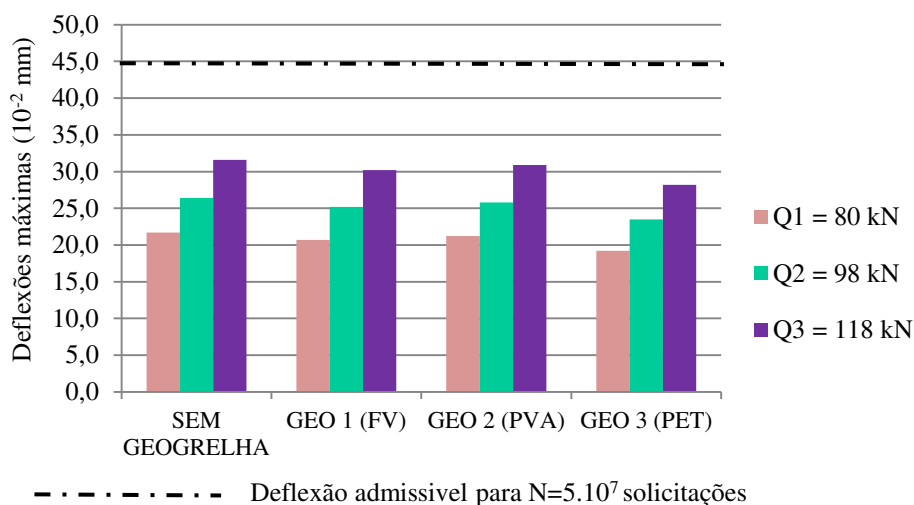
Fonte: (Autoria própria, 2019).

Figura 13: Deflexões verticais recuperáveis na estrutura do pavimento-tipo analisado com revestimento asfáltico Faixa C reforçado com geogrelha GEO 3 (PET): $Q1=80\text{kN}$ e $P1=563\text{kPa}$.



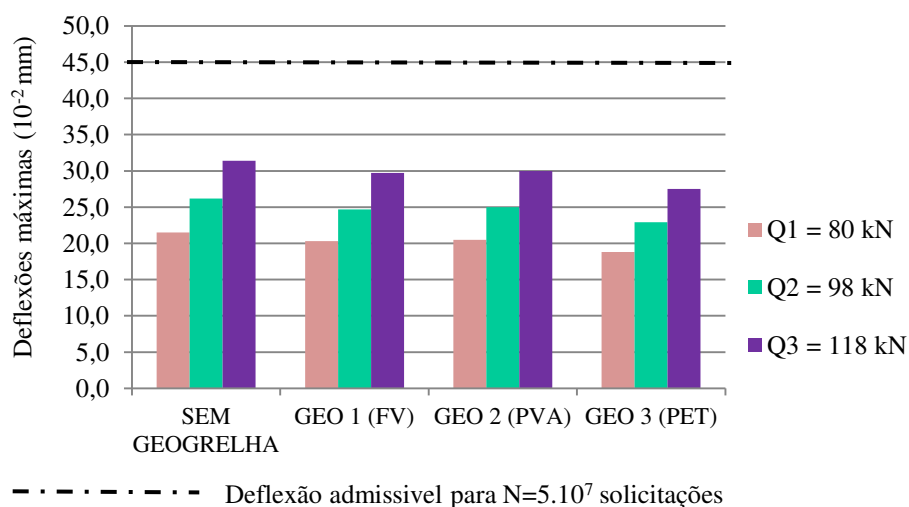
Fonte: (Autoria própria, 2019).

Figura 14: Deflexões verticais recuperáveis máximas e admissível (para $N=5.10^7$ solicitações) comparadas para as condições de reforço do revestimento asfáltico Faixa B.



Fonte: (Autoria própria, 2019).

Figura 15: Deflexões verticais recuperáveis máximas e admissível (para $N=5.10^7$ solicitações) comparadas para as condições de reforço do revestimento asfáltico Faixa C.



Fonte: (Autoria própria, 2019).

Observando-se os gráficos das Figuras 14 e 15, é possível constatar a ocorrência de menores níveis de deflexões, crescentes com o aumento do nível de carregamento, para as situações em que a camada de revestimento do pavimento-tipo apresentou a condição de reforço com geogrelhas, para ambos os revestimentos asfálticos. Esse comportamento estrutural diferenciado pode ser justificado pela maior rigidez elástica dos revestimentos reforçados, traduzida pelo aumento nos valores de Módulo de Resiliência de ambas as misturas asfálticas promovido pela inserção das geogrelhas.

Em uma análise comparativa entre os dois tipos de revestimentos estudados, independentemente das condições de reforço e de carregamento, percebe-se que os revestimentos Faixa B apresentaram valores de deflexões máximas maiores que os correspondentes aos revestimentos Faixa C.

Tal comportamento pode ser justificado pelo fato de os revestimentos Faixa B serem menos rígidos que os revestimentos Faixa C e que a presença da geogrelha, apesar de reduzir essa capacidade de deformação, não a reduz a ponto de superar os revestimentos Faixa C sob mesmas condições.

A partir desses gráficos, ainda é possível constatar que, tanto para o revestimento Faixa B quanto para o Faixa C, as estruturas de pavimento analisadas, considerando todas as condições de reforço, apresentaram deflexões máximas inferiores à deflexão admissível calculada considerando tráfego pesado, representado pelo $N=5.10^7$ solicitações do eixo padrão de 80kN.

4 CONCLUSÃO

A presente pesquisa teve como objetivo estudar o efeito da presença de geogrelhas no desempenho estrutural de camadas de revestimento asfáltico, através de uma análise empírico-mecanística. Foi possível constatar que as alterações, provocadas pela presença das geogrelhas, nas propriedades mecânicas de Resistência à Tração por Compressão Diametral e Módulo de Resiliência, obtidas na etapa experimental da pesquisa, refletiram na forma com que os pavimentos-tipo constituídos por revestimentos asfálticos reforçados responderam ao carregamento e tiveram seus estados de tensões alterados em relação aos revestimentos não reforçados.

Mediante análise dos resultados, para os níveis de carregamento (carga por eixo e pressão dos pneus) e as particularidades deste trabalho, foi observado que os revestimentos reforçados com as geogrelhas, por serem mais rígidos que os revestimentos sem geogrelha, apresentaram uma maior concentração de tensões de tração nas fibras inferiores do revestimento. Entretanto, é válido ressaltar que as condições reforçadas apresentaram maior resistência à tração, não sendo, portanto, essa maior concentração de tensões necessariamente um problema, para praticamente todos

os casos, pois, apesar dos maiores níveis de solicitação de tração, estes revestimentos apresentavam uma maior resistência frente tais esforços.

A única exceção à constatação anterior correspondeu ao carregamento que objetivava simular o excesso de carga nas estradas, com a condição de reforço da geogrelha de poliéster. Apesar desta geogrelha ter produzido revestimentos asfálticos de maiores Resistência à Tração por Compressão Diametral e Módulo de Resiliência, por resultar em um revestimento asfáltico bem mais rígido que os demais analisados, este sistema reforçado apresentou níveis de tensões de tração nas fibras inferiores que ultrapassaram sua resistência à tração, o que causaria a ruptura destes revestimentos. Os revestimentos asfálticos constituídos pelas demais geogrelhas (fibra de vidro e poliálcool vinílico) apresentaram comportamento satisfatório até mesmo para o nível de carregamento acima do permitido.

No que se refere à compatibilização das consequências resultantes de uma maior rigidez do revestimento asfáltico e uma maior resistência à tração em decorrência da inserção do reforço por geogrelha, o efeito positivo dessa compatibilização foi encontrado apenas para os revestimentos com faixa granulométrica C, que apresentaram uma maior segurança frente à ruptura por tração. Além disso, foi possível concluir que esse aumento de rigidez é um fator positivo até certo limite, pois uma rigidez excessiva pode levar a ruptura por tração do revestimento.

Em relação às deflexões máximas recuperáveis, os revestimentos constituídos por geogrelhas, por apresentarem maiores rigidezes que os revestimentos sem geogrelha, atingiram menores valores de tal parâmetro. Todos os revestimentos pesquisados, reforçados e não reforçados, apresentaram, para todas as condições de carregamento contempladas na pesquisa, deflexões verticais recuperáveis máximas inferiores à deflexão admissível calculada para o cenário de tráfego e carregamento adotado ($N=5.10^7$ e carga por eixo de 80 kN).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 14855: *Materiais betuminosos – Determinação da solubilidade em tricloroetileno*. Rio de Janeiro, 2002. 5p.

AUSTIN, R.A.; GILCHRIST, A.J.T. *Enhanced performance of asphalt pavements using geocomposites*. Geotextiles and Geomembranes, v.14, n. 3–4, p. 175–186, 1996.

BALBO, J. T. *Pavimentação Asfáltica – Materiais, Projeto e Restauração*. Oficina de Textos, São Paulo. 558 p, 2007.

BASTOS, G.A *Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas Reforçadas com Geogrelhas para Pavimentos Flexíveis*. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. Rio de Janeiro. 247 p, 2010.

BÜHLER, A. *Estudo do Efeito de Grelhas de Reforço na Restauração de Pavimentos*. Tese de Doutorado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, ITA, São José dos Campos/SP. 323 p, 2007.

CARMO, C.A.T.A *avaliação do módulo de resiliência através de ensaios triaxiais dinâmicos de dois solos compactados e a sua estimativa a partir de ensaios rotineiros*. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos.131p, 1998.

CANESTRARI, F.; BELOGI, L.; FERROTTI, G.; GRAZIANI, A. *Shear and flexural characterization of grid-reinforced asphalt pavements and relation with field distress evolution*.Materials and Structures.v.48, n. 4, p. 959–975, 2015.

CORREIA, N. S.; ZORNBERG, J. G. *Mechanical response of flexible pavements enhance with geogrid-reinforced asphalt overlays*. Geosynthetics International. v. 23, n.3, p.183-193,2016.

DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER – PRO 011/79 – *Avaliação estrutural dos pavimentos flexíveis - Procedimento de ensaio*. Rio de Janeiro. 1979.

_____.DNER- ME 004/94:Material betuminoso – determinação da viscosidade Saybolt-Furol a alta temperatura (ABNT-MB 571). Rio de Janeiro. 1994a.

_____.DNER- ME 086/94:Agregado: determinação do índice de forma. Rio de Janeiro. 1994b.

_____.DNER-ME 078/94: Agregado graúdo - adesividade a ligante betuminoso. Rio de Janeiro. 1994c.

_____.DNER-ME 089/94: Agregados – avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio. Rio de Janeiro. 1994d.

_____. DNER – ME 148: Material betuminoso – determinação dos pontos de fulgor e de combustão: método de ensaio. Rio de Janeiro, 1994e.

_____.DNER-ME 024/94:Pavimento – determinação das deflexões pela viga Benkelman. Rio de Janeiro. 1994f.

_____.DNER-ME 043/95: Misturas betuminosas a quente – Ensaio Marshall para misturas betuminosas. Rio de Janeiro. 1995.

_____.DNER-ME 266/97: Agregados – determinação do teor de materiais pulverulentos. Rio de Janeiro. 1997.

_____.DNER-ME 054/97: Equivalente de Areia – Método de ensaio. Rio de Janeiro. 1997b.

_____.DNER-ME 035/98: Agregados: determinação da abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro. 1998a.

_____.DNER-ME 081/98: Agregados: determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo. Rio de Janeiro. 1998b.

_____.DNER-ME 194/98: Agregados - determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco chapman. Rio de Janeiro. 1998c.

_____.DNER-ME 083/98: Agregado – Análise granulométrica – Método de ensaio. Rio de Janeiro. 1998d.

_____.DNER-ME 009/98: Petróleo e derivados – determinação da densidade – método do densímetro. Rio de Janeiro. 1998e.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (2006). *DNIT – Manual de Pavimentação*. 3ª Ed. Rio de Janeiro: [s.n.], 2006.

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

_____.DNIT 155/2010: ME: *Material asfáltico – Determinação da penetração: método de ensaio*. Rio de Janeiro, 2010a

_____.DNIT 131/2010: ME: *Materiais asfálticos – Determinação do ponto de amolecimento – Método do anel e bola – Método de ensaio*. Rio de Janeiro. 2010b.

_____.DNIT 136/2018: ME: *Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio*. Rio de Janeiro. 2018b.

_____.DNIT 135/2018: ME: *Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio*. Rio de Janeiro. 2018c.

GRAZIANI, A.; PASQUINI, E.; FERROTTI, G.; VIRGILI, A.; CANESTRARI, F. *Structural response of grid-reinforced bituminous pavements*. Materials and Structures, v. 47, n. 8, p. 1391–1408, 2014.

IWANAGA, F. I. *Avaliação da influência do tipo de agregado, do teor de ligante, do tipo de moldagem e do tipo de filer na vida de fadiga de misturas asfálticas densas*. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. Engenharia Civil. São Paulo. 119 p, 2007.

KAKUDA, F. M. *Desenvolvimento e a utilização de um equipamento de grandes dimensões na análise do comportamento mecânico de uma seção de pavimento sob carregamento cíclico*. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes. São Carlos, SP. 290 p, 2010.

MAINA, J. W.; DENNEMAN, E.; DE BEER, M. *Introduction of new road pavement response modelling software by means of benchmarking*. 27th Annual Southern African Transport Conference, 2008.

NETO, R. S. B. *Análise comparativa de pavimentos dimensionados através dos Métodos empíricos do DNER e Mecanístico e Proposta de um catálogo simplificado de pavimentos para a região de Campo Grande (MS)*. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. Engenharia Civil. São Carlos, São Paulo. 189 p, 2004.

RÉUS, T. F.; FONTENELE, H. B. *Sensibilidade dos pavimentos flexíveis a partir de análises empírico-mecanísticas*. XXVIII Congresso Nacional de Pesquisa em Transporte da ANPET. Curitiba, Paraná. Anais, 2014.

SANTOS, C.R.G. *Dimensionamento e análise do ciclo de vida de pavimentos rodoviários: uma abordagem probabilística*. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Engenharia Civil. São Paulo. 296 p, 2011.

PINTO, S.; PREUSSLER, E.S. *Pavimentação Rodoviária – Conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis*. Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis. Rio de Janeiro. 220 p, 2010.

PONTE, R.S.; BRANCO V. T. F. C.; HOLANDA A. S.; SOARES J. S. *Avaliação de diferentes metodologias para obtenção do Módulo de Resiliência de misturas asfálticas*. Transportes, v. 22, n.2,p. 85-94, 2014.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES GERAIS

Nesta pesquisa, foi proposto analisar-se a influência da presença de geogrelhas em propriedades mecânicas de misturas asfálticas a quente, através de um estudo comparativo com misturas asfálticas a quente não reforçadas, e a interferência de suas variantes em uma estrutura de pavimento-tipo. Os efeitos causados pela inserção das geogrelhas foram observados mediante um programa experimental de ensaios mecânicos de laboratório e por meio de análises empírico-mecanísticas, de forma a contribuir no avanço da compreensão dos mecanismos de reforço promovidos por esses geossintéticos em camadas asfálticas.

Pelos resultados dos ensaios de laboratório realizados nas misturas reforçadas com a geogrelha de poliéster e considerando-se as particularidades deste trabalho, a inserção deste geossintético promoveu uma melhoria no comportamento mecânico de ambos os revestimentos (faixa B e faixa C) no que se refere ao aumento dos valores de Estabilidade *Marshall*, Resistência à Tração por Compressão Diametral, Módulo de Resiliência e na redução da magnitude das deformações plásticas obtidas pelo ensaio de *Creep* Estático.

Através dos ensaios de Fadiga à Tensão Controlada, foi observado que o possível incremento de vida de fadiga, proporcionado pela inserção da geogrelha nas misturas asfálticas, se mostrou dependente do nível de tensão solicitante. Para níveis de tensão mais baixos, as misturas com geogrelha foram capazes de resistir a um maior número de ciclos de carregamento na ruptura do que as misturas sem geogrelha, sendo este comportamento invertido com o aumento no nível de tensão aplicada. Outra observação proveniente deste ensaio foi que as misturas asfálticas com geogrelha se mostraram mais suscetíveis a sofrer deformações acumulativas por tração, sendo de certa forma mais propensas ao fenômeno de fadiga.

No estudo sobre o efeito de geogrelhas dotadas de distintas propriedades mecânicas sobre os parâmetros mecânicos de misturas asfálticas a quente reforçadas, a despeito das diferenças, os resultados realçaram a habilidade das três geogrelhas em restringir, comparativamente às misturas não reforçadas, os mecanismos de ruptura mecânica por tração e a tendência à quebra da mistura asfáltica, além de proporcionar

uma maior rigidez às misturas asfálticas de projeto reforçadas.

A influência dessas geogrelhas foi dada de forma diferenciada, em vista das diferentes mobilizações do efeito de reforço apresentadas por cada uma. Essa diferença de mobilização foi atribuída a uma provável diferença de suscetibilidade de cada geogrelha em se deformar em um corpo de prova de formato cilíndrico e de dimensões reduzidas, sendo que um estímulo adequado à deformação da geogrelha se mostrou um fator de grande importância no impulsionamento da sua capacidade em absorver tensões.

Uma constatação proveniente das análises desta pesquisa é que a aderência das geogrelhas às misturas asfálticas, independente do tipo analisado, é um condicionante essencial para que os mecanismos de reforço desse geossintético sejam transferidos às misturas asfálticas, de forma que ambos trabalhem como um sistema solidarizado, alterando, assim, as propriedades mecânicas aqui estudadas.

Em relação às análises empírico-mecanísticas, foi possível perceber que as alterações provocadas pela presença das geogrelhas nas propriedades mecânicas de Resistência à Tração por Compressão Diametral e mais ainda no Módulo de Resiliência, obtidos na parte experimental da pesquisa, refletiram na forma com que os revestimentos asfálticos reforçados responderam às solicitações e tiveram seus estados de tensões alterados em relação aos revestimentos não reforçados.

Mediante a análise dos resultados, para os níveis de carregamento (carga por eixo e pressão dos pneus) e as particularidades deste trabalho, foi observado que os revestimentos reforçados com as geogrelhas, por serem mais rígidos que os revestimentos sem geogrelha, apresentaram uma maior concentração de tensões de tração nas fibras inferiores do revestimento.

Entretanto, é válido ressaltar que as condições reforçadas apresentaram maior resistência à tração, não sendo, portanto, essa maior concentração de tensões necessariamente um problema, para praticamente todos os casos, pois, apesar dos maiores níveis de solicitação de tração, estes revestimentos apresentaram uma maior resistência frente tais esforços.

No que se refere à compatibilização das consequências resultantes de uma maior rigidez do revestimento asfáltico e uma maior resistência à tração em decorrência da inserção do reforço por geogrelha, o efeito positivo dessa compatibilização, sendo este uma tendência de maior segurança frente à ruptura por tração, se mostrou dependente do tipo de revestimento asfáltico. Além disso, foi possível concluir que esse aumento de

rigidez, causador da redução da magnitude das deflexões máximas recuperáveis apresentadas pelos revestimentos com geogrelhas, é um fator positivo até certo limite, pois uma rigidez excessiva pode levar à ruptura por tração do revestimento, dependendo do nível de solicitação.

Em relação aos efeitos causados pela inserção das geogrelhas nos diferentes revestimentos asfálticos estudados nesta pesquisa, estes apresentaram influências distintas no incremento dos parâmetros mecânicos avaliados na parte experimental, provavelmente devido às diferenças de interação física entre o geossintético e as respectivas granulometrias de projeto desses revestimentos.

É possível concluir, ainda, que, apesar das limitações impostas por ensaios de laboratório por não simularem totalmente as situações reais de campo, tais ensaios identificam alterações diferenciadas em vista da inserção de distintos tipos de geogrelhas. Além disso, como muitos projetos de pavimentos são baseados em soluções empíricas e em resultados obtidos em ensaios de laboratório, a aplicabilidade prática destes ensaios envolvendo sistemas do tipo misturas asfálticas-geogrelhas não pode ser descartada ao se pensar em projetos de pavimentos que envolvem camadas asfálticas reforçadas com tais geossintéticos.

Além do mais, a realização de análise estrutural com o uso de programas computacionais, trabalhando de maneira complementar aos resultados obtidos no ambiente de laboratório, auxilia na compreensão dos efeitos e dos mecanismos de reforço das geogrelhas em uma estrutura de pavimento de maneira abrangente, sendo esta uma proposta de estudo e análises que permite avaliar variados tipos de situações possíveis de maneira rápida.