

MATHEUS COVELO MACHADO

**COMPORTAMENTO MECÂNICO DE PRÉ-MISTURADOS A FRIO DENSOS
COM EMULSÕES ASFÁLTICAS CONVENCIONAL E MODIFICADA POR
POLÍMERO COM E SEM GEOSSINTÉTICO**

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
2018

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

T

M149c
2018

Machado, Matheus Covelo, 1992-
Comportamento mecânico de pré-misturados a frio densos com emulsões asfálticas convencional e modificada por polímero com e sem geossintético / Matheus Covelo Machado. – Viçosa, MG, 2018.
xi, 77f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

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

1. Misturas com emulsão asfáltica. 2. Geossintéticos.
3. Polímeros. 4. Compactação. 5. Resistência de materiais.
I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.
II. Título.

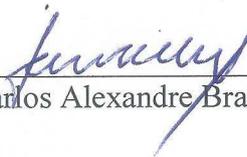
CDD 22. ed. 625.85

MATHEUS COVELO MACHADO

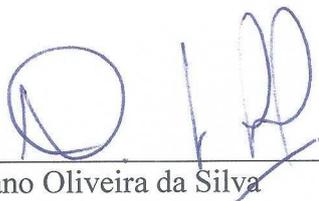
**COMPORTAMENTO MECÂNICO DE PRÉ-MISTURADOS A FRIO DENSOS
COM EMULSÕES ASFÁLTICAS CONVENCIONAL E MODIFICADA POR
POLÍMERO COM E SEM GEOSSINTÉTICO**

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*.

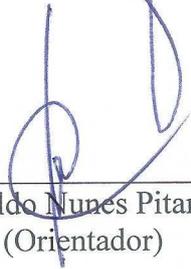
APROVADA: 30 de maio de 2018.



Carlos Alexandre Braz de Carvalho



Taciano Oliveira da Silva
(Coorientador)



Heraldo Nunes Pitanga
(Orientador)

Dedico este trabalho aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais João Antônio e Alda, por todo apoio e carinho demonstrado ao longo dessa caminhada, sempre torcendo pelo meu sucesso.

À minha irmã Beatriz, por ter estado comigo em todos os momentos dessa jornada e sempre contribuindo para meu crescimento pessoal.

À Emuriela, pelo companheirismo, compreensão, carinho e atenção em todos os momentos.

Ao meu orientador Heraldo, pela excelente orientação e riquíssima contribuição para a execução deste trabalho.

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

Aos meus estagiários Rubia, Déborah, Luiz e Natalia, pelo apoio na execução dos ensaios de laboratório.

Ao Giovani, pela disponibilidade e boa vontade no auxílio no que fosse preciso.

Ao Professor Geraldo Luciano de Oliveira Marques, pela valiosa ajuda e disponibilidade demonstradas na realização dos ensaios no Laboratório de Pavimentação da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Juiz de Fora.

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

À CAPES e ao CNPq, pelo incentivo à pesquisa, pelas oportunidades concedidas e pela bolsa.

Às empresas Stratura Asfaltos S. A., pelo fornecimento dos ligantes asfálticos, Huesker, pelo fornecimento da geogrelha, e Pedreira Ervália, pelo fornecimento gratuito dos agregados empregados nesta pesquisa.

A todos os amigos que fizeram parte desta conquista.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	v
LISTA DE TABELAS	vii
RESUMO	viii
ABSTRACT	x
1. INTRODUÇÃO GERAL	1
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	3
2. ANÁLISE COMPARATIVA DA DOSAGEM <i>MARSHALL</i> EM PRÉ-MISTURADO À FRIO DENSO COM E SEM CONTROLE DE UMIDADE DE COMPACTAÇÃO ..	4
2.1. INTRODUÇÃO	5
2.2. MATERIAIS E MÉTODOS	7
2.2.1. Materiais	7
2.2.2. Métodos	7
2.3. RESULTADOS E DISCUSSÕES	9
2.4. CONCLUSÕES	16
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	18
3. PROPRIEDADES MECÂNICAS DE PRÉ-MISTURADO A FRIO DENSO COM E SEM A INSERÇÃO DE REFORÇO GEOSINTÉTICO	21
3.1. INTRODUÇÃO	22
3.2. MATERIAIS E MÉTODOS	25
3.2.1. Materiais	25
3.2.2. Métodos	25
3.3. RESULTADOS E DISCUSSÕES	29
3.4. CONCLUSÃO	41
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	43
4. AVALIAÇÃO DO EFEITO DO LIGANTE ASFÁLTICO MODIFICADO NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE PRÉ-MISTURADOS A FRIO DENSOS COM E SEM REFORÇO GEOSINTÉTICO	48
4.1. INTRODUÇÃO	50
4.2. MATERIAIS E MÉTODOS	51
4.2.1. Materiais	52
4.2.2. Métodos	52
4.3. RESULTADOS E DISCUSSÕES	55
4.4. CONCLUSÃO	68
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70
5. CONCLUSÃO	75
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	77

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1- Análise granulométrica dos agregados minerais	10
Figura 2.2 - Faixa granulométrica de trabalho e granulometria da mistura de projeto ...	11
Figura 2.3 - Valores de (a) Estabilidade <i>Marshall</i> da análise de umidade de compactação, (b) Massa específica aparente e (c) volume de vazios em função da umidade de compactação relativamente ao peso dos agregados secos.....	12
Figura 2.4 - Exsudação do material betuminoso na base do molde no momento da compactação.....	13
Figura 2.5 - Parâmetros da Dosagem <i>Marshall</i> da mistura sem controle de umidade de compactação, em relação ao teor de ligante: (a) Estabilidade e fluência <i>Marshall</i> ; (b) massa específica aparente; (c) volume de vazios; (d) vazios no agregado mineral; e (e) relação betume – vazios	14
Figura 2.6 - Parâmetros da Dosagem <i>Marshall</i> da mistura com controle de umidade de compactação, em relação ao teor de ligante: (a) Estabilidade e fluência <i>Marshall</i> ; (b) massa específica aparente; (c) volume de vazios; (d) vazios no agregado mineral; e (e) relação betume – vazios	15
Figura 2.7 - Resultados obtidos para as propriedades mecânicas (a) Estabilidade <i>Marshall</i> , (b) Fluência <i>Marshall</i>	16
Figura 3.1 - Ilustração das etapas da produção dos corpos de prova reforçados pela geogrelha: (a) disposição da primeira metade (em massa) da mistura asfáltica; (b) regularização da camada com um soquete de madeira; (c) inserção da geogrelha; (d) disposição do restante da mistura asfáltica	28
Figura 3.2 - Análise granulométrica dos agregados minerais	30
Figura 3.3 - Faixa granulométrica de trabalho e granulometria da mistura de projeto ...	31
Figura 3.4 - Resultados obtidos para as propriedades mecânicas (a) Estabilidade <i>Marshall</i> , (b) Fluência <i>Marshall</i> e (c) resistência à tração por compressão diametral (RT) das misturas asfálticas a frio densas convencional e reforçada pesquisadas	33
Figura 3.5 - Comparação das condições de carregamento e de fronteira dos ensaios (a) <i>Marshall</i> e (b) de resistência à tração por compressão diametral (RT)	34
Figura 3.6 - Exumação da geogrelha em um corpo de prova após a realização do ensaio de resistência à tração por compressão diametral	35
Figura 3.7 - Reforço geossintético HaTeli [®] G 50 utilizado na pesquisa, destacando a película geossintética	36
Figura 3.8 - Ensaio de resistência à tração (RT): (a) detalhe do plano de ruptura e a disposição das tensões de tração; (b) posicionamento da geogrelha em relação ao plano de ruptura	37
Figura 3.9 - Projeção do comportamento à fadiga das misturas asfálticas convencional e reforçada.....	38
Figura 3.10 - Processo de obtenção de corpos de prova (CP) com a posição no plano perpendicular ao plano de ruptura: (a) compactação executadas em placas retangulares com a inserção do geossintético entre as camadas; (b) extração dos CPs cilíndricos através de uma sonda rotativa; (c) realização do ensaio para avaliar a condição de aderência de interface; (d) realização do ensaio de resistência a tração com a nova disposição do reforço geossintético	40
Figura 4.1 - Análise granulométrica dos agregados minerais	56
Figura 4.2 - Faixa granulométrica de trabalho e granulometria da mistura de projeto ...	57

Figura 4.3 - (a) Exsudação do material betuminoso na base do molde no momento da compactação; (b) aspecto do corpo de prova após a compactação	59
Figura 4.4 - (a) Valores de Estabilidade Marshall, (b) massa específica aparente e (c) volume de vazios resultantes da análise de umidade de compactação da mistura asfáltica com emulsão asfáltica modificada	59
Figura 4.5 - Parâmetros da Dosagem <i>Marshall</i> da mistura com controle de umidade de compactação, em relação ao teor de emulsão asfáltica modificada: (a) Estabilidade e Fluência <i>Marshall</i> ; (b) Massa Específica Aparente; (c) Volume de vazios; (d) Vazios no Agregado Mineral; e (e) Relação Betume - Vazios	60
Figura 4.6 - Resultados obtidos para as propriedades mecânicas Estabilidade <i>Marshall</i> (a), Fluência <i>Marshall</i> (b) e Resistência à Tração por Compressão Diametral (RT) (c) das misturas asfálticas a frio densas pesquisadas	62
Figura 4.7 - Corpo de prova da mistura “MGEO” após a realização do ensaio de resistência à tração por compressão diametral (a) e corpo de prova da mistura “CGEO” após separação manual do elemento de reforço (b)	64
Figura 4.8 - Resultados obtidos para as propriedades mecânicas Módulo de Resiliência (a) e relação MR/RT (b).....	65
Figura 4.9 - Projeção do comportamento à fadiga das misturas asfálticas pesquisadas .	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Ensaio realizado para a caracterização dos materiais no programa experimental de pesquisa.	7
Tabela 2.2 - Parâmetros e equações empregadas na dosagem <i>Marshall</i>	9
Tabela 2.3 - Resultados de caracterização física dos agregados	9
Tabela 2.4 - Resultados de caracterização física do ligante asfáltico	11
Tabela 3.1 - Ensaio realizado para a caracterização dos materiais empregados no programa experimental de pesquisa e respectivas normas.....	25
Tabela 3.2 - Parâmetros e equações empregadas na dosagem <i>Marshall</i>	27
Tabela 3.3 - Ensaio de determinação das propriedades mecânicas das misturas asfálticas e respectivas normas	28
Tabela 3.4 - Resultados de caracterização física dos agregados minerais	30
Tabela 3.5 - Resultados de caracterização física do ligante asfáltico	31
Tabela 3.6 - Parâmetros obtidos através dos ensaios de módulo de resiliência (MR)....	37
Tabela 3.7 - Resultados do ensaio de vida de fadiga	38
Tabela 3.8 - Parâmetros dos modelos matemáticos de ajuste dos dados experimentais derivados do ensaio de vida de fadiga	39
Tabela 4.1 - Ensaio realizado para a caracterização dos materiais empregados no programa experimental de pesquisa e respectivas normas.....	52
Tabela 4.2 - Parâmetros e equações empregadas na dosagem <i>Marshall</i>	54
Tabela 4.3 - Ensaio de determinação das propriedades mecânicas das misturas asfálticas e respectivas normas	54
Tabela 4.4 - Resultados de caracterização física dos agregados minerais	56
Tabela 4.5 - Resultados de caracterização física dos ligantes asfálticos.....	57
Tabela 4.6 - Parâmetros dos modelos matemáticos de ajuste dos dados experimentais derivados do ensaio de vida de fadiga	67

RESUMO

MACHADO, Matheus Covelo, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, maio de 2018. **Comportamento mecânico de pré-misturados a frio densos com emulsões asfálticas convencional e modificada por polímero com e sem geossintético.** Orientador: Heraldo Nunes Pitanga. Coorientadores: Taciano Oliveira da Silva e Dario Cardoso de Lima.

Este trabalho teve por objetivo principal avaliar o comportamento mecânico, em termos de Estabilidade e Fluência *Marshall*, Resistência à Tração por Compressão Diametral, Módulo de Resiliência e Vida de Fadiga, de misturas asfálticas do tipo pré-misturado a frio denso (PMFD), alterando-se o tipo de ligante asfáltico e fazendo-se uso de um reforço geossintético (geogrelha). As misturas asfálticas foram dosadas segundo a metodologia *Marshall*, empregando-se a emulsão asfáltica convencional RL-1C e a emulsão asfáltica modificada por polímeros EMULEX RL-1C. A faixa granulométrica selecionada para o estudo foi a “D”, destinada à camada de rolamento, segundo as especificações ES 153 (DNIT, 2010) e ES 390 (DNER, 1999). A composição de agregados, em termos de massa total de agregados minerais, foi constituída por 3% de brita 1, 70% de brita 0 e 27% de pó de pedra. Para a melhoria da adesividade do ligante convencional com o agregado mineral, utilizou-se 0,1% em massa de aditivo dopante em relação à massa de emulsão asfáltica, não havendo necessidade de utilizar-se aditivo dopante nas misturas com ligante modificado. Ao seguir o método de dosagem *Marshall* especificado na norma ME 107 (DNER, 1994), constatou-se, experimentalmente, a necessidade do controle de umidade da mistura no momento da compactação. A umidade de molhagem utilizada foi de 2,50% em massa em relação à massa de agregados, e a umidade de compactação ótima foi de 4,41% em massa em relação à massa de agregados. A mistura de projeto convencional adotada continha 7,0% de emulsão asfáltica convencional, e a mistura de projeto modificada adotada continha 6,5% de emulsão asfáltica modificada, ambos os teores em relação à massa total da mistura. Constatou-se, experimentalmente, que a incorporação do reforço geossintético na mistura asfáltica promoveu somente melhoria nas propriedades de Estabilidade e Fluência *Marshall*. Para as outras propriedades analisadas, o desempenho da mistura reforçada foi inferior ao da mistura convencional. As supostas causas discutidas para a resposta mecânica diferenciada dos CPs reforçados foram a aderência na interface mistura asfáltica – reforço geossintético e a configuração dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral, módulo de resiliência e vida de fadiga. Por meio dos resultados obtidos, verificou-se que a utilização do reforço incrementou o desempenho da mistura asfáltica no que concerne aos parâmetros do ensaio

Marshall, e, para que se verifique a possível melhoria nas propriedades analisadas nos outros ensaios, é indispensável a investigação da aderência na interface e da posição relativa do reforço nos ensaios de tração por compressão diametral, visando a mobilização efetiva do reforço na mistura asfáltica. Ademais, constatou-se, experimentalmente, que a utilização do ligante asfáltico modificado EMULEX RL-1C promoveu a redução do teor ótimo de emulsão na mistura de projeto em 0,5%, em relação à massa da mistura, e também promoveu melhoria na adesividade entre o ligante e o agregado, e entre a mistura asfáltica e o reforço. Observou-se que a alteração do ligante contribuiu para o melhor desempenho quanto às propriedades de Estabilidade e Fluência *Marshall*, para ambas as misturas, reforçada e não reforçada. Nos ensaios de Resistência à Tração por Compressão Diametral e Módulo de Resiliência, a alteração do ligante asfáltico resultou em melhorias significativas nos resultados para as misturas reforçadas. Quanto à análise de vida de fadiga, a alteração do ligante incrementou o desempenho apenas para as misturas reforçadas, refletido na redução da sensibilidade ao nível de tensão.

ABSTRACT

MACHADO, Matheus Covelo, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, May, 2018. **Mechanical behavior of dense cold-mixed asphalt concrete with conventional and polymer modified asphalt emulsions with and without geosynthetic.** Advisor: Heraldito Nunes Pitanga. Co-advisors: Taciano Oliveira da Silva and Dario Cardoso de Lima.

The main objective of this study was to evaluate the mechanical behavior in terms of Marshall Stability and Tensile Strength, Diametral Compression Resistance, Resilience Modulus and Fatigue Life, of dense cold-mixed asphalt concrete, changing the type of asphaltic binder and using a geosynthetic reinforcement (geogrid). The asphalt mixtures were measured according to the Marshall methodology, using the conventional asphalt emulsion RL-1C and the polymer modified asphalt emulsion EMULEX RL-1C. The *D* particle size range was selected for the study, intended for the surface course layer, according to specifications ES 153 (DNIT, 2010) and ES 390 (DNER, 1999). The aggregate mix was composed, in terms of total mass of mineral aggregates, by 3% of gravel 1, 70% of gravel 0 and 27% of stone powder. For the improvement of the bonding of the conventional binder to the mineral aggregate, 0.1% by mass of dopant additive was used in relation to the asphalt emulsion mass, and there was no need to use a dopant additive in the modified binder mixtures, evidencing its ability to provide better adhesiveness to the aggregate. Following the Marshall dosage method specified by ME 107 [3], the water content control of the mixture was used at the time of compaction. The pre-wetting water content moisture used was 2.50% in relation to the aggregate mass, and the optimum compaction water content obtained was 4.41% in relation to the mass of aggregates. The conventional design mixture adopted contained 7.0% conventional asphalt emulsion, and the modified design mixture adopted contained 6.5% modified asphalt emulsion, both contents in relation to the total mass of the mixture. It was verified, experimentally, that the incorporation of the geosynthetic reinforcement in the asphalt mixture promoted only improvement in the Stability and Marshall Fluency properties. For the other properties analyzed, the performance of the reinforced asphalt mixture was lower than the conventional asphalt mixture. The assumed causes discussed for the differentiated mechanical response of the reinforced proof-bodies were the adhesion of the asphalt mixture - geosynthetic reinforcement interface and the configuration of tensile strength tests by diametrical compression, resilience modulus and fatigue life. Therefore, through the results obtained, it was verified that the use of the reinforcement increased the performance of the asphalt mixture in terms of the Marshall test parameters, and, for

the possible improvement of the properties analyzed in the other tests, it is indispensable to investigate the interface adhesion and the relative reinforcement position in the Tensile Strength by Diametral Compression tests, aiming the effective mobilization of the reinforcement in the asphalt mixture. In addition, it was experimentally verified that the use of the modified asphaltic binder EMULEX RL-1C promoted the reduction of the optimum emulsion content in the design mixture by 0.5%, in relation to the mass of the mixture, also improved adhesiveness between the binder and the aggregate, and between the asphalt mixture and the reinforcement. It was observed that the binder alteration contributed to the better performance on the reinforced and unreinforced Stability and Marshall Fluency properties for both blends. In the tests of Tensile Strength by Diametral Compression and Resilience Modulus, the alteration of the asphalt binder resulted in significant improvements in the results for the reinforced mixtures. As for the fatigue life analysis, the alteration of the binder increased the performance only for the reinforced mixtures, reflected in the reduction of the sensitivity to the stress level.

1. INTRODUÇÃO GERAL

Segundo o Sistema Nacional de Viação - SNV (DNIT, 2016), a malha rodoviária nacional compreende 212.866 km de rodovias pavimentadas, que representa 12,3% do total de 1.735.621 km de rodovias, contrapondo-se a 1.365.426 km (87,7%) de rodovias não pavimentadas. De acordo com o Anuário CNT do Transporte (CNT, 2017), 78,4% do total de rodovias avaliadas apresentam algum tipo de problema na condição da superfície do pavimento. Logo, constata-se que, além da malha rodoviária brasileira apresentar uma pequena parte de rodovias pavimentadas, uma parte considerável das rodovias pavimentadas brasileiras não é considerada adequada para o tráfego de pessoas e bens. Essa constatação é reforçada pelo resultado do *ranking* de competitividade global do Fórum Econômico Mundial (WEC, 2017), em que o Brasil se encontra na 103ª posição entre os 137 países analisados no quesito qualidade da infraestrutura rodoviária, atrás de países como Chile (24ª), Equador (29ª), Uruguai (95ª) e Argentina (96ª), todos situados na América do Sul.

Uma das causas da inadequação das condições das rodovias pavimentadas no país está relacionada à demanda por essa infraestrutura. Nos últimos 10 anos, a frota de veículos no Brasil cresceu 102,4% (DENATRAN, 2017), enquanto as rodovias federais pavimentadas cresceram somente 11,3% (CNT, 2017). Pode-se observar que a expansão da malha rodoviária brasileira não acompanhou o ritmo de crescimento da frota de veículos.

A necessidade do estudo de revestimentos asfálticos e do desenvolvimento de novas soluções técnicas para contribuir com a melhoria de desempenho das misturas submetida às novas condições de solicitação é pertinente, considerando-se os resultados pouco satisfatórios das condições das rodovias brasileiras. Para sanar essa necessidade, estudos envolvendo inserção de reforços geossintéticos no pavimento (BASTOS *et al.*, 2015; CORREIA e ZORNBERG, 2015; FONSECA *et al.*, 2016) e analisando novos tipos de ligante (ALATAS e YILMAZ, 2013; BROVELLI *et al.*, 2015; TINAJEROS, 2016) vêm sendo feitos, e pode-se verificar a contribuição desses tipos de soluções para a melhora do desempenho estrutural da mistura. Ressalta-se que a grande maioria das pesquisas visam o emprego dessas tecnologias em misturas à quente, havendo, assim, uma lacuna de conhecimento sobre as misturas usinadas à frio quanto a esse aspecto.

Mesmo sendo vastamente utilizadas e estudadas, os autores Loures *et al.* (2017) afirmaram que as misturas asfálticas usinadas a quente têm seu custo elevado devido ao preço do Cimento Asfáltico do Petróleo (CAP) e, também, pelo alto consumo de energia durante o seu processo de usinagem. Ademais, os autores constatam que o custo de

usinagem do PMF é 115,8% menor que o do concreto asfáltico usinado à quente (CAUQ). Dessa forma, a mistura usinada a frio (PMF) torna-se uma opção atraente, visto que apresenta custo mais baixo por ser produzida e aplicada à temperatura ambiente, diminuindo os riscos à saúde, não havendo emprego de energia no aquecimento dos materiais e, também, pela composição com Emulsão Asfáltica do Petróleo (EAP) de valor comercial menor que o CAP.

Portanto, buscando expandir o conhecimento das propriedades mecânicas de misturas asfálticas do tipo pré-misturado a frio denso, o presente trabalho apresenta um estudo comparativo de parâmetros mecânicos obtidos dos ensaios de Estabilidade e Fluência *Marshall*, Resistência à Tração por Compressão Diametral, Módulo de Resiliência e de Vida de Fadiga, analisando a influência do tipo de emulsão asfáltica (com e sem polímero) e da presença ou não de um reforço geossintético nessas propriedades.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALATAS, T., YILMAZ, M., Effects of different polymers on mechanical properties of bituminous binders and hot mixtures. **Construction and Building Materials**, v. 42, n. 1, p. 161-167, 2013.
- BASTOS, G. A., CASAGRANDE, M.D.T., MOTTA, L. M. G., FOLLE, D. Ensaio de Tração em Disco Circular em Misturas Asfálticas Reforçadas com Geogrelhas. **Revista de Engenharia Civil Imed**, v. 2, n. 2, p.27-36, out. 2015. Complexo de Ensino Superior Meridional S.A. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.18256/2358-6508/rec-imed.v2n2p27-36>>. Acesso em: 5 fev. 2018.
- BROVELLI, C., CRISPINO, M., PAIS, J., PEREIRA, P., Using polymers to improve the rutting resistance of asphalt concrete. **Construction and Building Materials**, v. 77, n. 1, p. 117-123, 2015.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE - CNT. **Anuário CNT do Transporte – Estatísticas consolidadas 2017**, Brasília: CNT, 2017. 229p.
- CORREIA, N. S., ZORNBERG, J. G. Mechanical response of flexible pavements enhanced with geogrid-reinforced asphalt overlays. **Geosynthetics International**, 2015. Disponível em:< <http://dx.doi.org/10.1680/jgein.15.00041>>. Acesso em: 5 fev. 2018.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE TRÂNSITO – DENATRAN. **Frota de veículos, por ano de fabricação, segundo as regiões e Unidades da Federação**. Dados de maio de 2007 e maio de 2017. Disponível em: <<http://www.denatran.gov.br/estatistica/237-frotaveiculos>>. Acesso em: 5 fev. 2018.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **Sistema Nacional de Viação**. Disponível em: <<http://www.dnit.gov.br/sistema-nacional-de-viacao/sistema-nacional-de-viacao>>. Acesso em: 5 fev. 2018.
- FONSECA, L. L., ALMEIDA, M. G. G., GRECO, J. A. S. Avaliação da resistência a tração na flexão de camadas asfálticas reforçadas com geossintéticos. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 18., 2016, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: ABMS, 2016.
- LOURES, R. C. B. A., GUIMARÃES, A. C. R., SILVA, B. A., CASTRO, C. D., Pré-misturado a frio contendo escoria de aciaria: Uma alternativa viável para construção de pavimentos. **Revista Transportes**, v. 26, n. 1, p. 54-67, 2017.
- TINAJEROS, R. A. P., **Estudo do comportamento mecânico de misturas asfálticas a quente convencional e modificada com polímero**. 2016. 145p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2016.
- WORLD ECONOMIC FORUM - WEC. **The Global Competitiveness Report 2017-2018**. Geneva, Switzerland. Disponível em: <http://www3.weforum.org/docs/GCR2016-2017/05FullReport/TheGlobalCompetitivenessReport2016-2017_FINAL.pdf>. Acesso em: 5 fev. 2018.

2. ANÁLISE COMPARATIVA DA DOSAGEM *MARSHALL* EM PRÉ-MISTURADO À FRIO DENSO COM E SEM CONTROLE DE UMIDADE DE COMPACTAÇÃO

RESUMO

Este trabalho teve por objetivo principal analisar o comportamento mecânico de misturas asfálticas a frio do tipo pré-misturado a frio denso (PMFD) dosadas pela metodologia *Marshall*, empregando-se a emulsão asfáltica RL-1C. A faixa granulométrica selecionada para o estudo foi a “D”, destinada à camada de rolamento, segundo a especificação ES 153 (DNIT, 2010). Ao seguir o método de dosagem *Marshall* especificado no ME 107 (DNER, 1994), avaliou-se a necessidade do controle de umidade da mistura no momento da compactação. A umidade de molhagem utilizada foi de 2,50% em massa em relação à massa de agregados, e a umidade de compactação ótima obtida foi de 4,41% em massa em relação à massa de agregados. O efeito do controle de umidade resultou em valores de Estabilidade *Marshall* superiores ao mínimo exigido na especificação ES 153 (DNIT, 2010) em todos os teores de emulsão asfáltica analisados, diferentemente daqueles obtidos quando não houve o referido controle de umidade. Em relação à mistura de projeto, quando feito o controle de umidade, observou-se uma queda no consumo de emulsão asfáltica, visto que o teor de projeto passou de 8,0% para 7,0% de emulsão, e a Estabilidade *Marshall* teve um aumento de 98,5%, passando de 391,9 kgf para 777,9 kgf, demonstrando a importância do controle do teor de umidade na compactação de misturas asfálticas do tipo pré-misturado a frio denso.

Palavras-chave: Pré-misturado a frio. Mistura asfáltica densa. Umidade de compactação. Dosagem *Marshall*. Estabilidade *Marshall*.

ABSTRACT

This study aimed to analyze the mechanical behavior of dense cold-mixed asphalt concrete, dosed by the Marshall methodology, using the asphalt emulsion RL-1C. The *D* particle size range was selected for the study, according to the specification ES 153 (DNIT, 2010). Following the Marshall methodology, specified by ME 107 (DNER, 1994), the need for water content control of the mixture at the time of compaction was evaluated. The pre-wetting water content moisture used was 2.50% in relation to the aggregate mass, and the optimum compaction water content obtained was 4.41% in relation to the mass of aggregates. The effect of water control resulted in higher values of Marshall Stability, in relation to the minimum required by the ES 153 (DNIT, 2010), for

every contents of asphalt emulsion analyzed. In relation to the design mixture, the water content control led to a decrease in the consumption of asphalt emulsion, since the design content reduced from 8.0% to 7.0%, and the Marshall stability increased by 98.5%, from 391.9 kgf to 777.9 kgf, supporting the importance of water content control in compaction of dense cold-mixed asphalt concrete.

Keywords: Cold-mixed asphalt concrete. Dense asphalt concrete. Compaction moisture control. Marshall dosage method. Marshall Stability.

2.1. INTRODUÇÃO

O modal rodoviário lidera a matriz de transportes do Brasil, contando, segundo o boletim estatístico da Confederação Nacional dos Transportes (CNT, 2016), com 1.720.643 km de rodovias, dos quais 210.619 km são pavimentados. Mesmo representando um pouco mais que 12% de toda malha rodoviária brasileira, as rodovias pavimentadas suportam grande parte do transporte, tanto de cargas quanto de passageiros.

Independentemente do tipo de pavimento rodoviário (rígido, flexível ou semirrígido), tal estrutura deve ser projetada para resistir adequadamente aos esforços gerados pelo tráfego e pelo clima, além de garantir que o rolamento dos veículos se dê com conforto e segurança (BALBO, 2007). A estrutura do pavimento flexível, em particular, a mais amplamente empregada nas rodovias brasileiras, é composta, basicamente, pelas camadas de sub-base, base e revestimento asfáltico, com eventual presença da camada de reforço do subleito.

Por ser a camada externa do pavimento, o revestimento asfáltico sofre mais intensamente as ações do tráfego e das intempéries, justificando o estudo de suas propriedades mecânicas visando à averiguação prévia de seu desempenho sob solicitações similares às solicitações impostas em serviço (BERNUCCI *et al.*, 2008). O mesmo é constituído por uma combinação de agregado mineral e material betuminoso (ligante asfáltico). Obtidos através da destilação do petróleo, os materiais betuminosos são empregados na pavimentação como emulsões asfálticas (EA), asfaltos diluídos de petróleo (ADP) e cimentos asfálticos de petróleo (CAP) (MONTANARI, 2007).

Segundo Santana (1992), as misturas asfálticas a frio, as quais correspondem às misturas preparadas com emulsão asfáltica, podem propiciar um tempo de estocagem maior do que as misturas a quente, e não há a necessidade de se aquecer os agregados para confecção da mistura e execução do revestimento asfáltico. Assim, esse tipo de mistura é apresentado como uma alternativa apreciável para a execução de novos pavimentos, ou até mesmo em manutenção de pavimentos degradados.

Segundo Nascimento (2008), um dos fatores que influencia o desempenho do pavimento flexível é a correta dosagem experimental da mistura asfáltica constituinte da camada de revestimento asfáltico. No Brasil, a técnica de dosagem *Marshall* é bastante utilizada, pois se trata de uma metodologia simples e de baixo custo, na qual se utilizam impactos de um soquete metálico no método de compactação. Em 1980, o Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER) oficializou o método de ensaio *Marshall* modificado para pré-misturados a frio, proposto por J. Lopes e Kasuga, com algumas modificações, sob o número ME 107 (DNER, 1994a) (SILVA, 1998 *apud* MONTANARI, 2007).

A respeito do método de ensaio ME 107 (DNER, 1994a), no mesmo propõe-se uma análise sobre a questão da umidade de molhagem (água adicionada na mistura a fim de proporcionar um melhor recobrimento dos grãos de agregados pelo ligante e melhorar sua trabalhabilidade) e da umidade de compactação (teor de umidade em relação aos agregados minerais que permita um determinado rearranjo das partículas). A única menção sobre a avaliação da umidade de molhagem feita no método de ensaio ME 107 aparece em:

[...] pesar os agregados para um corpo de prova de cada vez, em recipientes separados, nas quantidades de cada fração obtida na alínea b. Misturar os agregados e abrir uma cratera para receber o ligante que deve ser aí pesado. Efetuar a mistura rapidamente até completa cobertura dos agregados, preferencialmente através de mistura mecânica. Caso necessário, os agregados poderão ser levemente umedecidos, para propiciar um melhor recobrimento pela emulsão asfáltica; [...] (DNER, 1994a, p. 3).

Os principais fatores a serem avaliados que proporcionam um adequado método de preparação e teste de misturas a frio com emulsão asfáltica são: cobertura do agregado e trabalhabilidade na mistura (MAMLOUK *et al.*, 1980). Segundo Tuchumantel Jr. (1990 *apud* CLERMAN, 2004), cada mistura tem sua relação característica entre teor de umidade e grau de envolvimento do agregado. Portanto, é de extrema importância avaliar o teor de umidade para a compactação de cada mistura.

Neste trabalho, foram estudadas a importância e a necessidade de uma avaliação sobre a umidade de compactação quando se trabalha com misturas do tipo pré-misturado a frio denso (PMFD), em conformidade com o método de ensaio ME 107 (DNER, 1994a) e com a especificação de serviço ES 153 (DNIT, 2010).

2.2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais e os métodos utilizados, a fim de atingir os objetivos da pesquisa, são apresentados a seguir.

2.2.1. Materiais

Para a realização dos ensaios de laboratório, foram utilizados os seguintes agregados: brita 0, brita 1 e pó de pedra, de origem gnáissica. Esses agregados foram provenientes da pedreira Ervália, localizada no município de Ervália, situado na Zona da Mata Norte do estado de Minas Gerais (MG). A faixa granulométrica adotada neste trabalho foi a “D” da especificação de serviço ES 153 (DNIT, 2010). O ligante asfáltico utilizado neste trabalho foi a emulsão asfáltica catiônica convencional do tipo RL-1C, oriunda da empresa Stratura Asfaltos S/A, localizada na cidade de Betim - MG. O material dopante utilizado no trabalho foi o BETUDOPE MASTER, também oriundo da empresa Stratura Asfaltos S/A.

2.2.2. Métodos

O método utilizado na execução deste trabalho comporta cinco etapas, cujas particularidades se encontram descritas a seguir:

Etapa 1 – Caracterização das propriedades físicas dos agregados e do ligante asfáltico. A Tabela 2.1 contém os ensaios realizados sobre os materiais previstos nesse programa experimental de pesquisa, com correspondente indicação da norma adotada.

Tabela 2.1 - Ensaios realizados para a caracterização dos materiais no programa experimental de pesquisa.

Agregado graúdo	Material Agregado miúdo	Ligante asfáltico
Análise granulométrica -ME 083 (DNER, 1998a)	Análise granulométrica - ME 083 (DNER, 1998a)	Massa específica e densidade relativa - ME 193 (DNER, 1996)
Abrasão Los Angeles - ME 035 (DNER, 1998b)	Massa específica -ME 194 (DNER, 1998d)	Peneiração - NBR 14393 (ABNT, 2012a)
Absorção e densidade - ME 081 (DNER, 1998c)	Equivalente de areia – ME 054 (DNER, 1997)	Carga de partícula – ME 156 (DNIT, 2011)
Adesividade ao ligante betuminoso - ME 078 (DNER, 1994b)		pH da emulsão alifática – NBR 6299 (ABNT, 2012b)
Índice de forma - ME 086 (DNER, 1994c)		

Etapa 2 – Composição granulométrica de projeto. A partir dos resultados obtidos da caracterização granulométrica dos agregados realizada na *Etapa 1*, foi composta uma mistura de agregados, por meio de tentativas, que se adéqua à faixa “D” da especificação de serviço ES 153 (DNIT, 2010).

Etapa 3 – Determinação do teor de ligante inicial. Através da formulação

proposta por Duriez (1954, *apud* SANTANA 1992, p. 123-125), calculou-se o teor de ligante residual, ou seja, a quantidade de asfalto efetivo presente na mistura asfáltica, para a mistura de agregados composta na *Etapa 2*. A fórmula utilizada, adaptada de Duriez (1954, *apud* SANTANA 1992, p. 124), para o cálculo do teor de ligante residual é descrita a seguir:

$$p = k \times S^{0,2} \quad (2.1)$$

em que:

p: porcentagem de asfalto residual, em relação ao peso total dos agregados;

S: superfície específica do agregado (m^2/kg);

k: coeficiente denominado módulo de riqueza.

Etapa 4 – Determinação do teor de umidade de molhagem e do teor de umidade de compactação. Foram buscados, na literatura técnica (TUCHUMANTEL, 1990; CLERMAN, 2004; MAMLOUK *et al.*, 1980; QUIMI-KAO S.A., 1993), valores usuais referentes ao teor de umidade de molhagem. Após a escolha do teor de umidade de molhagem e de posse do teor de emulsão asfáltica inicial obtido na *Etapa 3*, determinou-se, por meio de valores de Estabilidade *Marshall*, de acordo com o método de ensaio ME 107 (DNER, 1994a), o teor de umidade em relação à massa de agregados que foi utilizado para a compactação das misturas asfálticas.

Etapa 5 – Dosagem Marshall. Realizou-se a dosagem *Marshall* em misturas asfálticas com e sem o controle de umidade de compactação.

Na dosagem com o controle de umidade, manteve-se constante o teor de umidade de compactação obtido na *Etapa 4*. Foram analisados 5 traços em peso de emulsão asfáltica: 6,0%; 6,5%; 7,0%; 7,5%; 8,0%. Para atingir o teor de umidade de compactação estipulado, a cura das misturas foi feita à temperatura ambiente, com um fluxo de ar contínuo e, eventualmente, expondo a parte úmida das mesmas. O tempo de cura variou para cada traço de emulsão asfáltica, mas sem exceder o tempo máximo de 60 minutos estipulado No método de ensaio ME 107 (DNER, 1994a).

Na dosagem sem o controle de umidade, não houve adição de umidade de molhagem. Foram analisados 5 traços em peso de emulsão asfáltica: 7,0%; 7,5%; 8,0%; 8,5%; 9,0%. O tempo de cura foi de 45 minutos. A cura foi feita à temperatura ambiente, livre de fluxo de ar. O intervalo de variação dos teores de ligante asfáltico foi diferente daquele definido para a dosagem com o controle de umidade, pois foi observado que as misturas produzidas com 7,0% de emulsão asfáltica estavam secas, não apresentando uma boa trabalhabilidade e nem um bom recobrimento das partículas de agregado,

justificando, portanto, a necessidade de se analisar teores mais altos de emulsão asfáltica.

Seguindo o método de ensaio ME 107 (DNER, 1994a), em ambos os casos, para cada traço, foram produzidos, no mínimo, três corpos de prova de massa aproximadamente igual a 1200g. Cada corpo de prova foi compactado com 75 golpes em cada uma de suas faces. A densidade aparente foi determinada seguindo o método de ensaio ME 117 (DNER, 1994d). Os parâmetros abordados na dosagem *Marshall* são apresentados na Tabela 2.2, junto com suas respectivas equações.

Tabela 2.2 - Parâmetros e equações empregadas na dosagem *Marshall*

Densidade máxima teórica (DMT)	$DMT = \frac{100}{\left(\frac{\%_{ag}}{d_{ag}} + \frac{\%_{am}}{d_{am}} + \frac{\%_{of}}{d_f} + \frac{\%_{CAP}}{d_{CAP}} \right)}$	(2.2)
Porcentagem de vazios na mistura (Vv)	$Vv = \left(\frac{DMT - d}{DMT} \right) \times 100$	(2.3)
Porcentagem de vazios no agregado mineral (VAM)	$VAM = \left(\frac{DMT - d}{DMT} \right) \times 100 + \frac{d \times \%_{CAP}}{d_{CAP}}$	(2.4)
Relação betume vazios (RBV)	$RBV = \frac{\%V_b}{VAM}$	(2.5)
Estabilidade <i>Marshall</i> (E)	$E = F \times fc$	(2.6)

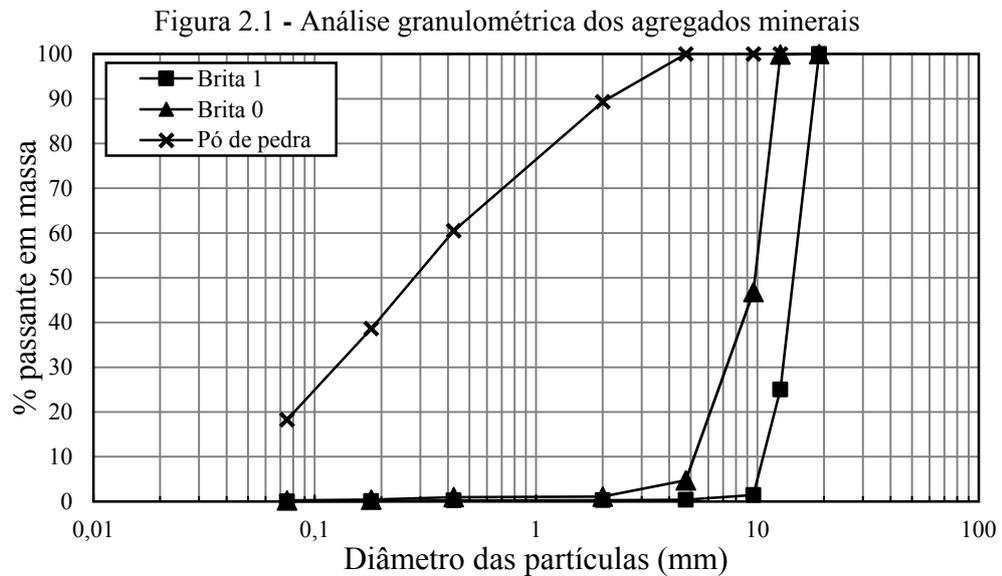
Em que: d – massa específica aparente da mistura; %_{ag}, %_{am}, %_f e %_{CAP} – porcentagens de agregado graúdo, agregado miúdo, filer e de cimento asfáltico de petróleo, respectivamente; d_{ag}, d_{am}, d_f e d_{CAP} – massas específicas reais dos grãos de agregado graúdo, agregado miúdo, filer e de cimento asfáltico de petróleo, respectivamente; V_b – volume de betume na mistura; F – força de ruptura do corpo de prova; fc – fator de correção em função da altura média do corpo de prova.

2.3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Etapa 1 – Caracterização das propriedades físicas dos agregados e do ligante asfáltico. Os resultados obtidos nos ensaios de caracterização dos agregados são apresentados na Tabela 2.3. A análise granulométrica dos agregados minerais é ilustrada na Figura 2.1.

Tabela 2.3 - Resultados de caracterização física dos agregados

Propriedades analisadas	Material		
	Brita 1	Brita 0	Pó de pedra
Massa específica (g/cm ³)	2,817	2,796	2,825
Absorção (%)	0,65	0,68	-
Índice de forma	-	0,9	-
Abrusão <i>Los Angeles</i> (%)	-	43	-
Equivalente de areia (%)	-	-	59



O índice de forma encontrado para o agregado é satisfatório, diferentemente do valor encontrado para a abrasão *Los Angeles*, que supera 40%, o máximo estabelecido na especificação de serviço ES 153 (DNIT, 2010a), provavelmente em decorrência de sua natureza gnáissica. Porém, salienta-se que a referida especificação permite a utilização do agregado caso o mesmo já tenha sido utilizado anteriormente e apresentado um desempenho satisfatório. Na região de Viçosa – MG, os agregados provenientes da jazida da Pedreira Ervália são largamente empregados em obras de engenharia, tanto na construção civil quanto na pavimentação. Dessa forma, o estudo de misturas asfálticas compostas por esse material é importante para o desenvolvimento técnico-científico da engenharia de pavimentação regional. Também foi observado em Tinajeros *et al.* (2016) e Silva *et al.* (2016), pesquisas que utilizaram o mesmo agregado (mesma coleta de amostra), que os resultados obtidos foram satisfatórios. Portanto, mesmo com o valor obtido de abrasão *Los Angeles* superior ao máximo estabelecido pela especificação de serviço ES 153 (DNIT, 2010a), foi dada a continuidade da pesquisa com a utilização desse material.

O resultado obtido no ensaio de equivalente de areia está de acordo com a especificação de serviço ES 153 (DNIT, 2010a), a qual exige um valor superior à 55% para o resultado do referido ensaio.

A adesividade ao ligante asfáltico mostrou-se insatisfatória, havendo, portanto, a necessidade de se utilizar um material dopante. A deficiência apresentada na adesividade ao ligante asfáltico pode ser explicada pela origem gnáissica dos agregados. Utilizou-se 0,1% em massa de BETUDOPE MASTER em relação à massa de emulsão asfáltica e procedeu-se a análise da adesividade ao ligante asfáltico, sendo o resultado encontrado satisfatório.

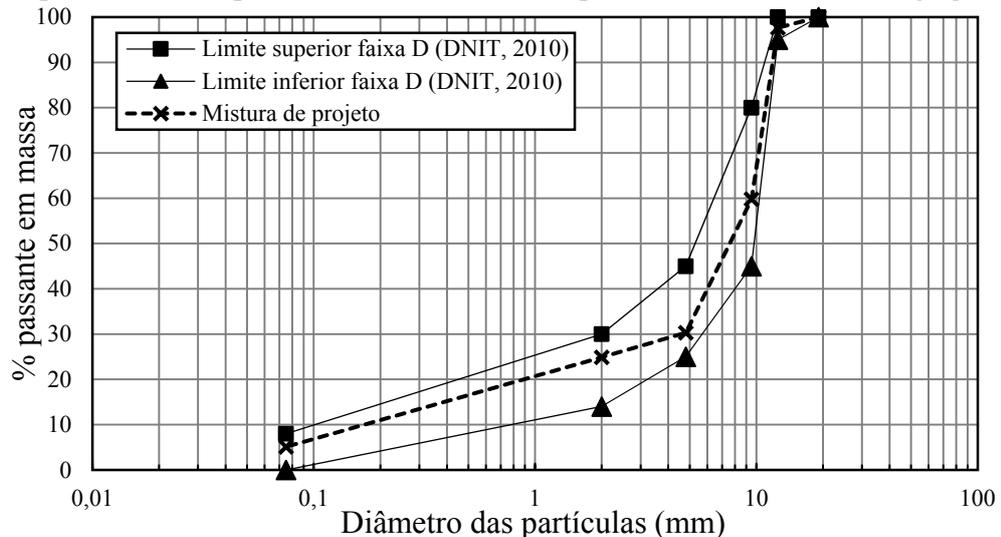
Os resultados da caracterização física do ligante asfáltico utilizado são apresentados na Tabela 2.4, constatando-se a sua conformidade com a especificação de material EM 165 (DNIT, 2013).

Tabela 2.4 - Resultados de caracterização física do ligante asfáltico

Propriedades analisadas	Material Emulsão asfáltica – RL 1C
Densidade	1,03
pH da emulsão asfáltica	3,09
Carga de partículas	Carga positiva
Peneiração da emulsão asfáltica (%)	0,01

Etapa 2 – Composição granulométrica de projeto. A faixa granulométrica selecionada para o estudo foi a “D”, destinada à camada de rolamento, segundo a especificação ES 153 (DNIT, 2010). A mistura de agregados foi composta por 3% de brita 1, 70% de brita 0 e 27% de pó de pedra. A Figura 2.2 ilustra os limites superior e inferior da faixa “D” (DNIT, 2010) e a mistura de agregados (mistura de projeto) utilizada nesta pesquisa.

Figura 2.2 - Faixa granulométrica de trabalho e granulometria da mistura de projeto



Etapa 3 – Determinação do teor de ligante inicial. Calculou-se a superfície específica da composição de agregados, a partir do método descrito em Santana (1992, p. 100-101). Santana (1992, p. 124) também sugere valores de módulo de riqueza (k), para PMF empregados como capa de rolamento, variando de 2,8 a 4,0.

A partir dessas variáveis e utilizando a equação (2.1), calculou-se um intervalo de teor de ligante residual, em relação ao peso total dos agregados (p): $4,32\% < p < 6,17\%$. Esses teores correspondem, em relação ao peso total da mistura (p'), a: $4,14\% < p' < 5,81\%$. Em termos de teores de emulsão asfáltica, em relação ao peso total da mistura

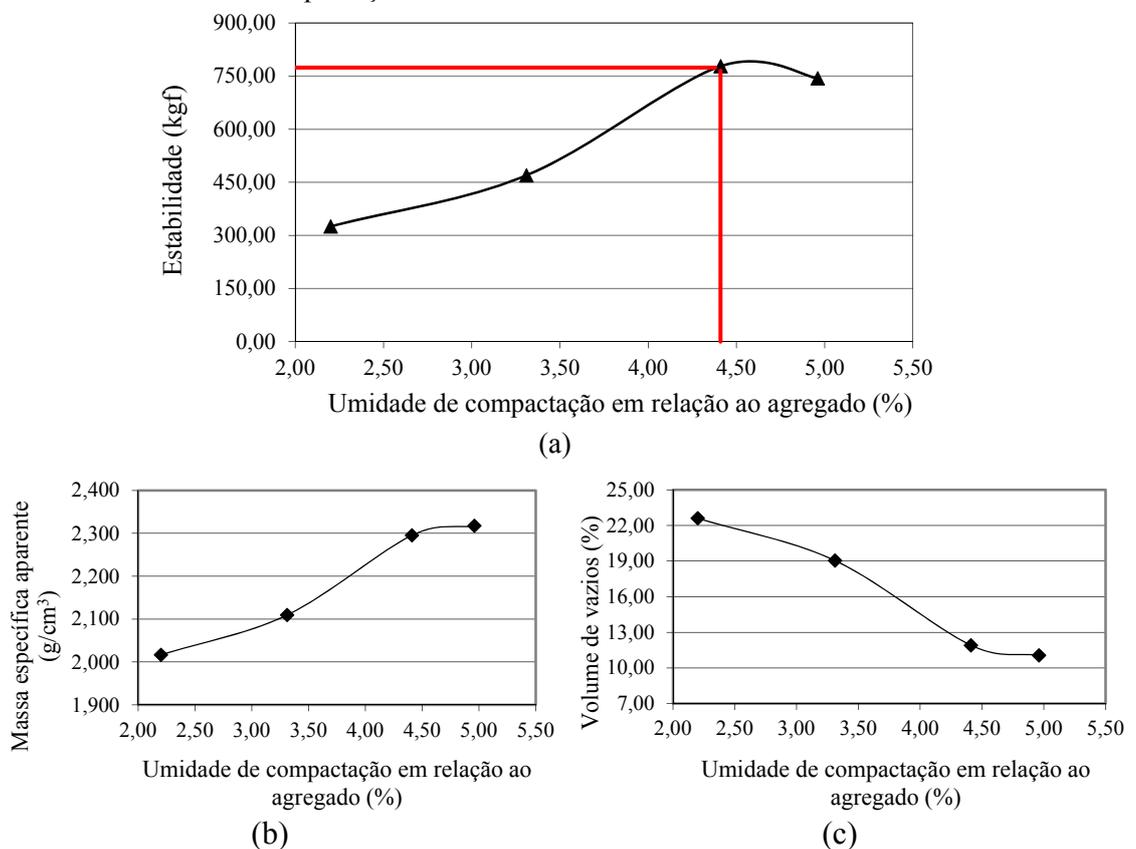
(%EA), o intervalo obtido foi: $6,71\% < \%EA < 9,31\%$.

Etapa 4 – Determinação do teor de umidade de molhagem e teor de umidade de compactação. Alguns valores de teores de umidade de molhagem foram buscados na bibliografia, dentre eles: 2,5% (TUCHUMANTEL, 1990; CLERMAN, 2004); 0 a 4,5% (MAMLOUK *et al.*, 1980); iniciar com 3% (QUIMI-KAO S.A., 1993).

Para a presente pesquisa, analisou-se, a princípio, o teor de umidade de molhagem de 2,5% em uma mistura com o teor de 7,0% de emulsão asfáltica, em termos de trabalhabilidade e recobrimento dos grãos. Como o resultado foi satisfatório, prosseguiu-se para a análise do teor de umidade de compactação, utilizando-se o teor de umidade de molhagem de 2,5%. O teor de emulsão asfáltica escolhido foi de 7,0%, pois, além de estar situado no intervalo de teores de ligante inicial supracitado (%EA), foi o teor que produziu misturas mais secas na dosagem sem controle de umidade.

Foram produzidos quatro teores de umidade de compactação: 40%, 60%, 80% e 90% da umidade total da mistura (ht). Esses teores correspondem respectivamente a: 2,20%; 3,31%; 4,41% e 4,96% em relação ao peso dos agregados secos. A Figura 2.3 mostra os valores encontrados na análise do teor de umidade de compactação.

Figura 2.3 - Valores de Estabilidade *Marshall* (a), (b) massa específica aparente e (c) volume de vazios em função da umidade de compactação relativamente ao peso dos agregados secos, da análise de umidade de compactação



Ao longo da compactação das misturas com o teor mais alto de umidade de compactação, 4,96%, percebeu-se a exsudação do material betuminoso, como mostrado na Figura 2.4. Portanto, além da queda de resistência observada, a mistura não apresentou boas condições para a execução da compactação. A partir dos resultados de Estabilidade *Marshall*, adotou-se o teor de umidade de compactação de 4,41% em relação ao peso de agregados.

Figura 2.4 - Exsudação do material betuminoso na base do molde no momento da compactação



Etapa 5 – Dosagem Marshall. As Figura 2.5 e Figura 2.6 mostram os parâmetros das dosagens, com e sem o controle de umidade.

Observou-se que as misturas produzidas com baixos teores de emulsão asfáltica, sem o controle de umidade, apresentaram-se secas, refletindo em mau recobrimento das partículas de agregado e em uma má trabalhabilidade da mistura. Contudo, feito o controle de umidade, observou-se que, para todos os teores analisados, as misturas apresentaram trabalhabilidade e recobrimento das partículas satisfatórios.

Em posse dos parâmetros da dosagem da mistura sem o controle de umidade de compactação, admitiu-se que teor de emulsão asfáltica de projeto foi 8,0%, para o qual a mistura compactada apresentou uma Estabilidade *Marshall* no valor de 391,9 kgf, atendendo à especificação de serviço ES 153 (DNIT, 2010).

A partir dos parâmetros da dosagem da mistura com o controle de umidade de compactação, foi observado que, para todos os teores de emulsão asfáltica analisados, os valores de Estabilidade *Marshall* foram superiores ao valor de 250 kgf estabelecido pela especificação de serviço ES 153 (DNIT, 2010). Porém, constatou-se que os teores de emulsão asfáltica que proporcionaram misturas com melhor comportamento mecânico, em termos de Estabilidade *Marshall*, se encontravam na faixa entre 6,0% e 7,0%, e

adotou-se o teor de projeto como sendo o teor de 7,0%, por apresentar mais ligante na mistura e, assim, um melhor recobrimento das partículas de agregado, propiciando provavelmente maior durabilidade da mistura asfáltica. Para o teor de projeto admitido, a mistura asfáltica compactada apresentou uma Estabilidade *Marshall* no valor de 777,9 kgf.

Figura 2.5 - Parâmetros da Dosagem *Marshall* da mistura sem controle de umidade de compactação, em relação ao teor de ligante: (a) Estabilidade e fluência *Marshall*; (b) massa específica aparente; (c) volume de vazios; (d) vazios no agregado mineral; e (e) relação betume – vazios

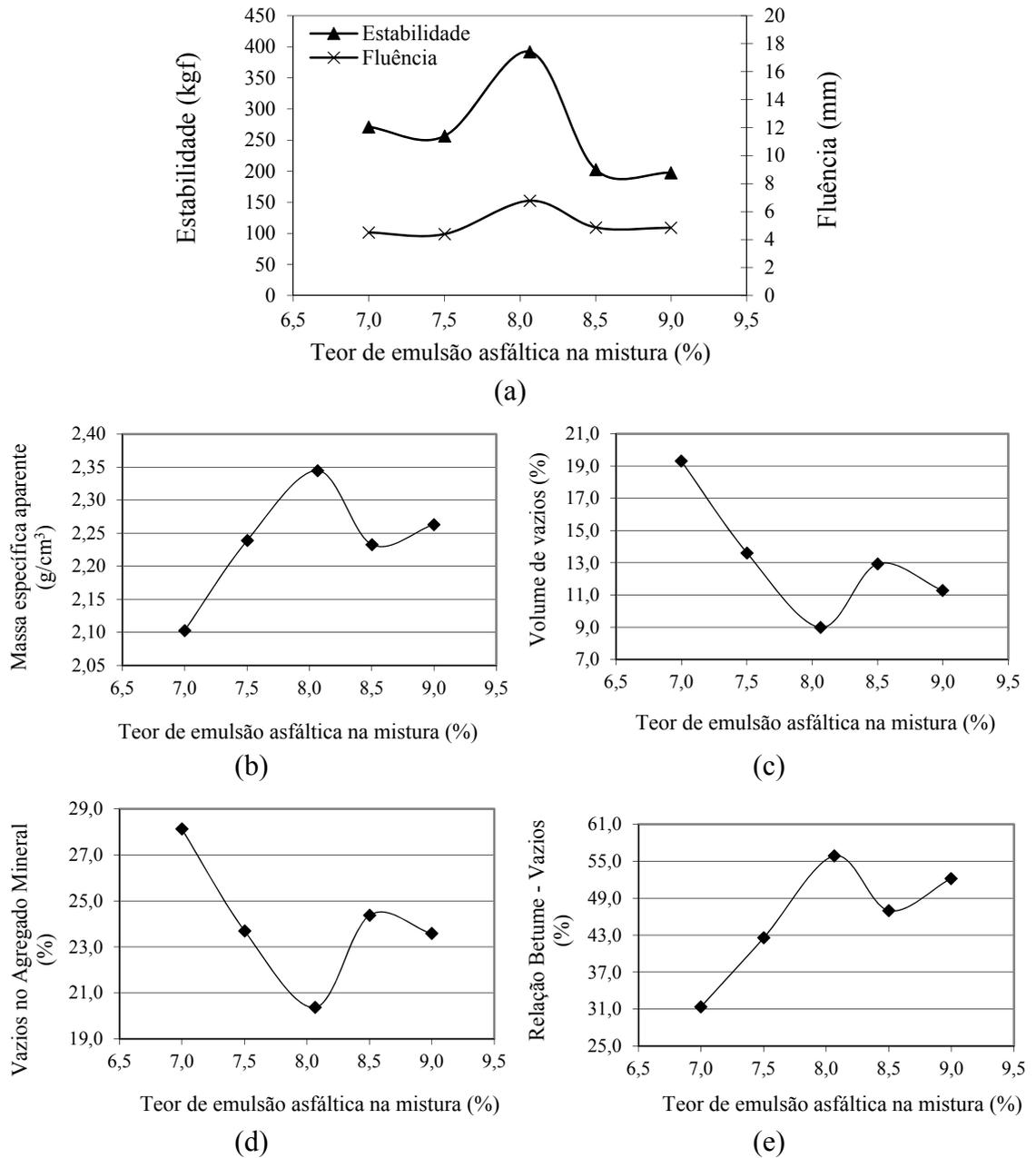
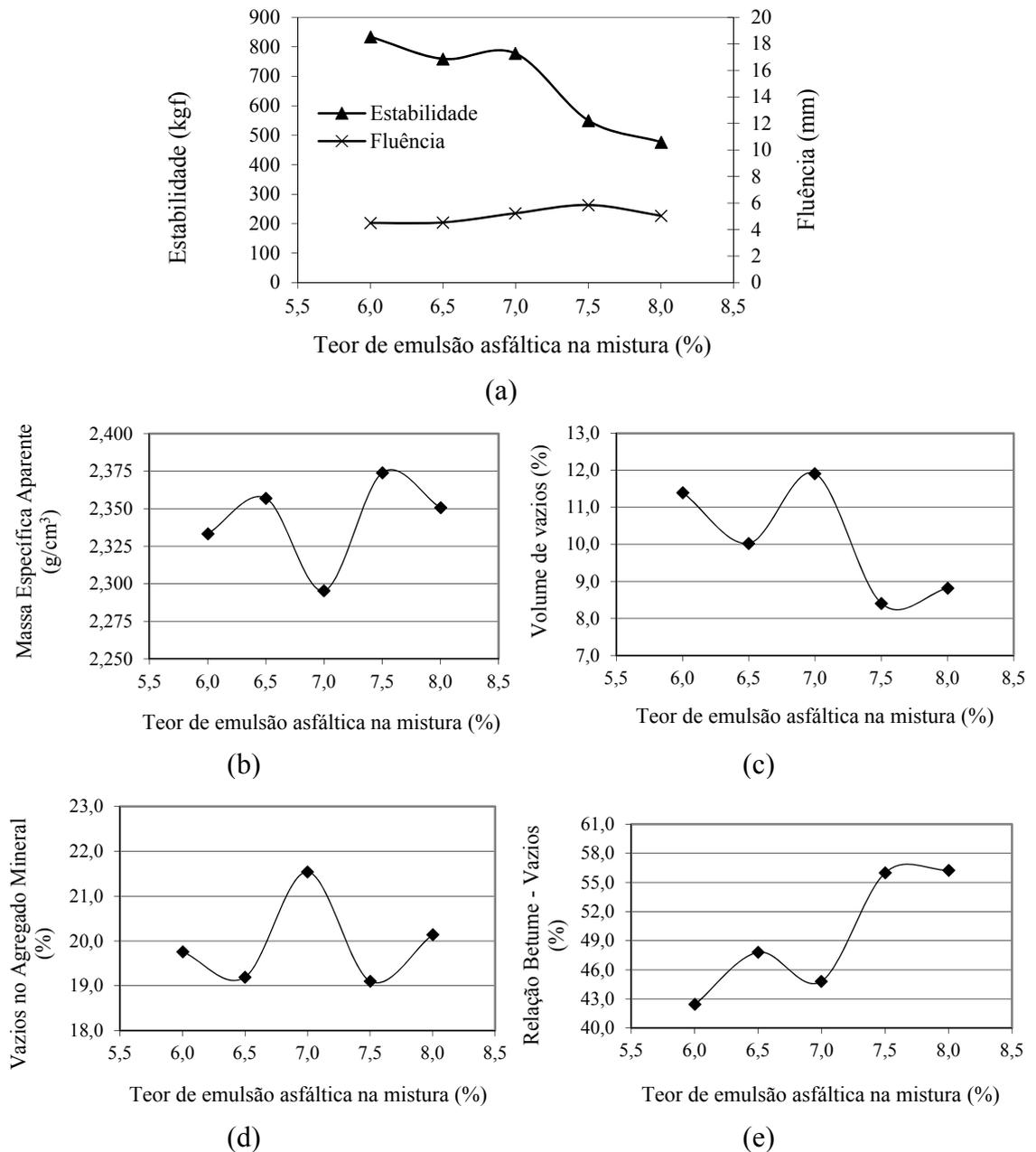


Figura 2.6 - Parâmetros da Dosagem *Marshall* da mistura com controle de umidade de compactação, em relação ao teor de ligante: (a) Estabilidade e fluência *Marshall*; (b) massa específica aparente; (c) volume de vazios; (d) vazios no agregado mineral; e (e) relação betume - vazios



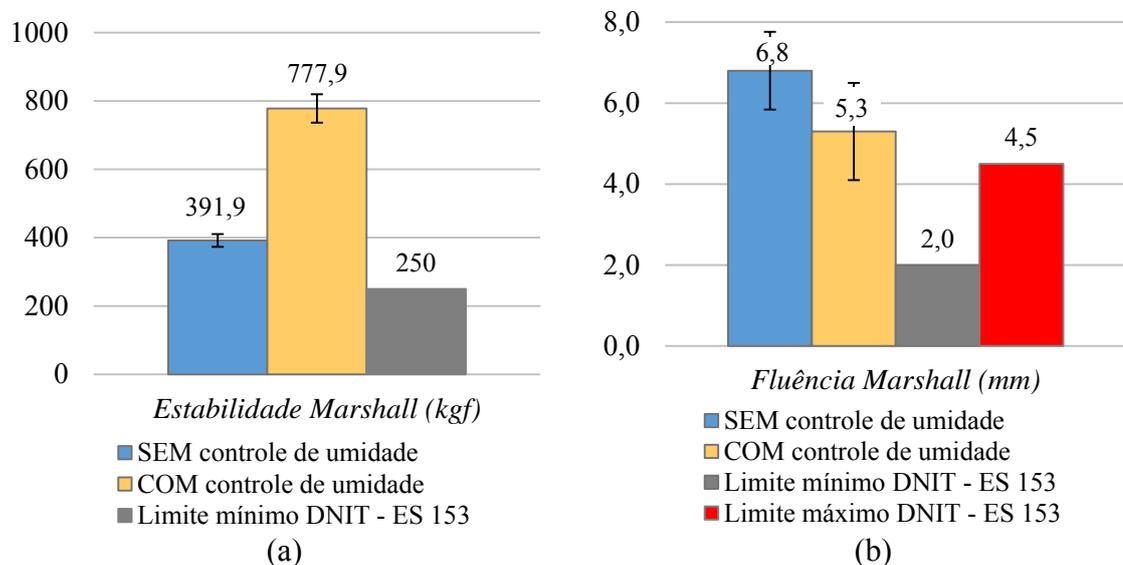
A Figura 2.7 apresenta a comparação dos valores obtidos nos ensaios *Marshall*, com seus respectivos desvios-padrão. Constatou-se, portanto, o aumento da resistência mecânica da mistura asfáltica compactada a partir do controle de umidade de compactação, traduzido pelo aumento da Estabilidade *Marshall* da ordem de 98,5%.

Verificou-se que o valor obtido para a Estabilidade *Marshall*, quando feito o controle de umidade, foi aproximadamente 211,2% superior ao valor mínimo de 250 kgf, estabelecido pela especificação de serviço ES 153 (DNIT, 2010).

No que concerne aos parâmetros volumétricos, ambas as misturas de projeto

apresentaram valores de volume de vazios (V_v) inferiores à 15%, sendo consideradas misturas asfálticas densas segundo Santana (1992). Notou-se também, dentro da dosagem com o controle de umidade, que as misturas com menos vazios não apresentaram um desempenho mecânico, em termos de Estabilidade *Marshall*, superior às misturas com uma porcentagem de vazios maior, contrariando o senso comum. Também foi observado que os valores de volume de vazios nos agregados minerais (VAM), para ambos os teores de projeto, tiveram grandezas semelhantes, 21,5% para as misturas com o controle de umidade de compactação e 20,4% para as misturas sem o controle de umidade.

Figura 2.7 - Resultados obtidos para as propriedades mecânicas (a) Estabilidade *Marshall*, (b) Fluência *Marshall*



As misturas de projeto apresentaram valores de fluência superiores ao valor máximo de 4,5 mm estabelecido pela especificação de serviço ES 153 (DNIT, 2010). Foram encontrados, para as misturas sem e com o controle de umidade de compactação, valores de fluência de 6,8 mm e 5,3 mm, respectivamente. Esses valores indicam que as misturas produzidas são mais deformáveis do que a especificação recomenda e também mostra que a mistura com o controle de umidade de compactação é menos deformável, e, portanto, mais rígida, comparada com a mistura sem o controle de umidade.

2.4. CONCLUSÕES

Esse trabalho propôs analisar e quantificar o efeito do controle de umidade de uma mistura asfáltica do tipo PMFD e, a partir dos ensaios realizados, pode-se concluir que a umidade de compactação tem influência direta e significativa no rearranjo das partículas da mistura asfáltica. Para as particularidades da pesquisa, tal influência foi significativa, visto que, para um mesmo tipo de material, pode-se produzir misturas com diferença de

resistência mecânica da ordem de 98,5%, traduzida pelos correspondentes valores de Estabilidade *Marshall* obtidos de misturas asfálticas compactadas com e sem controle de umidade de compactação. Constatou-se que o teor de umidade de molhagem utilizado, 2,5% em massa em relação à massa de agregados minerais, foi razoável, proporcionando um bom recobrimento das partículas com EA e uma boa trabalhabilidade da mistura. Quanto à estabilidade mínima e à fluência máxima, recomenda-se rever os limites citados na referida especificação de serviço ES 153 (DNIT, 2010). Ressalta-se que o parâmetro de fluência já está em desuso, porém é um fator que demonstra a rigidez do material estudado.

Portanto, o método de ensaio ME 107 (DNER, 1994a) não contempla a importância da umidade de molhagem e de compactação em relação à trabalhabilidade, recobrimento das partículas, resistência e rigidez das misturas asfálticas a frio. Recomenda-se rever essa análise vaga e pessoal proposta no método de ensaio referido, a respeito da umidade de molhagem, e incluir a análise do comportamento mecânico em relação à umidade de compactação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 14393**. Emulsões asfálticas - determinação da peneiração. Rio de Janeiro, 2012a. 3 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6299**. Emulsões asfálticas - determinação do pH. Rio de Janeiro, 2012b. 2 p.
- BALBO, J. T., **Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração**, São Paulo: Oficina de textos, 2007. 558 p.
- BERNUCCI, L. B., MOTTA, L.M.G., CERATTI, J. A. P., SOARES, J. B., **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**, Rio de Janeiro: Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfaltos (ABEDA), 2008. 504 p.
- CLERMAN, D. D. S., **Estudo laboratorial de misturas asfálticas a frio produzidas com incorporação de borracha de pneus**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004. 125 p.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE - CNT. **Anuário CNT do transporte – estatísticas consolidadas 2016**, Brasília: CNT, 2016. 209 p. Disponível em: <<http://anuariodotransporte.cnt.org.br/2017/Rodoviario/1-1-/Principais-dados>>. Acesso em 10 de abril de 2018.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER – ME 035**. Agregados – determinação da abrasão “Los Angeles”: método de ensaio. São Paulo, 1998b. 06p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER – ME 078**. Agregado graúdo – adesividade a ligante betuminoso: método de ensaio. São Paulo, 1994b. 03p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER – ME 081**. Agregados – determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo: método de ensaio. Rio de Janeiro-RJ, 1998c. 06 p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER – ME 083**. Agregados – análise granulométrica: método de ensaio. Rio de Janeiro-RJ, 1998a. 05p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER - ME 086**. Agregados – determinação do índice de forma: método de ensaio. Rio de Janeiro: IPR, 1994c. 05p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER – ME 107**. Mistura betuminosa a frio, com emulsão asfáltica – ensaio Marshall. Rio de Janeiro, 1994a. 09p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER - ME 117**. Mistura betuminosa - Determinação da densidade aparente. Rio de Janeiro, 1994d. 4p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER – ME 193**. Materiais betuminosos líquidos e semi-sólidos – determinação da densidade e da massa específica. Rio de Janeiro, 1996. 06 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER – ME 194**. Agregados – determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman: método de ensaio. Rio de Janeiro, 1998d. 04 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT - EM 165**. Emulsões asfálticas para pavimentação – Especificação de material. Rio de Janeiro, 2013. 05p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT – ES153**. Pavimentação asfáltica – Pré-misturado a frio com emulsão catiônica convencional: especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2010a. 11p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT – ME 156**. Emulsão asfáltica – Determinação da carga de partícula – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2011, 07p.

DURIEZ, M., ARRAMBIDE, J., **Liants hydrocarbonés**, Paris: Dunod, 1954. 752 p.

MAMLOUK, M. S., WOOD, L. E., GADALLAH, A. A., **Laboratory evaluation of asphalt emulsion mixtures by use of the Marshall and indirect tensile tests**. Washington, D. C.: Transportation Research Board, 1980.

CLERMAN, D. D. S., **Estudo laboratorial de misturas asfálticas a frio produzidas com incorporação de borracha de pneus**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004. 125 p.

MONTANARI, R. M., **Estudo do comportamento mecânico de misturas betuminosas a frio e a quente para fins de pavimentação de vias**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2007. 97 p.

NASCIMENTO, L.A., **Nova abordagem da dosagem de misturas asfálticas densas com uso do compactador giratório e foco na deformação permanente**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008. 204 p.

QUIMI-KAO S.A., **Curso Básico de Emulsões Asfálticas**, Ciudad de México: Quimi-Kao S.A, 1993.

SANTANA, H., **Manual de pré-misturados a frio**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Petróleo (IBP), 1992. 298 p.

SILVA, T. K., CARVALHO, C. A. B., MARQUES, G. L. O., SANT’ANNA, G. L., SILVA, T. O., MACHADO, C. C., Dosagem de mistura betuminosa a frio e seu estudo sob efeitos de cargas estáticas e repetidas. **Revista Árvore**, v. 40, n. 1, p. 97-106, 2016.

SILVA, W. R., **Comportamento mecânico de pré-misturado a frio denso reforçado com fibras sintéticas**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1998. 91 p.

TINAJEROS, R. A. P., SILVA, T. O., PITANGA, H. N., LIMA, D. C., MARQUES, G. L. O., Estudo do comportamento mecânico de misturas asfálticas a quente produzidas com ligantes convencional e modificado por polímero SBS. In: Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, 30., 2016, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ANPET, 2016.

TUCHUMANTEL JR., O., Influência da Umidade de Compactação no PMF Denso. In: Encontro de Asfalto, 10., 1990, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: IBP, 1990.

3. PROPRIEDADES MECÂNICAS DE PRÉ-MISTURADO A FRIO DENSO COM E SEM A INSERÇÃO DE REFORÇO GEOSINTÉTICO

RESUMO

Este trabalho teve por objetivo principal comparar o comportamento mecânico, em termos de Estabilidade e Fluência *Marshall*, resistência à tração por compressão diametral, módulo de resiliência e vida de fadiga, de misturas asfálticas do tipo pré-misturado a frio denso (PMFD), fazendo-se uso de um reforço geossintético (geogrelha). As misturas asfálticas foram dosadas segundo a metodologia *Marshall*, empregando-se a emulsão asfáltica RL-1C. A faixa granulométrica selecionada para o estudo foi a “D”, destinada à camada de rolamento, segundo a especificação ES 153 (DNIT, 2010a). A composição de agregados, em termos de massa total de agregados minerais, foi constituída por 3% de brita 1, 70% de brita 0 e 27% de pó de pedra. Para a melhoria da adesividade do ligante com o agregado mineral, utilizou-se 0,1% em massa de aditivo dopante em relação à massa de emulsão asfáltica. Ao seguir o método de dosagem *Marshall* especificado na norma ME 107 (DNER, 1994a), utilizou-se o controle de umidade da mistura no momento da compactação. A umidade de molhagem utilizada foi de 2,50% em massa em relação à massa de agregados, e a umidade de compactação ótima foi de 4,41% em massa em relação à massa de agregados. A mistura de projeto adotada continha 7,0% de emulsão asfáltica em massa em relação à massa total da mistura. Constatou-se, experimentalmente, que a incorporação do reforço geossintético na mistura asfáltica promoveu somente melhorias nas propriedades de Estabilidade e Fluência *Marshall*. Para as outras propriedades analisadas, o desempenho da mistura reforçada foi inferior ao da mistura convencional. As supostas causas discutidas para a resposta mecânica diferenciada dos CPs reforçados foram a aderência na interface mistura asfáltica – reforço geossintético e a configuração dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral, módulo de resiliência e vida de fadiga. Por meio dos resultados obtidos, verificou-se que a utilização do reforço melhora o desempenho da mistura asfáltica no que concerne às propriedades do ensaio *Marshall*, e, para que se verifique a possibilidade de incremento das propriedades analisadas nos outros ensaios, é indispensável a investigação da aderência de interface e da configuração do ensaio visando a mobilização efetiva do reforço na mistura asfáltica.

Palavras-chave: Pré-misturado a frio denso. Reforço geossintético. Propriedades mecânicas.

ABSTRACT

This study aimed to compare the mechanical behavior, in terms of Marshall Stability, diametral compression test, resilient modulus and fatigue failure, of dense cold-mixed asphalt concrete, using a geosynthetic reinforcement (geogrid), measured by the Marshall methodology, using asphalt emulsion RL-1C. The *D* particle size range was selected for the study, intended for the surface course layer, according to specification ES 153 (DNIT, 2010a). The aggregate mix was composed, in terms of total mass of mineral aggregates, by 3% of gravel 1, 70% of gravel 0 and 27% of stone powder. For the improvement of the bonding of the binder to the mineral aggregate, 0.1% by mass of dopant additive was used in relation to the asphalt emulsion mass. Following the Marshall dosage method specified by ME 107 (DNER, 1994a), the water content control of the mixture was used at the time of compaction. The pre-wetting moisture used was 2.50% by mass in relation to the aggregate mass, and the optimum compaction water content was 4.41% by mass in relation to the mass of aggregates. The design mixture adopted contained 7.0% asphalt emulsion in mass, in relation to the total mass of the blend. It was verified experimentally that the incorporation of the geosynthetic reinforcement in the asphalt mixture promoted only improvements in the performance of the properties Marshall Stability and Fluency. For the other properties analyzed, the performance of the reinforced mixture was inferior to the conventional mixture. The assumed causes discussed for the differentiated mechanical response of reinforced proof-bodies were the adhesion of the asphalt mixture - geosynthetic interface and the test setup of tensile strength by diametrical compression tests, resilience modulus and fatigue life. Therefore, through the results obtained, the use of the reinforcement was verified to improve the performance of the asphalt mixture in terms of the Marshall test, and, for the improvement in the performance of the properties analyzed in the other tests, it is indispensable to investigate the interface adhesion and the test setup aiming at the effective mobilization of reinforcement in the asphalt mixture.

Keywords: Dense cold-mixed asphalt concrete. Geosynthetic reinforcement. Marshall dosage method.

3.1. INTRODUÇÃO

A função de um pavimento, independente do seu tipo, é fornecer condições de trafegabilidade aos usuários da via, em termos de conforto e segurança, por um determinado período de tempo. O comportamento estrutural do pavimento estará condicionado pela ocorrência de patologias, que se apresentam de forma inevitável,

devido ao desgaste gerado pelas intempéries e pela passagem dos veículos. Essas patologias prejudicam o nível de serventia do pavimento e, conseqüentemente, a segurança dos usuários (BANDARU, 2010). Essas patologias prejudicam o nível de serventia do pavimento e, conseqüentemente, comprometem a segurança dos usuários. Entretanto, tem-se procurado implementar novas alternativas no combate aos mecanismos de deterioração atuantes nas rodovias brasileiras, a saber, à reflexão de trincas, ao trincamento por fadiga e às deformações plásticas. Uma possibilidade técnica é a inserção de grelhas de reforço no interior da camada asfáltica.

Conforme Correia (2014), a utilização de geossintéticos como reforço de recapamentos asfálticos pode levar a melhorias significativas na reabilitação de pavimentos pelo aumento da vida útil do pavimento e, conseqüentemente, diminuir os custos de manutenção. Estudos indicam que a vida útil de pavimentos flexíveis pode ser prolongada pela inclusão de geotêxteis ou geogrelhas entre a camada existente e as novas sobreposições de asfalto, devido à habilidade do geossintético de absorver tensões e, portanto, minimizar a reflexão de trincas (PRIETO *et al.*, 2007; BÜHLER, 2007; VIRGILI *et al.*, 2009; BASTOS, 2010; AL-QADI *et al.*, 2012; FERROTTI *et al.*, 2012; OBANDO, 2012; YU *et al.*, 2013; NEJAD *et al.*, 2014; GONZALEZ-TORRE *et al.*, 2015; NEJAD *et al.*, 2016).

Contudo, essas pesquisas supracitadas analisam os reforços geossintéticos colocados entre camadas justapostas de revestimento asfáltico a quente, quase que exclusivamente, quanto à redução da propagação da reflexão de trincas na camada de recapamento asfáltico, sem analisar conjuntamente a capacidade de aumentarem potencialmente a capacidade estrutural do próprio revestimento asfáltico (CORREIA e ZORNBERG, 2015). Algumas evidências relatadas sobre a melhoria das propriedades mecânicas do pavimento em decorrência da inserção de elementos de reforço geossintético são resumidas a seguir.

Nas pesquisas de Sobhan *et al.* (2005) e de Khodaii e Fallah (2009), foi constatada a melhoria significativa da restrição à deformação permanente nas misturas asfálticas reforçadas com geossintéticos. Bühler (2007) relata resultados de um estudo de campo em que as geogrelhas foram capazes de reduzir as profundidades de deformação permanente em 40% em relação aos resultados obtidos em uma seção de controle não reforçada. Hosseini *et al.* (2009) observaram em sua pesquisa que a incorporação do reforço geossintético proporcionou um aumento no módulo de rigidez inicial e uma melhoria na vida de fadiga da mistura asfáltica reforçada. Na pesquisa realizada por Siriwardane *et al.* (2010) com a inclusão de uma geogrelha de fibra de vidro dentro da

camada de asfalto, concluiu-se que o reforço geossintético distribuiu a carga circular sobre uma área maior nas camadas inferiores da seção do pavimento, causando tensões verticais inferiores. Correia (2014) afirmou que a geogrelha de reforço atua como um elemento de reforço que fornece melhorias estruturais aos pavimentos flexíveis, através da diminuição das deformações permanentes e da redução de tensões verticais na ordem de 32% na base da camada asfáltica.

Bastos *et al.* (2015) comprovaram que a utilização de uma geogrelha, incorporada na mistura asfáltica, resultou em um aumento da resistência ao fraturamento, quantificado pela energia de fratura. Em um estudo mais recente de Correia e Zornberg (2015), foi observado o aumento significativo do desempenho estrutural do pavimento com a incorporação da geogrelha, quantificado pela diminuição dos níveis de deformação permanente em 40%, pela movimentação lateral significativa menos permanente, pela redução dos níveis de deslocamentos resilientes em até 55% e também pela redução de mais de 30% dos níveis de tensão vertical aplicada nas camadas do pavimento. Fonseca *et al.* (2016) avaliaram a resistência à tração de camadas asfálticas reforçadas com geossintéticos e concluíram que houve uma melhoria significativa dessa propriedade após a incorporação do reforço e também que o geossintético absorveu tensões, mudando o modo de propagação das trincas para a camada superficial.

Vale ressaltar que as pesquisas citadas anteriormente foram realizadas em misturas asfálticas a quente. Há, na literatura técnica, um número limitado de pesquisas que buscam analisar o comportamento de misturas asfálticas a frio e um número também restrito de pesquisas que contemplem a incorporação de geossintético nessas misturas asfálticas. Misturas asfálticas a frio podem ser apresentadas como uma solução viável para a execução de novos pavimentos ou até mesmo em manutenção de pavimentos degradados. Em sua análise, Guimarães (2015) conclui que a utilização de uma mistura do tipo Pré-Misturado a Frio Denso (PMFD), em camada de revestimento com tráfego leve à médio, é uma solução economicamente e ambientalmente viável. Assim, esta pesquisa é uma oportunidade para que se investigue o desempenho do revestimento asfáltico a frio quando incorporado um reforço geossintético, contribuindo para o melhor entendimento da influência do reforço geossintético em misturas asfálticas dessa natureza.

Portanto, tendo em vista as vantagens ambientais e econômicas na utilização de misturas a frio, os benefícios observados pela incorporação de geossintéticos nas pesquisas sobre misturas a quente e a oportunidade de contribuir para um campo ainda pouco explorado, o presente trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento

mecânico, em termos de Estabilidade e Fluência *Marshall*, Resistência à Tração por Compressão Diametral, Módulo de Resiliência e Vida de Fadiga, de misturas do tipo PMFD convencional e reforçada por um elemento geossintético (geogrelha).

3.2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais e os métodos utilizados, a fim de atingir os objetivos da pesquisa, são apresentados a seguir.

3.2.1. Materiais

Para a realização dos ensaios de laboratório, foram utilizados os seguintes agregados: brita 0, brita 1 e pó de pedra, de origem gnáissica. Esses agregados foram provenientes da pedreira Ervália, localizada no município de Ervália, situado na Zona da Mata Norte do estado de Minas Gerais (MG), Brasil. A faixa granulométrica adotada neste trabalho foi a “D” da especificação de serviço ES 153 (DNIT, 2010a). O ligante asfáltico utilizado neste trabalho foi a emulsão asfáltica catiônica convencional do tipo RL-1C, oriunda da empresa Stratura Asfaltos S/A, localizada na cidade de Betim - MG. O material dopante utilizado no trabalho foi o BETUDOPE MASTER, também oriundo da empresa Stratura Asfaltos S/A. O reforço geossintético incorporado na mistura asfáltica foi a geogrelha HaTelit® G50, fornecida pela empresa HUESKER.

3.2.2. Métodos

Os métodos utilizados na execução deste trabalho comportam sete etapas, cujas particularidades se encontram descritas a seguir:

Etapa 1 – Caracterização das propriedades físicas dos agregados e do ligante asfáltico. A Tabela 3.1 identifica os ensaios realizados sobre os materiais empregados nesse programa experimental de pesquisa, com correspondente indicação da norma adotada.

Tabela 3.1 - Ensaios realizados para a caracterização dos materiais empregados no programa experimental de pesquisa e respectivas normas

Agregado graúdo	Material	
	Agregado miúdo	Ligante asfáltico
Análise granulométrica -ME 083 (DNER, 1998a)	Análise granulométrica - ME 083 (DNER, 1998a)	Massa específica e densidade relativa - ME 193 (DNER, 1996)
Abrasão Los Angeles - ME 035 (DNER, 1998b)	Massa específica -ME 194 (DNER, 1998d)	Peneiração - NBR 14393 (ABNT, 2012a)
Absorção e densidade - ME 081 (DNER, 1998c)	Equivalente de areia – ME 054 (DNER, 1997)	Carga de partícula – ME 156 (DNIT, 2011)
Adesividade ao ligante betuminoso - ME 078 (DNER, 1994b)		pH da emulsão alifática – NBR 6299 (ABNT, 2012b)
Índice de forma - ME 086 (DNER, 1994c)		

Etapa 2 – Composição granulométrica de projeto. A partir dos resultados obtidos da caracterização granulométrica dos agregados realizada na *Etapa 1*, foi composta uma mistura de agregados, por meio de tentativas, que se adéqua à faixa “D” da especificação de serviço ES 153 (DNIT, 2010a).

Etapa 3 – Determinação do teor de ligante inicial. Através da formulação proposta por Duriez (1954, *apud* SANTANA 1992, p. 123-125), calculou-se o teor de ligante residual, ou seja, a quantidade de asfalto efetivo presente na mistura asfáltica, para a mistura de agregados composta na *Etapa 2*. A fórmula utilizada, adaptada de Duriez (1954, *apud* SANTANA 1992, p. 124), para o cálculo do teor de ligante residual é descrita a seguir:

$$p = k \times S^{0.2} \quad (7)$$

em que:

p: porcentagem de asfalto residual, em relação ao peso total dos agregados;

S: superfície específica do agregado (m²/kg);

k: coeficiente denominado módulo de riqueza.

Etapa 4 – Determinação do teor de umidade de molhagem e do teor de umidade de compactação. Foram buscados, na literatura técnica (TUCHUMANTEL, 1990; CLERMAN, 2004; MAMLOUK *et al.*, 1980; QUIMI-KAO, 1993), valores usuais referentes ao teor de umidade de molhagem. Após a escolha do teor de umidade de molhagem e de posse do teor de emulsão asfáltica inicial obtido na *Etapa 3*, determinou-se, por meio de valores de Estabilidade *Marshall*, de acordo com o método de ensaio ME 107 (DNER, 1994a), o teor de umidade em relação à massa de agregados que foi utilizado para a compactação das misturas asfálticas.

Etapa 5 – Dosagem Marshall. Realizou-se a dosagem *Marshall* em misturas asfálticas do tipo PMFD e obteve-se o teor de ligante de projeto. Para a realização da dosagem, manteve-se constante o teor de umidade de compactação obtido na *Etapa 4*. Foram analisados 5 traços em peso de emulsão asfáltica: 6,0%; 6,5%; 7,0%; 7,5%; 8,0%. Para atingir o teor de umidade de compactação estipulado, a cura das misturas foi feita à temperatura ambiente, com um fluxo de ar contínuo e, eventualmente, expondo a parte úmida das mesmas. O tempo de cura variou para cada traço de emulsão asfáltica, mas sem exceder o tempo máximo de 60 minutos estipulado no método de ensaio ME 107 (DNER, 1994a).

Seguindo o método de ensaio ME 107 (DNER, 1994a), para cada traço, foram produzidos, no mínimo, três corpos de prova de massa aproximadamente igual a 1200g.

Cada corpo de prova (CP) foi compactado com 75 golpes em cada uma de suas faces. A densidade aparente foi determinada seguindo o método de ensaio ME 117 (DNER, 1994d). Os parâmetros abordados na dosagem *Marshall* são apresentados na Tabela 3.2, junto com suas respectivas equações.

Tabela 3.2 - Parâmetros e equações empregadas na dosagem *Marshall*

Densidade máxima teórica (DMT)	$DMT = \frac{100}{\left(\frac{\%_{ag}}{d_{ag}} + \frac{\%_{am}}{d_{am}} + \frac{\%_{f}}{d_f} + \frac{\%_{CAP}}{d_{CAP}} \right)}$	(3.8)
Porcentagem de vazios na mistura (Vv)	$V_v = \left(\frac{DMT - d}{DMT} \right) \times 100$	(3.9)
Porcentagem de vazios no agregado mineral (VAM)	$V_{AM} = \left(\frac{DMT - d}{DMT} \right) \times 100 + \frac{d \times \%_{CAP}}{d_{CAP}}$	(3.10)
Relação betume-vazios (RBV)	$RBV = \frac{\%V_b}{V_{AM}}$	(3.11)
Estabilidade <i>Marshall</i> (E)	$E = F \times fc$	(3.12)

Em que: d – massa específica aparente da mistura; %_{ag}, %_{am}, %_f e %_{CAP} – porcentagens de agregado graúdo, agregado miúdo, filer e de cimento asfáltico de petróleo, respectivamente; d_{ag}, d_{am}, d_f e d_{CAP} – massas específicas reais dos grãos de agregado graúdo, agregado miúdo, filer e de cimento asfáltico de petróleo, respectivamente; V_b – volume de betume na mistura; F – força de ruptura do CP; fc – fator de correção em função da altura média do CP.

Etapa 6 – Produção dos corpos de prova para a análise das propriedades mecânicas. Utilizando o teor de ligante de projeto, produziram-se corpos de prova sem e com a inclusão do elemento de reforço geossintético. Fez-se a incorporação da geogrelha (Figura 3.1) na posição intermediária dos corpos de prova. Os corpos de prova que não continham o geossintético foram compactados conforme explicitado na *Etapa 5*, porém, para que o elemento de reforço fosse posicionado de forma correta, garantindo que sua posição se encontrasse no meio do corpo de prova, a metodologia adotada foi a descrita a seguir.

Após atingir a umidade de compactação, dividiu-se a mistura asfáltica em duas partes com massas praticamente iguais. Posteriormente, colocou-se a primeira parte no molde do compactador *Marshall* e, com o auxílio de um soquete leve de madeira, deram-se 3 golpes para a regularização da camada. Em seguida, posicionou-se a geogrelha HaTelit® G 50 e, logo após, o restante da mistura asfáltica. Com o geossintético devidamente posicionado, promoveu-se a aplicação dos 75 golpes em cada face do CP. Dessa forma, garantiu-se que a mesma energia de compactação foi utilizada para os corpos de prova sem e com a presença do reforço.

Figura 3.1 - Ilustração das etapas da produção dos corpos de prova reforçados pela geogrelha: (a) disposição da primeira metade (em massa) da mistura asfáltica; (b) regularização da camada com um soquete de madeira; (c) inserção da geogrelha; (d) disposição do restante da mistura asfáltica



Etapa 7 – Determinação das propriedades mecânicas. As propriedades mecânicas analisadas nessa pesquisa e suas respectivas normas estão descritas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Ensaio de determinação das propriedades mecânicas das misturas asfálticas e respectivas normas

Determinação da Estabilidade e Fluência <i>Marshall</i>	ME 107 (DNER, 1994a)
Determinação da resistência à tração por compressão diametral	ME 136 (DNIT, 2010b)
Determinação do módulo de resiliência	ME 135 (DNIT, 2010c)

Os ensaios de determinação das propriedades mecânicas foram realizados sob a temperatura controlada de 25°C, salientando-se que os ensaios dinâmicos (módulo de resiliência e vida de fadiga) foram realizados no Laboratório de Pavimentação da Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), em Juiz de

Fora (MG).

O protocolo do ensaio de vida de fadiga seguiu os procedimentos internos do Laboratório de Pavimentação da Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF) e está descrito em Marques (2004). O ensaio foi feito por compressão diametral à tensão controlada, sendo a carga aplicada através de um equipamento pneumático a uma frequência de 1Hz (60 ciclos por minuto), com tempo de carregamento de 0,1 segundo e 0,9 segundo de descarregamento. Quatro níveis de tensão foram escolhidos: 15%, 25%, 35% e 40% do valor da carga que resultaria na resistência à tração da amostra (RT). Para que se atingisse cada nível de tensão aplicado, foi necessário aplicar uma carga (F), obtida através da equação (3.13):

$$F = \frac{\pi \times D \times H}{2} \times (\%RT) \quad (3.13)$$

em que:

F: carga aplicada para atingir o nível de tensão;

D: diâmetro do corpo de prova;

H: altura do corpo de prova;

%RT: nível de tensão aplicado.

A vida de fadiga foi expressa pelo número N de solicitações necessárias para o fim do ensaio, relacionando a diferença de tensões no centro da amostra ($\Delta\sigma$) por modelos do tipo log-log, dados pela equação (3.14).

$$N = k_1 \times \left(\frac{1}{\Delta\sigma} \right)^{n_1} \quad (3.14)$$

em que:

N: número de repetições de carga necessárias à ruptura do corpo de prova (vida de fadiga);

$\Delta\sigma$: diferença entre as tensões de compressão (σ_c) e de tração (σ_t) no centro do corpo de prova, expressa pela equação (3.15);

k_1 e n_1 : parâmetros experimentais.

$$\Delta\sigma = \sigma_c - \sigma_t = 3 \times \sigma_t - (-\sigma_t) = 4 \times \sigma_t = \frac{8 \times F}{\pi \times D \times H} \quad (3.15)$$

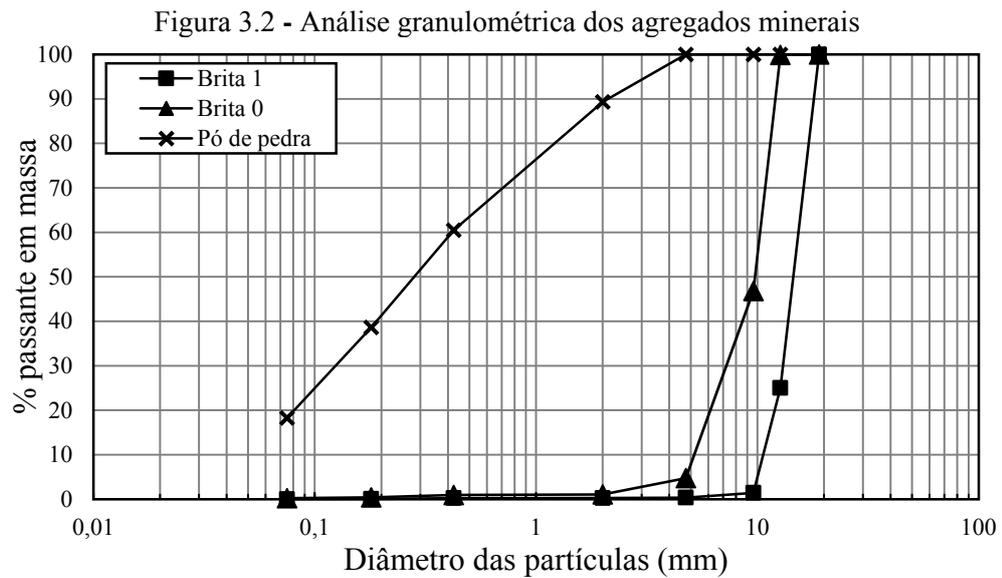
3.3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Etapa 1 – Caracterização das propriedades físicas dos agregados e do ligante asfáltico. Os resultados obtidos nos ensaios de caracterização dos agregados são

apresentados na Tabela 3.4 - Resultados de caracterização física dos agregados minerais. A análise granulométrica dos agregados minerais é ilustrada na Figura 3.2.

Tabela 3.4 - Resultados de caracterização física dos agregados minerais

Propriedades analisadas	Material		
	Brita 1	Brita 0	Pó de pedra
Massa específica (g/cm ³)	2,817	2,796	2,825
Absorção (%)	0,65	0,68	-
Índice de forma	-	0,9	-
Abrasão <i>Los Angeles</i> (%)	-	43	-
Equivalente de areia (%)	-	-	59



O índice de forma encontrado para o agregado é satisfatório, diferentemente do valor encontrado para a abrasão *Los Angeles*, que supera 40%, o máximo estabelecido pela especificação de serviço ES 153 (DNIT, 2010a), provavelmente em decorrência de sua natureza gnáissica. Porém, salienta-se que a referida especificação permite a utilização do agregado caso o mesmo já tenha sido utilizado anteriormente e apresentado um desempenho satisfatório. Na região de Viçosa – MG, os agregados provenientes da jazida da Pedreira Ervália são largamente empregados em obras de engenharia, tanto na construção civil quanto na pavimentação. Dessa forma, o estudo de misturas asfálticas compostas por esse material é importante para o desenvolvimento técnico-científico da engenharia de pavimentação regional. Também foi observado em Tinajeros *et al.* (2016) e Silva *et al.* (2016), pesquisas que utilizaram o mesmo agregado (mesma coleta de amostra), que os resultados obtidos foram satisfatórios. Portanto, mesmo com o valor obtido de abrasão *Los Angeles* superior ao máximo estabelecido pela especificação de serviço ES 153 (DNIT, 2010a), foi dada a continuidade da pesquisa com a utilização desse material.

O resultado obtido no ensaio de equivalente de areia está de acordo com a especificação de serviço ES 153 (DNIT, 2010a), a qual exige um valor superior à 55% para o resultado do referido ensaio.

A adesividade ao ligante asfáltico mostrou-se insatisfatória, havendo, portanto, a necessidade de se utilizar um material dopante. A deficiência apresentada na adesividade ao ligante asfáltico pode ser explicada pela origem gnáissica dos agregados. Utilizou-se 0,1% em massa de BETUDOPE MASTER em relação à massa de emulsão asfáltica e procedeu-se a análise da adesividade ao ligante asfáltico, sendo o resultado encontrado satisfatório.

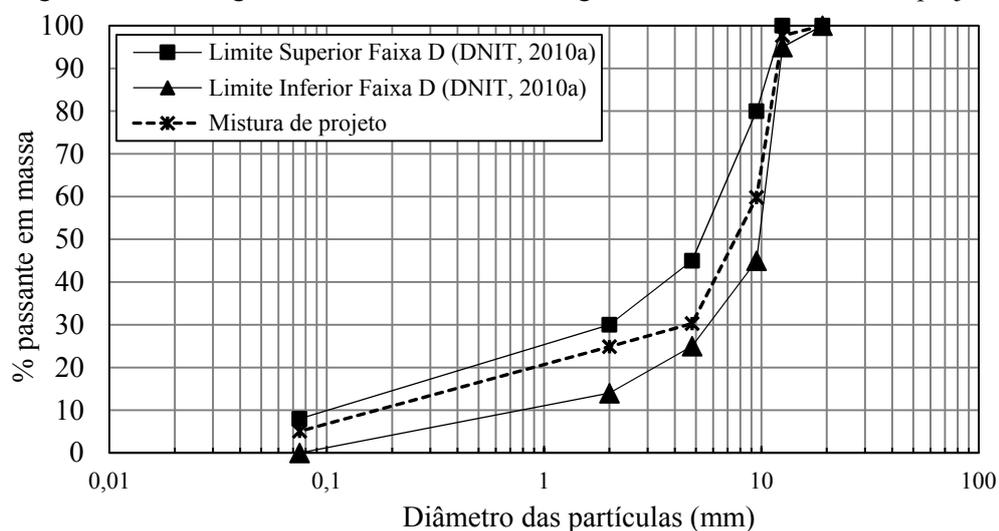
Os resultados da caracterização física do ligante asfáltico utilizado são apresentados na Tabela 3.5, constatando-se a sua conformidade com a especificação de material EM 165 (DNIT, 2013).

Tabela 3.5 - Resultados de caracterização física do ligante asfáltico

Propriedades analisadas	Material
	Emulsão asfáltica – RL 1C
Densidade	1,03
pH da emulsão asfáltica	3,09
Carga de partículas	Carga positiva
Peneiração da emulsão asfáltica (%)	0,01

Etapa 2 – Composição granulométrica de projeto. A faixa granulométrica selecionada para o estudo foi a “D”, destinada à camada de rolamento, segundo a especificação ES 153 (DNIT, 2010a). A mistura de agregados foi composta por 3% de brita 1, 70% de brita 0 e 27% de pó de pedra. A Figura 3.3 ilustra os limites superior e inferior da faixa “D” (DNIT, 2010a) e a mistura de agregados (mistura de projeto) utilizada nesta pesquisa.

Figura 3.3 - Faixa granulométrica de trabalho e granulometria da mistura de projeto



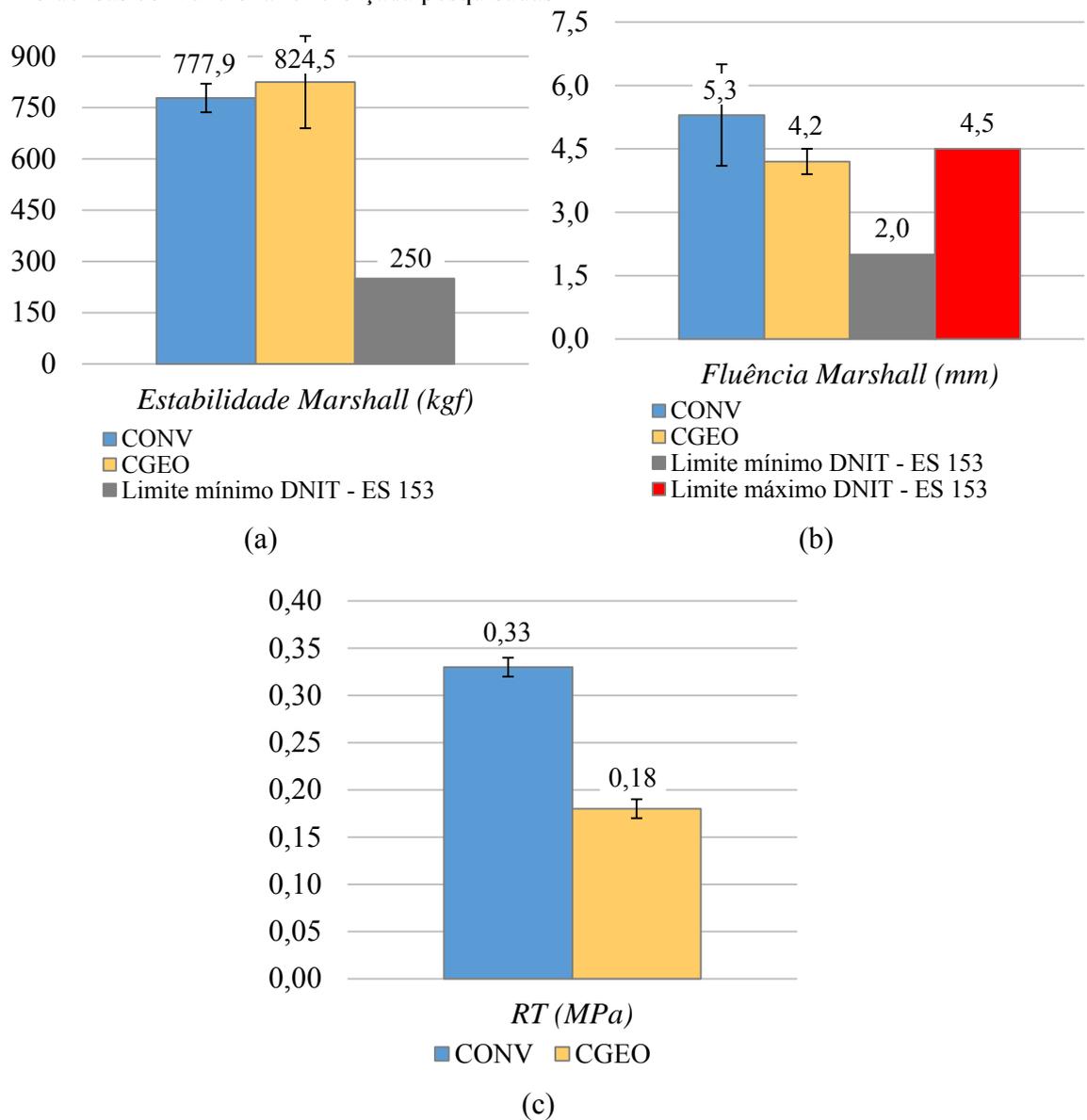
Etapa 3, Etapa 4 e Etapa 5. Os resultados obtidos nessas etapas e suas respectivas discussões encontram-se descritas no item “2.3. RESULTADOS” desse trabalho. Ademais, para o presente trabalho, admitiu-se: (i) um intervalo de teor de emulsão asfáltica inicial, em relação ao peso total da mistura (%EA), de $6,71\% < \%EA < 9,31\%$; (ii) o teor de umidade de molhagem e o teor de umidade de compactação de, respectivamente, 2,5% e 4,41% em massa e em relação à massa de agregados minerais; (iii) o teor de ligante de projeto como sendo de 7,0% em massa de EA, em relação à massa total da mistura; (iv) a mistura asfáltica de projeto apresentando valores de V_v , Estabilidade *Marshall* e Fluência *Marshall*, respectivamente, iguais a 11,9%, 777,9 kgf e 5,3 mm.

Etapa 6 – Produção dos corpos de prova para a análise das propriedades mecânicas. Seguindo o procedimento descrito no subitem “3.2.2. Métodos”, os corpos de prova foram confeccionados utilizando um teor de emulsão asfáltica de 7,0%, em relação à massa total da mistura, para ambos os casos, com e sem reforço geossintético. Para uma melhor identificação, o código utilizado para os corpos de prova da mistura convencional foi “COVN”, e para a mistura contendo a geogrelha foi “CGEO”.

Etapa 7 – Determinação das propriedades mecânicas. A Figura 3.4 apresenta a comparação dos valores obtidos nos ensaios *Marshall* e de resistência à tração por compressão diametral (RT), com seus respectivos desvios-padrão.

Nota-se que, em termos de Estabilidade e Fluência *Marshall*, a incorporação da geogrelha resultou na melhoria do desempenho da mistura asfáltica, uma vez que houve um aumento no valor de Estabilidade e uma redução no valor de Fluência. Ambos os valores de Estabilidade estão em conformidade com o valor mínimo estabelecido pela especificação de serviço ES 153 (DNIT, 2010a) de 250 kgf. Já para a Fluência *Marshall*, somente com a incorporação do reforço é que a mistura apresentou valor dentro do intervalo de 2,0 a 4,5mm estabelecido pela especificação de serviço ES 153 (DNIT, 2010a). Dessa forma, para o ensaio *Marshall*, esses resultados mostraram que a incorporação do reforço geossintético produziu um aumento na estabilidade da mistura asfáltica em questão, ou seja, produziu um aumento na habilidade em resistir à deformação permanente provocada por um carregamento externo.

Figura 3.4 - Resultados obtidos para as propriedades mecânicas (a) Estabilidade *Marshall*, (b) Fluência *Marshall* e (c) resistência à tração por compressão diametral (RT) das misturas asfálticas a frio densas convencional e reforçada pesquisadas

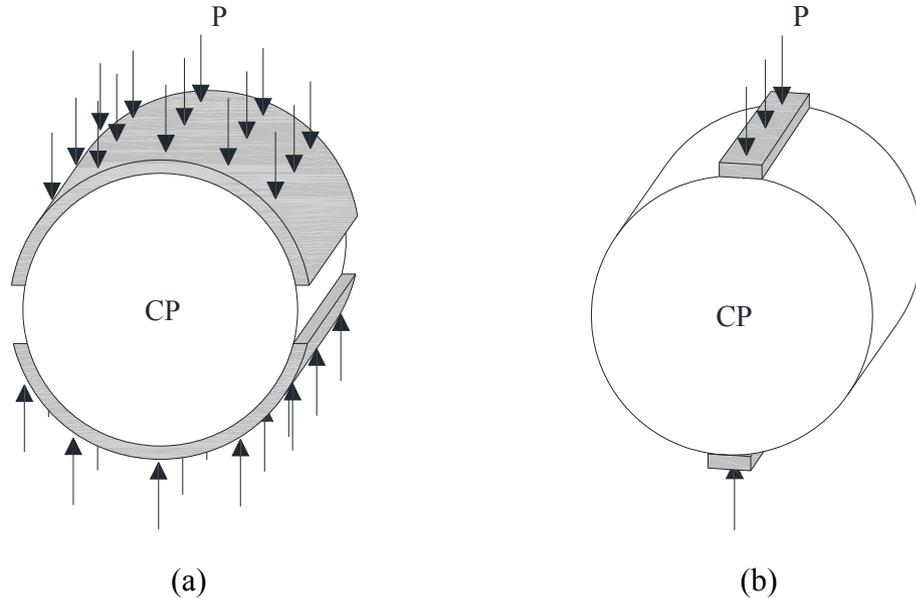


Porém, quando analisada a resistência à tração por compressão diametral (RT), os resultados não foram condizentes com os observados no ensaio *Marshall*. Isso se deve, provavelmente, ao fato de que as configurações desses ensaios são diferentes e às implicações dessas diferenças na mobilização do reforço.

No ensaio *Marshall*, tem-se uma condição de carregamento onde a carga compressiva externa (P) aplicada é distribuída em uma porção maior da superfície do corpo de prova cilíndrico regular (Figura 3.5a) quando comparada à porção externa comprimida correspondente ao ensaio de resistência à tração (Figura 3.5b). Essa condição de carregamento imposta pelo molde utilizado no ensaio *Marshall* (condição de fronteira) induz o tensionamento em um maior volume interno do corpo de prova, possibilitando a sollicitação do reforço geossintético, o qual contribui para o incremento da estabilidade

interna da mistura aos mecanismos de deslocamento e/ou quebra de agregados característicos dessa modalidade de ensaio.

Figura 3.5 - Comparação das condições de carregamento e de fronteira dos ensaios (a) *Marshall* e (b) de resistência à tração por compressão diametral (RT)



Nesse mesmo contexto, no ensaio de resistência à tração por compressão diametral, as tensões internas induzidas pelo carregamento externo abrangem um menor volume do corpo de prova, restringindo a extensão das deformações necessárias para mobilizar a capacidade resistente do reforço geossintético.

Adicionalmente às condições de contorno particulares do ensaio de determinação da RT, pode-se também conferir à aderência massa asfáltica-geogrelha e à posição relativa do reforço no interior do corpo de prova explicações complementares para a redução acentuada desse parâmetro mecânico quando da incorporação da geogrelha.

Ao ensaiar os corpos de prova com a geogrelha, observou-se, após exumação destes (Figura 3.6), a falta de aderência entre a mistura asfáltica e o elemento geossintético no plano de inserção do reforço. A Figura 3.6 foi gerada após a realização do ensaio de resistência à tração, e nela pode-se observar que o geossintético não se encontrava aderido a nenhuma camada do corpo de prova que o envolvia, e, contrariamente, o mesmo apresentou-se como um plano de segregação da mistura asfáltica compactada. Portanto, a geogrelha e a mistura asfáltica não se comportaram como um sistema coeso, solidarizado, o que provavelmente interferiu no comportamento mecânico da mistura reforçada com a geogrelha, considerando-se o estado particular de tensões induzido no corpo de prova por este ensaio.

No caso específico dessa pesquisa, constata-se que a não aderência do elemento

de reforço à mistura asfáltica compactada restringiu a integridade do conjunto e, contrariamente, criou uma zona de descontinuidade física no interior do sistema, a qual representou uma zona de fraqueza do produto compactado para o estado de tensões particulares geradas no ensaio estático de tração por compressão diametral.

Figura 3.6 - Exumação da geogrelha em um corpo de prova após a realização do ensaio de resistência à tração por compressão diametral



Um estudo feito por Ai *et al.* (2012) analisa o efeito no desempenho de uma estrutura de pavimento, onde o revestimento asfáltico apresenta problemas de aderência. Os autores estudaram o comportamento à fadiga de corpos de prova elaborados em mistura asfáltica com diferentes teores de emulsão asfáltica na interface mistura asfáltica – reforço geossintético e concluíram que a vida de fadiga dos corpos de prova é aumentada com o incremento do teor de asfalto residual na interface até um determinado ponto onde a vida de fadiga começa a cair, evidenciando a existência de um teor ótimo de emulsão asfáltica na interface. Portanto, segundo esses pesquisadores, a eficiência do comportamento de um revestimento asfáltico depende também da aderência entre suas camadas, e, uma vez que esse parâmetro não é atendido, as camadas se comportam como elementos separados de menor eficiência mecânica.

Salienta-se que, na presente pesquisa, várias tentativas foram feitas visando o aumento da aderência reforço-mistura asfáltica, tais como pela remoção da película geossintética fina existente no reforço HaTelit® G 50 (Figura 3.7) e pela imprimação do reforço, utilizando o mesmo seja em sua configuração original (com a película) seja em sua configuração modificada (sem a película). Com essa breve avaliação, a mistura somente apresentou, após a exumação dos corpos de prova ensaiados, uma melhor integridade no sistema mistura asfáltica - geogrelha, em termos de dificuldade de separar

a geogrelha da mistura asfáltica, quando houve a remoção da película geossintética do HaTelit® G 50.

Na hipótese de que o sistema mistura asfáltica – reforço geossintético se comporte como um sistema coeso, espera-se um aumento da resistência à tração do conjunto, como é observado em Bastos (2010). Assim, no caso de a mistura apresentar um comportamento solidário, as deformações geradas no corpo de prova, ocasionadas pelo carregamento externo, seriam transmitidas para o reforço geossintético e, mobilizando suas fibras, conferiria incremento de resistência ao esforço de tração, proporcionando uma melhora no comportamento mecânico da mistura reforçada.

Figura 3.7 - Reforço geossintético HaTelit® G 50 utilizado na pesquisa, destacando a película geossintética

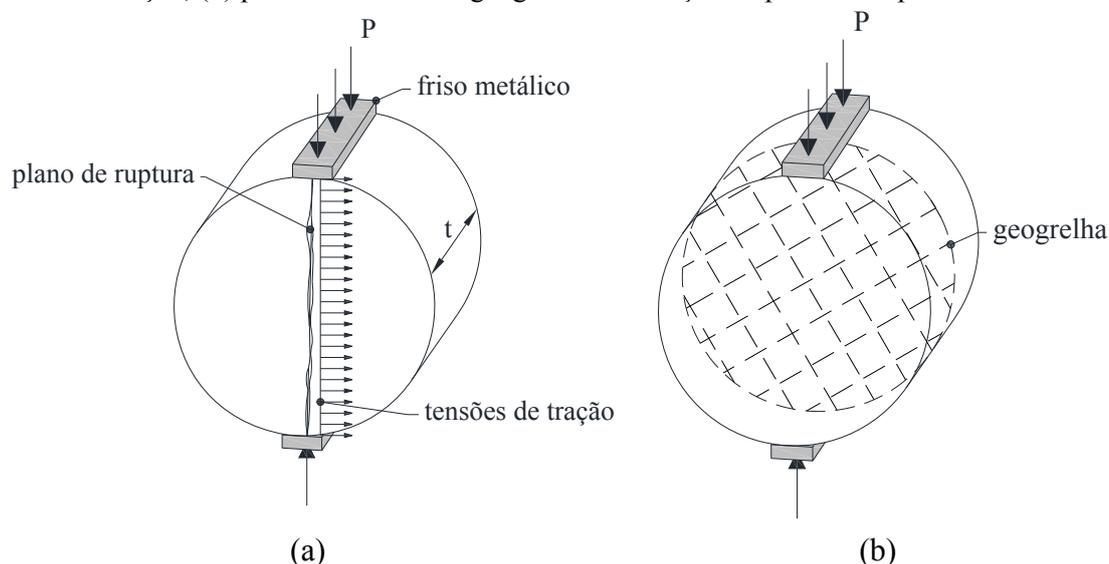


Conforme mencionado, outro aspecto que pode ter contribuído para a redução acentuada da resistência à tração por compressão diametral do sistema mistura asfáltica-reforço corresponde à posição relativa do reforço em relação ao plano de atuação dos esforços de tração gerados internamente ao sistema estrutural pelo carregamento externo. Sabe-se que a configuração do ensaio de compressão diametral considera a aplicação de forças concentradas e diametralmente opostas de compressão em um corpo de prova cilíndrico, as quais geram, ao longo do plano diametral vertical solicitado, tensões de tração uniformes perpendiculares a esse plano (Figura 3.8a). Assim, a determinação de RT assume que o corpo de prova rompe devido à tensão de tração uniforme gerada ao longo do plano diametral solicitado (plano de ruptura) que se iguala à tensão máxima admissível do material.

Para os corpos de prova moldados na presente pesquisa, nota-se que o reforço geossintético não está disposto segundo o plano diametral vertical no qual atuam as tensões de tração descritas anteriormente, mas sim segundo um plano transversal perpendicular ao plano de ruptura característico do ensaio de compressão diametral

(Figura 3.8b). Conseqüentemente, essa posição particular do reforço impede que o mesmo tenha sua resistência mobilizada pelas tensões internas de tração, impedindo que este atue como elemento de reforço do sistema a tais sollicitações.

Figura 3.8 - Ensaio de resistência à tração (RT): (a) detalhe do plano de ruptura e a disposição das tensões de tração; (b) posicionamento da geogrelha em relação ao plano de ruptura



A Tabela 3.6 apresenta os resultados dos ensaios para determinação do módulo de resiliência (MR) das misturas asfálticas convencional e reforçada, contendo também a relação MR/RT.

Tabela 3.6 - Parâmetros obtidos através dos ensaios de módulo de resiliência (MR)

Nº CP	Altura (cm)	Diâmetro (cm)	MR (MPa)	Média MR (MPa)	Desvio-padrão (MPa)	MR/RT
CONV 01	6,263	10,131	4029			
CONV 02	6,268	10,120	3817			
CONV 03	6,287	10,109	4004			
CONV 04	6,226	10,094	2500	3072	753	9309
CONV 05	6,147	10,133	2252			
CONV 06	6,219	10,129	2469			
CONV 07	6,153	10,110	2932			
CONV 08	6,219	10,100	2576			
CGEO 01	6,222	10,139	1342			
CGEO 02	6,228	10,132	1898			
CGEO 03	6,124	10,182	1886			
CGEO 04	6,220	10,143	1911	1713	268	9517
CGEO 05	6,265	10,112	1922			
CGEO 06	6,248	10,097	1893			
CGEO 07	6,184	10,041	1328			
CGEO 08	6,182	10,106	1521			

Em relação ao valor de MR para a mistura de PMFD reforçada, observou-se uma redução significativa nos resultados comparativamente ao PMFD convencional. Considerando-se que a configuração do ensaio de módulo resiliente é similar ao de

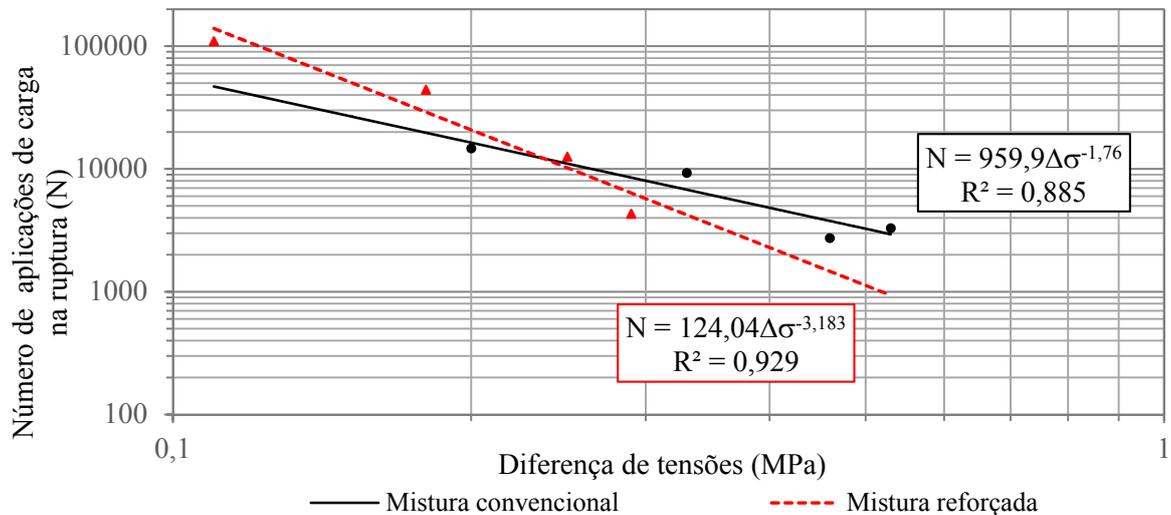
determinação da resistência à tração por compressão diametral, diferenciando-se essencialmente quanto a natureza da carga externa aplicada (dinâmica e estática, respectivamente), tais resultados podem ser explicados pelas mesmas razões apresentadas anteriormente para os resultados do ensaio de RT. Importante destacar que, a despeito das diferenças de magnitude dos respectivos valores de MR e RT obtidos em cada um dos modos pesquisados (convencional e reforçado), os valores da relação MR/RT possuem a mesma ordem de grandeza, indicando, para as particularidades da pesquisa, a inadequação desse parâmetro para fins de estimativa da qualidade da mistura asfáltica relativamente às suas propriedades de rigidez e de resistência à tração.

A Tabela 3.7 e a Figura 3.9 apresentam os resultados obtidos dos ensaios de vida de fadiga para as misturas convencionais com e sem a utilização do reforço geossintético. A Tabela 3.8 - Parâmetros dos modelos matemáticos de ajuste dos dados experimentais derivados do ensaio de vida de fadiga apresenta os parâmetros dos modelos matemáticos de ajuste dos dados experimentais, obtidos através de regressão linear, para as misturas asfálticas analisadas.

Tabela 3.7 - Resultados do ensaio de vida de fadiga

Nº CP	%RT	$\Delta\sigma$ (MPa)	Número de aplicações de carga na ruptura (N)
CONV 01	15	0,20	14729
CONV 03	25	0,33	9278
CONV 04	35	0,46	2733
CONV 07	40	0,53	3294
CGEO 01	15	0,11	110002
CGEO 03	25	0,18	44307
CGEO 05	35	0,25	12578
CGEO 07	40	0,29	4327

Figura 3.9 - Projeção do comportamento à fadiga das misturas asfálticas convencional e reforçada



A partir dos gráficos e dos parâmetros fornecidos pela análise de regressão, pode-

se perceber que a mistura convencional apresentou um melhor desempenho quando comparada à mistura reforçada, traduzido pela melhor resistência à fadiga em níveis de tensões mais elevados e pela sensibilidade do comportamento à fadiga quando se eleva o nível de tensão. A sensibilidade ao nível de tensão pode ser traduzida pelo coeficiente n_i , de modo que quanto maior a magnitude desse coeficiente, maior o decréscimo de resistência à fadiga ao aumentar o nível de tensão aplicado. Para Marcon (2016), misturas que apresentam valores maiores desse parâmetro (n_i) são consideradas mais suscetíveis à deformação de tração. Morilha Jr. (2004) comenta que quanto menor a suscetibilidade à variação de tensões, melhor o comportamento da mistura asfáltica em serviço.

Tabela 3.8 - Parâmetros dos modelos matemáticos de ajuste dos dados experimentais derivados do ensaio de vida de fadiga

Misturas asfálticas	$N = k_i \times (1/\Delta\sigma)^{n_i}$		
	k_i	n_i	R^2
Convencional	959,97	1,763	0,885
Reforçada	124,04	3,183	0,929

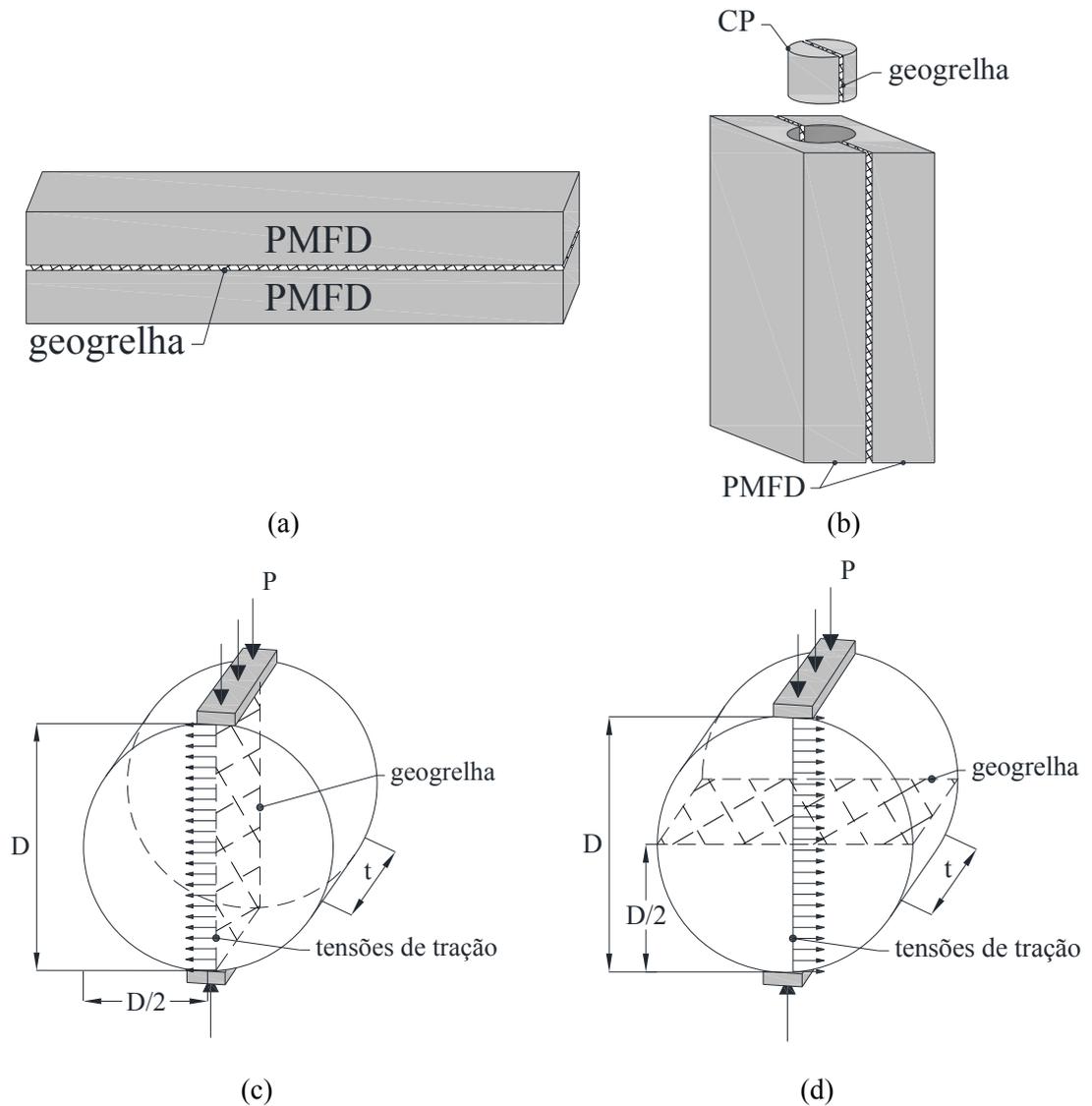
Para os comportamentos em fadiga verificados para os materiais pesquisados, ressalta-se, mais uma vez, o provável efeito deletério da falta de aderência entre o reforço e a mistura asfáltica e a aparente não contribuição do reforço ao mecanismo de ruptura por fadiga em decorrência de sua posição relativa perpendicular ao plano de ruptura.

Considerando-se os resultados que foram obtidos nos ensaios que envolvem a determinação de parâmetros de comportamento mecânico por meio do emprego da técnica de compressão diametral (RT, MR e vida de fadiga), é importante destacar que a literatura técnico-científica apresenta pesquisas que utilizam outro tipo de configuração de ensaio para a mensuração da resistência à tração de uma mistura asfáltica reforçada (HOSSEINI, 2009; VIRGILI *et al.*, 2009; LEE, 2008; KIM *et al.*, 2010; OBANDO, 2012; ROMEO e MONTEPARA, 2012; ROMEO *et al.*, 2014; PASQUINI *et al.*, 2014; FONSECA, 2015; CANESTRARI *et al.*, 2015; OBANDO, 2016; FONSECA, 2016), nas quais foram utilizados corpos de prova prismáticos para obter os respectivos parâmetros via solicitações de tração por meio de flexão.

A despeito dessa última configuração de ensaio, sugere-se, para fins de aproveitamento do ensaio de compressão diametral, que os corpos de prova cilíndricos reforçados sejam moldados em placas (Figura 3.10a) e, em seguida, extraídos por sondas rotativas (Figura 3.10b) para posterior realização dos ensaios mecânicos. Propõe-se que esses corpos de prova sejam submetidos a duas novas configurações de ensaio, visando à

avaliação do eventual efeito do reforço nas propriedades mecânicas derivadas dos ensaios de compressão diametral estático (RT) e dinâmicos (MR e Vida de Fadiga).

Figura 3.10 - Metodologia proposta para ensaios de compressão diametral em corpos de prova (CPs) de misturas asfálticas reforçadas por geossintético: (a) compactação em placas retangulares com a inserção do geossintético entre as camadas de mistura asfáltica; (b) extração dos CPs cilíndricos através de sonda rotativa; (c) configuração de ensaio de compressão diametral com reforço posicionado no plano diametral vertical; (d) configuração de ensaio de compressão diametral com reforço posicionado no plano diametral horizontal.



Na primeira configuração (Figura 3.10c), propõe-se o posicionamento do reforço sobre o plano diametral vertical, no qual se dá a ruptura do corpo de prova nos ensaios de compressão diametral, supondo-se que o reforço, nesse plano, atuará diretamente na absorção das tensões de tração responsáveis pela ruptura da mistura asfáltica compactada. Na segunda configuração (Figura 3.10d), propõe-se o posicionamento do reforço segundo o plano diametral horizontal do corpo de prova, perpendicular ao plano diametral vertical de ruptura, supondo-se que, nesse plano, o reforço poderá ser mobilizado na intersecção

com o plano diametral vertical, por meio das tensões de tração geradas pelo carregamento externo e atuantes nesse último plano.

Pressupõe-se que a configuração Figura 3.10c seja mais fidedigna às particularidades dos ensaios de tração por compressão diametral para misturas asfálticas reforçadas por geossintéticos dado o posicionamento do reforço exatamente no plano de ruptura induzido pelo estado interno de tensões gerado pelo carregamento externo. Salienta-se, contudo, que mesmo a configuração da Figura 3.10d pode permitir a obtenção de um índice de resistência que traduza, para fins comparativos entre diferentes tipos de reforço geossintético, as respectivas influências desses reforços nas propriedades mecânicas de interesse de misturas asfálticas reforçadas comparativamente às convencionais não reforçadas.

3.4. CONCLUSÃO

Nesse trabalho, propôs-se analisar e quantificar o efeito da inserção de um elemento geossintético de reforço sobre um conjunto de propriedades mecânicas de uma mistura asfáltica do tipo PMFD, a fim de complementar o conhecimento técnico-científico pertinente à caracterização mecânica de misturas asfálticas a frio reforçadas com geossintéticos, dada a lacuna de informações a respeito de tais misturas.

Para as particularidades dos ensaios e do sistema mistura asfáltica-reforço geossintético pesquisado, foram constatadas, experimentalmente, diferentes respostas dos materiais estudados quanto à mobilização da capacidade resistente do reforço, as quais se mostraram dependentes do tipo de resistência interna avaliado (compressiva ou de tração), da extensão com que cada tipo de ensaio tensiona internamente o sistema pesquisado, da aderência entre os componentes do sistema e do posicionamento do reforço geossintético relativamente ao plano de ruptura do sistema.

Para os ensaios *Marshall*, constatou-se uma melhoria das propriedades de resistência e rigidez da mistura asfáltica compactada em decorrência da inserção do reforço, o mesmo não sendo verificado para os ensaios de compressão diametral estático (RT) e dinâmicos (MR e Vida de Fadiga). Para estes, a conformação dos ensaios realizados mostrou-se inadequada para obtenção dos respectivos parâmetros mecânicos dos PMFDs reforçados, sendo proposta, como consequência, uma metodologia de preparação de corpos de prova e de ensaios de compressão diametral sobre os mesmos, visando a uma avaliação mais fidedigna do efeito do reforço por meio de tais ensaios.

Verificou-se, também, que a ineficiente aderência do elemento de reforço à mistura asfáltica compactada restringiu a integridade do conjunto, criando uma zona de

descontinuidade física no interior do sistema, a qual também contribuiu para o desempenho mecânico deficiente da mistura asfáltica reforçada nas diferentes modalidades de ensaios de compressão diametral contempladas na pesquisa.

Estudos futuros que considerem as restrições identificadas no presente programa experimental de pesquisa e a implementação da metodologia proposta poderão contribuir para avanços adicionais à técnica e à ciência de misturas asfálticas a frio reforçadas por geossintéticos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 14393**. Emulsões asfálticas - determinação da peneiração. Rio de Janeiro, 2012a. 03 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6299**. Emulsões asfálticas - determinação do pH. Rio de Janeiro, 2012b. 02 p.
- AI, C., CHENG, M., YANG, T., QIU, Y., Bending fatigue test and interlayer pavement models for beams of asphalt mixture. **Journal of Highway and Transportation Research and Development**, Beijing, v. 6, n. 4, p. 23-27, 2012.
- AL-QADI, I.L., DESSOUKY, S.H., KWON, J., TUTUMLUER, E., Geogrid-reinforced low-volume flexible pavements: pavement response and geogrid optimal location. **Journal of transportation engineering**, New York, v. 138, n. 9, p. 1083-1090, 2012.
- BANDARU, R., **Cost effective prevention of reflective cracking in composite pavements**. Dissertation Master Degree, The Department of Environmental and Civil Engineering, Louisiana State University, Pineville, Louisiana, USA, 2010. 82 p.
- BASTOS, G.A., **Comportamento mecânico de misturas asfálticas reforçadas com Geogrelhas para pavimentos flexíveis**. Dissertação de mestrado, Publicação CDD:624, Departamento de Engenharia Civil, PUC RJ, Rio de Janeiro, RJ, 2010. 247 p.
- BASTOS, G. A., CASAGRANDE, M.D.T., MOTTA, L. M. G., FOLLE, D., Ensaio de Tração em Disco Circular em Misturas Asfálticas Reforçadas com Geogrelhas. **Revista de Engenharia Civil Imed**, v. 2, n. 2, p.27-36, out. 2015. Complexo de Ensino Superior Meridional S.A. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.18256/2358-6508/recimed.v2n2p27-36>>. Acesso em: 5 fev. 2018.
- BERNUCCI, L. B., MOTTA, L.M.G., CERATTI, J. A. P., SOARES, J. B., **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**, Rio de Janeiro: Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfaltos (ABEDA), 2008. 504 p.
- BÜHLER, A., **Estudo do Efeito de Grelhas de Reforço na Restauração de Pavimentos**. Tese de doutorado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos. 2007.
- 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.
- CLERMAN, D. D. S., **Estudo laboratorial de misturas asfálticas a frio produzidas com incorporação de borracha de pneus**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004. 125 p.
- CORREIA, N. S., **Performance of flexible pavements enhanced using geogrid-reinforced asphalt overlays**. Doctoral Dissertation, São Carlos School of Engineering of the University of Sao Paulo, Sao Carlos, SP, 2014. 205 p.
- CORREIA, N. S., ZORNBERG, J. G., Mechanical response of flexible pavements enhanced with geogrid-reinforced asphalt overlays. **Geosynthetics International**, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1680/jgein.15.00041>>. Acesso em: 5 fev. 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER – ME 035**. Agregados – determinação da abrasão “Los Angeles”: método de ensaio. São Paulo, 1998b. 06p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER – ME 078**. Agregado graúdo – adesividade a ligante betuminoso: método de ensaio. São Paulo, 1994b. 03p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER – ME 081**. Agregados – determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo: método de ensaio. Rio de Janeiro-RJ, 1998c. 06 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER – ME 083**. Agregados – análise granulométrica: método de ensaio. Rio de Janeiro-RJ, 1998a. 05p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER - ME 086**. Agregados – determinação do índice de forma: método de ensaio. Rio de Janeiro: IPR, 1994c. 05p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER – ME 107**. Mistura betuminosa a frio, com emulsão asfáltica – ensaio Marshall. Rio de Janeiro, 1994a. 09p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER - ME 117**. Mistura betuminosa -Determinação da densidade aparente. Rio de Janeiro, 1994d. 04 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER – ME 193**. Materiais betuminosos líquidos e semi-sólidos – determinação da densidade e da massa específica. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), Rio de Janeiro, 1996. 06 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER – ME 194**. Agregados – determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman: método de ensaio. Rio de Janeiro-RJ, 1998d. 04 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT – EM 165**. Emulsões asfálticas para pavimentação – Especificação de material. Rio de Janeiro, 2013. 05p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT –ES 153**. Pavimentação asfáltica – Pré-misturado a frio com emulsão catiônica convencional: especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2010a. 11p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT - ME 135**. Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas - Determinação do módulo de resiliência: método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010c. 06p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT - ME 136**. Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas - Determinação da resistência à tração por compressão diametral: método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010b. 06p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT – ME 156**. Emulsão asfáltica – Determinação da carga de partícula – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2011, 07p.

DURIEZ, M., ARRAMBIDE, J., **Liants hydrocarbonés**, Paris: Dunod, 1954. 752 p.

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**, v. 34, n. 1, p. 11-18, 2012.

FONSECA, L. L., **Avaliação Laboratorial do Desempenho de Sistemas de Reforço de Camadas de Misturas Betuminosas com Geossintéticos**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015. 157 p.

FONSECA, L. L., ALMEIDA, M. G. G., GRECO, J. A. S., Avaliação da resistência a tração na flexão de camadas asfálticas reforçadas com geossintéticos. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 18., 2016, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: ABMS, 2016.

GONZALEZ-TORRE, I., CALZADA-PEREZ, M. A., VEGA-ZAMANILLO, A., Castro-Fresno, D., Experimental study of the behavior of different geosynthetics as anti-reflective cracking systems using a combined-load fatigue test. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 43, n. 4, p. 345-350, 2015.

GUIMARÃES, A. C. R., LOURES, R. C. B., A Utilização de Misturas Asfálticas Usinadas à Frio como Alternativa Técnica, Econômica e Ambiental às Misturas Usinadas à Quente. In: Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, 29., 2015, Ouro Preto. **Anais...** Ouro Preto: ANPET, 2015.

HOSSEINI, H.R.A.; DARBAN, A.K.; FAKHRI, K., The effect of geosynthetic reinforcement on the damage propagation rate of asphalt pavements. **Scientia Iranica**, v. 16, n. 1, p. 26-32, 2009.

KHODAIL, A. e FALLAH, S., Effects of geosynthetic reinforcement on the propagation of reflection cracking in asphalt overlays. **Int. J. Civ. Eng.**, v. 7, n. 2, p. 131-140, 2009.

KIM, H., PARTL, M.N., PIMENTA, R., HEAN, S., Experimental investigation of grid-reinforced asphalt composites using four-point bending beam tests. **Journal of composites materials**, v. 5, n. 44, p. 575-592, 2010.

LEE, S.J., Mechanical performance and crack retardation study of a fiberglass-grid-reinforced asphalt concrete system. **Canadian Journal of Civil Engineering**, v. 35, n. 10, p. 1042-1049, 2008.

MAMLOUK, M. S., WOOD, L. E., GADALLAH, A. A., **Laboratory evaluation of asphalt emulsion mixtures by use of the Marshall and indirect tensile tests**. Washington, D. C.: Transportation Research Board, 1980.

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

MARQUES, G. L. O., **Utilização do módulo de resiliência como critério de dosagem de mistura asfáltica; efeito da compactação por impacto e giratória.** Tese de Doutorado, Curso de Engenharia Civil, Coppe, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004. 461 p.

MORILHA JR, A., **Estudo sobre a ação de Modificadores no Envelhecimento dos Ligantes Asfálticos e nas Propriedades Mecânicas e de Fadiga das Misturas Asfálticas.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis – SC, 2004. 165 p.

NEJAD, F.M., ASADI, S., FALLAH, S. & VADOOD, M., Statistical-experimental study of geosynthetics performance on reflection cracking phenomenon. **Geotextile and Geomembranes**, v. 44, n. 2, p. 178-187, 2016.

NEJAD, F. M., NOORY, A., TOOLABI, S., FALLAH, S., Effect of using geosynthetics on reflective crack prevention. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 16, n. 6, p. 477-487, 2014.

OBANDO, J. R. A., **Uso de Geossintéticos como reforço de revestimentos em pavimentação.** Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2012. 99 p.

OBANDO, J. R. A., **Desempenho de misturas asfálticas reforçadas com geossintéticos.** Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2016. 175 p.

PASQUINI, E., BOCCI, M., CANESTRARI, F., Laboratory characterization of optimized geocomposites for asphalt pavement reinforcement, **Geosynthetics International**, v. 21, n. 1, p. 24-36, 2014.

PRIETO, J. N., GALLEGO, J., PEREZ, I., Application of the wheel reflective cracking test for assessing geosynthetics in anti-reflection pavement cracking systems. **Geosynthetics International**, v. 14, n. 5, p. 287-297, 2007.

QUIMI-KAO S.A., **Curso Básico de Emulsões Asfálticas**, Ciudad de México: Quimi-Kao S.A, 1993.

ROMEO, E., FREDDI, F., MONTEPARA, A., Mechanical behavior of surface layer fiberglass-reinforced flexible pavements. **Int. J. Pavement Eng.**, v. 15, n. 2, p. 95-109, 2014.

ROMEO, E., MONTEPARA, A., Characterization of reinforced asphalt pavement cracking behavior using flexural analysis. **Procedia - Soc. Behav. Sci.**, v. 53, n. 1, p. 356-365, 2012.

SANTANA, H. **Manual de pré-misturados a frio.** Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Petróleo (IBP), 1992. 298 p.

SILVA, T. K., CARVALHO, C. A. B., MARQUES, G. L. O., SANT'ANNA, G. L., SILVA, T. O., MACHADO, C. C., Dosagem de mistura betuminosa a frio e seu estudo sob efeitos de cargas estáticas e repetidas. **Revista Árvore**, v. 40, n. 1, p. 97-106, 2016.

SIRIWARDANE, H., GONDLE, R., BORA, K., Analysis of flexible pavements reinforced with geogrids. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 28, n. 3, p. 287-297, 2010.

SOBHAN, K., GENDUSO, M., TANDON, V., Effects of Geosynthetic Reinforcement on the Propagation of Reflection Cracking and Accumulation of Permanent Deformation in Asphalt Overlays. In: International Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology, 3., 2005, Cartagena, Colombia. **Anais...** Cartagena, Colombia: LACCEI, 2005.

TINAJEROS, R. A. P., SILVA, T. O., PITANGA, H. N., LIMA, D. C., MARQUES, G. L. O., Estudo do comportamento mecânico de misturas asfálticas a quente produzidas com ligantes convencional e modificado por polímero SBS. In: Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, 30., 2016, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ANPET, 2016.

TUCHUMANTEL JR., O., Influência da Umidade de Compactação no PMF Denso. In: Encontro de Asfalto, 10., 1990, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: IBP, 1990.

VIRGILI, A., CANESTRARI, F., GRILLI, A., SANTAGATA, F. A., Repeated load test on bituminous systems reinforced by geosynthetics. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 27, n. 3, p. 187-195, 2009.

YU, B., LU, Q., YANG, J., Evaluation of anti-reflective cracking measures by laboratory test. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 14, n. 6, p. 553–560, 2013.

4. AVALIAÇÃO DO EFEITO DO LIGANTE ASFÁLTICO MODIFICADO NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE PRÉ-MISTURADOS A FRIO DENSOS COM E SEM REFORÇO GEOSSINTÉTICO

RESUMO

Este trabalho teve por objetivo principal comparar os respectivos comportamentos mecânicos, traduzidos pela Estabilidade e Fluência *Marshall*, Resistência à Tração por Compressão Diametral (RT), Módulo de Resiliência (MR) e Vida de Fadiga, de misturas asfálticas do tipo pré-misturado a frio denso (PMFD), considerando-se dois tipos distintos de ligante asfáltico (emulsões asfálticas convencional e modificada por polímeros). Essa avaliação se deu sobre misturas asfálticas compactadas sem e com a inserção de um elemento de reforço geossintético (geogrelha). As misturas asfálticas foram dosadas segundo a metodologia *Marshall*, empregando-se a emulsão asfáltica convencional RL-1C e a emulsão asfáltica modificada por polímeros EMULEX RL-1C. A faixa granulométrica selecionada para o estudo foi a “D”, destinada à camada de rolamento, segundo as especificações ES 153 (DNIT, 2010a) e ES 390 (DNER, 1999). A composição de agregados, em termos de massa total de agregados minerais, foi constituída por 3% de brita 1, 70% de brita 0 e 27% de pó de pedra. Para a melhoria da adesividade do ligante convencional com o agregado mineral, utilizou-se 0,1% em massa de aditivo dopante em relação à massa de emulsão asfáltica convencional, não havendo necessidade de utilizar-se aditivo dopante nas misturas com ligante modificado, evidenciando a capacidade deste em proporcionar melhor adesividade ao agregado. Ao seguir o método de dosagem *Marshall* especificado pela norma ME 107 (DNER, 1994a), utilizou-se o controle de umidade da mistura no momento da compactação. A umidade de molhagem utilizada foi de 2,50% e a umidade de compactação ótima foi de 4,41%, ambas em relação à massa de agregados. Comparativamente ao ligante convencional, a utilização do EMULEX RL-1C promoveu a redução do teor ótimo de emulsão na mistura de projeto em 0,5%, em relação à massa da mistura. Quanto ao desempenho mecânico, observou-se que a alteração do ligante convencional pelo modificado incrementou as propriedades de Estabilidade e Fluência *Marshall*, para ambas as classes de mistura, reforçada e não reforçada. Para a Resistência à Tração por Compressão Diametral e o Módulo de Resiliência, a alteração do ligante asfáltico promoveu seus respectivos incrementos exclusivamente para as misturas reforçadas, em decorrência da melhor aderência entre a mistura asfáltica e o reforço geossintético. Quanto à análise de vida de fadiga, a alteração do ligante apresentou uma melhoria no desempenho também para as misturas reforçadas, refletida na redução

da sensibilidade destas ao nível de tensão. Constatou-se, experimentalmente, que a mobilização da contribuição da componente de coesão interna da mistura asfáltica ao aumento da resistência proporcionada pela emulsão asfáltica modificada, nas duas classes de mistura, mostrou-se dependente da natureza do esforço solicitante, visto que, nos ensaios compressivos (Estabilidade e Fluência *Marshall*), essa mobilização mostrou-se mais evidente que nos ensaios de tração estática (RT) e dinâmica (MR e Vida de Fadiga).

Palavras-chave: Pré-misturado a frio denso. Reforço geossintético. Emulsão asfáltica modificada. Propriedades mecânicas.

ABSTRACT

This study aimed to compare the respective mechanical behavior, in terms of Marshall Stability and Fluency, Diametral Compressive Strength (RT), Resilience Modulus (MR) and Fatigue Life, of dense cold-mixed asphalt concrete, considering two different types of asphalt binder (conventional and polymer modified asphalt emulsions). It was evaluated asphalt mixtures without and with the insertion of a geosynthetic reinforcement element (geogrid). The asphalt mixtures were measured according to the Marshall methodology, using the conventional asphalt emulsion RL-1C and the polymer modified asphalt emulsion EMULEX RL-1C. The particle size range was selected for the study, intended for the surface course layer, according to specifications ES 153 (DNIT, 2010a) and ES 390 (DNER, 1999). The aggregate mix was composed, in terms of total mass of mineral aggregates, by 3% of gravel 1, 70% of gravel 0 and 27% of stone powder. For the improvement of the bonding of the conventional binder to the mineral aggregate, 0.1% by mass of dopant additive was used in relation to the asphalt emulsion mass, and there was no need to use a dopant additive in the modified binder mixtures, evidencing its ability to provide better adhesiveness to the aggregate. Following the Marshall dosage method specified by ME 107 (DNER, 1994a), the moisture control of the mixture was used at the time of compaction. The wetting moisture used was 2.50% by mass in relation to the aggregate mass, and the optimum compaction moisture was 4.41% by mass in relation to the aggregate mass. Compared to the conventional binder, the use of EMULEX RL-1C promoted the reduction of the optimum emulsion content in the design mixture by 0.5%, in relation to the mass of the mixture. Regarding the mechanical performance, it was observed that the alteration of the conventional asphalt binder by the modified asphalt binder increased the Marshall Stability and Fluency properties for both reinforced and unreinforced mixtures. For the Tensile Strength by Diametral Compression and the Resilience Modulus, the alteration of the asphalt binder promoted increments exclusively

for the reinforced mixtures, as a result of the better adhesion between the asphalt mixture and the geosynthetic reinforcement. Regarding the fatigue life analysis, the alteration of the binder showed an improvement in the performance for the reinforced mixtures, reflected in the reduction of the sensitivity of these to the level of tension. It was experimentally verified that the mobilization of the contribution of the internal cohesion component of the asphalt mixture to the increased strength provided by the modified asphalt emulsion in the two mixing classes was shown to be dependent on the nature of the requesting effort, since, in the tests (Stability and Marshall Fluency), this mobilization was more evident than in static and dynamic traction tests (MR and Fatigue Life).

Keywords: Dense cold-mixed asphalt concrete. Geosynthetic reinforcement. Modified asphalt binder. Mechanical proprieties of asphalt mixtures.

4.1. INTRODUÇÃO

Para a maioria das aplicações em pavimentação rodoviária, os ligantes asfálticos convencionais têm apresentado bom comportamento, satisfazendo plenamente os requisitos necessários para o desempenho adequado das misturas asfálticas por eles constituídas, sob as solicitações impostas pelo tráfego de veículos e sob as condições climáticas pertinentes ao ambiente dessas aplicações. Contudo, o aumento das cargas transportadas, o número de veículos em circulação e as extremas condições climáticas encontradas em algumas regiões do Brasil, em particular, têm levado à busca de materiais que, quando implementados nas misturas asfálticas, contribuam para o melhor desempenho destas quando submetidas às novas condições de solicitação (BERNUCCI *et al.*, 2008). Neste sentido, em várias pesquisas têm-se verificado os eventuais benefícios da adição de modificadores aos ligantes asfálticos (SILVA, 2008; SILVA, 2011; NG, 2013), visando à melhoria do desempenho das misturas asfálticas compactadas sob as condições previamente identificadas.

Os ligantes asfálticos modificados com polímero derivam sua origem tecnológica e conceitual da necessidade de melhorar o desempenho e a durabilidade dos materiais asfálticos, bem como sua adesão aos agregados minerais. Eles foram desenvolvidos porque muitos pavimentos flexíveis convencionais tornaram-se funcional e estruturalmente inadequados nas últimas décadas devido a um aumento dramático na intensidade e carga do tráfego, o que reduziu sua vida útil, aumentando assim a frequência de manutenção rodoviária e a necessidade de restauração dos pavimentos (POLACCO *et al.*, 2015).

Encontram-se disponíveis, na literatura técnico-científica, várias pesquisas que

investigam o efeito do ligante asfáltico modificado por polímeros nas propriedades de misturas asfálticas. Nestas pesquisas, realizadas em misturas asfálticas a quente, verifica-se que estes polímeros resultaram em melhoria de desempenho em várias propriedades, tais como: (i) sensibilidade térmica (TAYFUR *et al.*, 2007; GORKEM e SENGOZ, 2009; ALATAS e YILMAZ, 2013), (ii) Estabilidade e Fluência *Marshall* (AMARAL, 2000; AHMEDZADE *et al.*, 2007; AL-HADIDY e YI-QIU, 2009; AWWAD e SHBEEB, 2007; HINISLIOGLU e AGAR, 2004; SENGOZ e ISIKYAKAR, 2008; SENGUL *et al.*, 2013; TAPKIN, 2008), (iii) Resistência à Tração por Compressão Diametral (RT) e Módulo de Resiliência (MR) (ATTAELMANAN *et al.*, 2011; SANTOS, 2005), (iv) resistência à fadiga (MORILHA JR., 2004; TINAJEROS, 2016a; GUPTA e VEERARAGAVAN, 2009; WU *et al.*, 2008) e (v) deformação permanente por trilha de roda (BERTOLLO, 2002; KUMAR *et al.*, 2006; BROVELLI *et al.*, 2015; TAYFUR *et al.*, 2007).

Adicionalmente aos ligantes asfálticos modificados, outra alternativa técnica para combater os mecanismos de deterioração atuantes nas rodovias, visando o aumento de sua vida útil, é a inserção de grelhas de reforço no interior da camada asfáltica (BÜHLER, 2007). Juntamente com o aumento da vida útil do pavimento, algumas pesquisas analisaram a contribuição do elemento de reforço para a capacidade estrutural do revestimento asfáltico a quente (CORREIA e ZORNBERG, 2015; SOBHAN *et al.*, 2005; KHODAII e FALLAH, 2009; HOSSEINI *et al.*, 2009; CORREIA, 2014; SIRIWARDANE *et al.*, 2010; BASTOS *et al.*, 2015).

Segundo Batista (2004), há uma carência de conhecimento sobre as misturas asfálticas usinadas à frio, principalmente quanto aos seus desempenho e comportamento mecânicos. Igualmente raras são as pesquisas que avaliam o efeito combinado do ligante asfáltico modificado e do reforço geossintético nas propriedades de engenharia dessas misturas. Neste contexto, tendo em vista os benefícios observados pela utilização de ligantes asfálticos modificados e pela incorporação de geossintéticos nas pesquisas sobre misturas asfálticas a quente, além da oportunidade de contribuir técnico-cientificamente para um campo ainda pouco explorado, o presente trabalho teve como objetivo avaliar o comportamento mecânico, em termos de Estabilidade e Fluência *Marshall*, Resistência à Tração por Compressão Diametral, Módulo de Resiliência e Vida de Fadiga, de misturas asfálticas do tipo pré-misturado a frio denso (PMFD) produzidas com emulsões asfálticas convencional e modificada, com e sem reforço geossintético.

4.2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais e os métodos utilizados, a fim de atingir os objetivos da pesquisa,

são apresentados a seguir.

4.2.1. Materiais

Para a realização dos ensaios de laboratório, foram utilizados os seguintes agregados: brita 0, brita 1 e pó de pedra, de origem gnáissica. Esses agregados foram provenientes da pedreira Ervália, localizada no município de Ervália, situado na Zona da Mata Norte do estado de Minas Gerais (MG), Brasil. A faixa granulométrica adotada neste trabalho foi a “D” da especificação de serviço ES 153 (DNIT, 2010a). Os ligantes asfálticos utilizados neste trabalho foram a emulsão asfáltica catiônica convencional do tipo RL-1C e a emulsão asfáltica modificada EMULEX RL-1C, ambas oriundas da empresa Stratura Asfaltos S/A, localizada na cidade de Betim - MG. O material dopante utilizado no trabalho foi o BETUDOPE MASTER, também oriundo da empresa Stratura Asfaltos S/A. O reforço geossintético incorporado na mistura asfáltica foi a geogrelha HaTelit® G50, fornecida pela empresa HUESKER.

4.2.2. Métodos

Os métodos utilizados na execução deste trabalho comportam sete etapas, cujas particularidades se encontram descritas a seguir:

Etapa 1 – Caracterização das propriedades físicas dos agregados e do ligante asfáltico. Na Tabela 4.1, identificam-se os ensaios realizados sobre os materiais empregados nesse programa experimental de pesquisa, com correspondente indicação da norma adotada.

Tabela 4.1 - Ensaios realizados para a caracterização dos materiais empregados no programa experimental de pesquisa e respectivas normas

Agregado graúdo	Material Agregado miúdo	Ligante asfáltico
Análise granulométrica -ME 083 (DNER, 1998a)	Análise granulométrica - ME 083 (DNER, 1998a)	Massa específica e densidade relativa - ME 193 (DNER, 1996)
Abrasão Los Angeles - ME 035 (DNER, 1998b)	Massa específica -ME 194 (DNER, 1998d)	Peneiração - NBR 14393 (ABNT, 2012a)
Absorção e densidade - ME 081 (DNER, 1998c)	Equivalente de areia – ME 054 (DNER, 1997)	Carga de partícula – ME 156 (DNIT, 2011)
Adesividade ao ligante betuminoso - ME 078 (DNER, 1994b)		pH da emulsão alifática – NBR 6299 (ABNT, 2012b)
Índice de forma - ME 086 (DNER, 1994c)		

Etapa 2 – Composição granulométrica de projeto. A partir dos resultados obtidos da caracterização granulométrica dos agregados realizada na *Etapa 1*, foi composta uma mistura de agregados, por meio de tentativas, que se adéqua à faixa “D” das especificações de serviço ES 153 (DNIT, 2010a) e ES 390 (DNER, 1999).

Etapa 3 – Determinação do teor de ligante inicial. Através da formulação proposta por Duriez (1954, *apud* SANTANA 1992, p. 123-125), calculou-se o teor de ligante asfáltico residual, ou seja, a quantidade de asfalto efetivo presente na mistura asfáltica, para a mistura de agregados composta na *Etapa 2*. A fórmula utilizada, adaptada de Duriez (1954, *apud* SANTANA 1992, p. 124), para o cálculo do teor de ligante residual é descrita a seguir:

$$p=k \times S^{0,2} \quad (4.16)$$

em que:

p: porcentagem de ligante asfáltico residual, em relação ao peso total dos agregados;

S: superfície específica do agregado (m^2/kg);

k: coeficiente denominado módulo de riqueza.

Etapa 4 – Determinação do teor de umidade de molhagem e do teor de umidade de compactação. Foram buscados, na literatura técnica (TUCHUMANTEL JR., 1990; CLERMAN, 2004; MAMLOUK *et al.*, 1980; QUIMI-KAO, 1993), valores usuais referentes ao teor de umidade de molhagem. Após a escolha do teor de umidade de molhagem e de posse do teor de emulsão asfáltica inicial obtido na *Etapa 3*, determinou-se, por meio de valores de Estabilidade *Marshall*, de acordo com o método de ensaio ME 107 (DNER, 1994a), o teor de umidade, em relação à massa de agregados, que foi utilizado para a compactação das misturas asfálticas.

Etapa 5 – Dosagem Marshall. Realizou-se a dosagem *Marshall* em misturas asfálticas do tipo PMFD e obteve-se o teor de ligante de projeto. Para a realização da dosagem, manteve-se constante o teor de umidade de compactação obtido na *Etapa 4*. Foram analisados 5 traços em peso de emulsão asfáltica: 6,0%; 6,5%; 7,0%; 7,5%; 8,0%. Para atingir o teor de umidade de compactação estipulado, a cura das misturas foi feita à temperatura ambiente, com um fluxo de ar contínuo e, eventualmente, com revolvimento das misturas, visando aumentar a exposição da parte úmida das mesmas ao referido fluxo. O tempo de cura variou para cada traço de emulsão asfáltica, mas sem exceder o tempo máximo de 60 minutos estipulado pelo método de ensaio ME 107 (DNER, 1994a).

Seguindo o método de ensaio ME 107 (DNER, 1994a), para cada traço, foram produzidos, no mínimo, três corpos de prova de massa aproximadamente igual a 1200g. Cada corpo de prova (CP) foi compactado com 75 golpes em cada uma de suas faces. A densidade aparente foi determinada seguindo o método de ensaio ME 117 (DNER, 1994d). Os parâmetros abordados na dosagem *Marshall* são apresentados na Tabela 4.2,

junto com suas respectivas equações.

Tabela 4.2 - Parâmetros e equações empregadas na dosagem *Marshall*

Densidade máxima teórica (DMT)	$DMT = \frac{100}{\left(\frac{\%_{ag}}{d_{ag}} + \frac{\%_{am}}{d_{am}} + \frac{\%_f}{d_f} + \frac{\%_{CAP}}{d_{CAP}} \right)}$	(4.17)
Porcentagem de vazios na mistura (V _v)	$V_v = \left(\frac{DMT - d}{DMT} \right) \times 100$	(4.18)
Porcentagem de vazios no agregado mineral (VAM)	$VAM = \left(\frac{DMT - d}{DMT} \right) \times 100 + \frac{d \times \%_{CAP}}{d_{CAP}}$	(4.19)
Relação betume-vazios (RBV)	$RBV = \frac{\%V_b}{VAM}$	(4.20)
Estabilidade <i>Marshall</i> (E)	$E = F \times f_c$	(4.21)

Em que: d – massa específica aparente da mistura; %_{ag}, %_{am}, %_f e %_{CAP} – porcentagens de agregado graúdo, agregado miúdo, filer e de cimento asfáltico de petróleo, respectivamente; d_{ag}, d_{am}, d_f e d_{CAP} – massas específicas reais dos grãos de agregado graúdo, agregado miúdo, filer e de cimento asfáltico de petróleo, respectivamente; V_b – volume de betume na mistura; F – força de ruptura do CP; f_c – fator de correção em função da altura média do CP.

Etapa 6 – Produção dos corpos de prova para a análise das propriedades mecânicas. Utilizando o teor de ligante de projeto, produziram-se corpos de prova (CP) sem e com a inclusão do elemento de reforço geossintético. Fez-se a incorporação da geogrelha na posição intermediária dos corpos de prova. Os corpos de prova que não continham o geossintético foram compactados conforme explicitado na *Etapa 5*, porém, para que o elemento de reforço fosse posicionado de forma correta, garantindo que sua posição se encontrasse no meio do corpo de prova, a metodologia adotada foi a descrita no subitem “3.2.2. Métodos” desse trabalho.

Etapa 7 – Determinação das propriedades mecânicas. As propriedades mecânicas analisadas nessa pesquisa e suas respectivas normas estão descritas na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Ensaio de determinação das propriedades mecânicas das misturas asfálticas e respectivas normas

Determinação da Estabilidade e Fluência <i>Marshall</i>	ME107 (DNER, 1994a)
Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral	ME 136 (DNIT, 2010b)
Determinação do Módulo de Resiliência	ME 135 (DNIT, 2010c)

Os ensaios de determinação das propriedades mecânicas foram realizados sob a temperatura controlada de 25°C, salientando-se que os ensaios dinâmicos (Módulo de Resiliência e vida de fadiga) foram realizados no Laboratório de Pavimentação da Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), em Juiz de Fora (MG).

A descrição do procedimento do ensaio de vida de fadiga, assim como do equipamento, segue os procedimentos internos do Laboratório de Pavimentação da Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF) e estão descritos em Marques (2004). O ensaio foi feito por compressão diametral à tensão controlada, sendo a carga aplicada através de um equipamento pneumático, a uma frequência de 1Hz (60 ciclos por minuto), com tempo de carregamento de 0,1 segundo e 0,9 segundo de descarregamento. Quatro níveis de tensão foram escolhidos: 15%, 25%, 35% e 40% do valor da carga que resultaria na resistência à tração da amostra (RT). Para que se atingisse cada nível de tensão aplicado, foi necessário aplicar uma carga (F), obtida através da equação (3.13):

$$F = \frac{\pi \times D \times H}{2} \times (\%RT) \quad (4.22)$$

em que:

F: carga aplicada para atingir o nível de tensão;

D: diâmetro do corpo de prova;

H: altura do corpo de prova;

%RT: nível de tensão aplicado.

A vida de fadiga foi expressa pelo número N de solicitações necessárias para o fim do ensaio, relacionando a diferença de tensões no centro da amostra ($\Delta\sigma$) por modelos do tipo log-log, dados pela equação (3.14).

$$N = k_1 \times \left(\frac{1}{\Delta\sigma} \right)^{n_1} \quad (4.23)$$

em que:

N: número de repetições de carga necessárias à ruptura do corpo de prova (vida de fadiga);

$\Delta\sigma$: diferença entre as tensões de compressão (σ_c) e de tração (σ_t) no centro do corpo de prova, expressa pela equação (3.15);

k_1 e n_1 : parâmetros experimentais.

$$\Delta\sigma = \sigma_c - \sigma_t = 3 \times \sigma_t - (-\sigma_t) = 4 \times \sigma_t = \frac{8 \times F}{\pi \times D \times H} \quad (4.24)$$

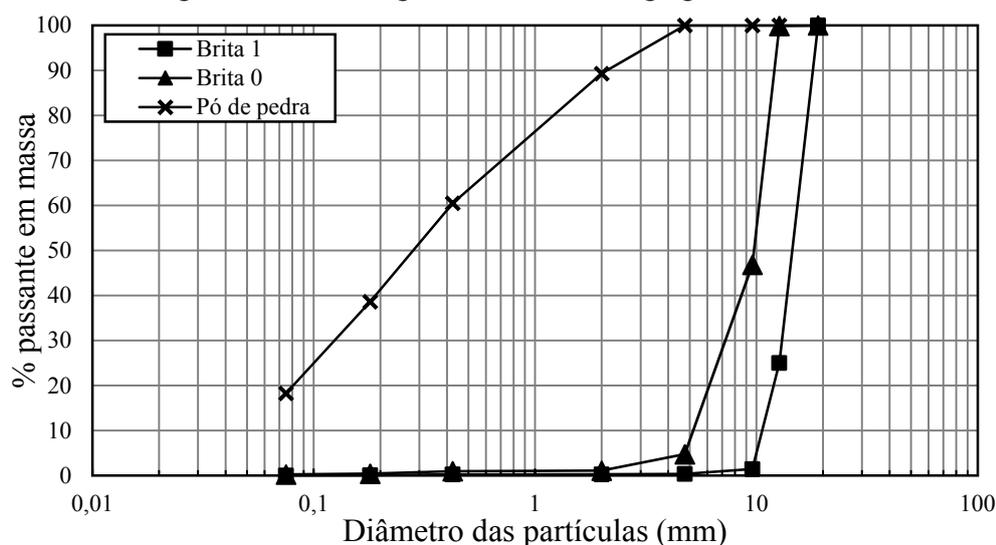
4.3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Etapa 1 – Caracterização das propriedades físicas dos agregados e do ligante asfáltico. Os resultados obtidos nos ensaios de caracterização dos agregados são apresentados na Tabela 4.4. A análise granulométrica dos agregados minerais é ilustrada na Figura 4.1.

Tabela 4.4 - Resultados de caracterização física dos agregados minerais

Propriedades analisadas	Material		
	Brita 1	Brita 0	Pó de pedra
Massa específica (g/cm ³)	2,817	2,796	2,825
Absorção (%)	0,65	0,68	-
Índice de forma	-	0,9	-
Abrasão <i>Los Angeles</i> (%)	-	43	-
Equivalente de areia (%)	-	-	59

Figura 4.1 - Análise granulométrica dos agregados minerais



O índice de forma encontrado para o agregado é satisfatório, diferentemente do valor encontrado para a abrasão Los Angeles, que supera 40%, o máximo estabelecido nas especificações de serviço ES 153 (DNIT, 2010a) e ES 390 (DNER, 1999), provavelmente em decorrência de sua natureza gnáissica. Porém, salienta-se que a referida especificação permite a utilização do agregado caso o mesmo já tenha sido utilizado anteriormente e apresentado um desempenho satisfatório. Na região de Viçosa – MG, os agregados provenientes da jazida da Pedreira Ervália são largamente empregados em obras de engenharia, tanto na construção civil quanto na pavimentação. Dessa forma, o estudo de misturas asfálticas compostas por esse material é importante para o desenvolvimento técnico-científico regional. Também foi observado em Tinajeros *et al.* (2016b) e Silva *et al.* (2016), pesquisas nas quais utilizaram o mesmo agregado (mesma coleta de amostra), que os resultados obtidos foram satisfatórios. Portanto, mesmo com o valor obtido de abrasão Los Angeles superior ao máximo estabelecido nas especificações de serviço ES 153 (DNIT, 2010a) e ES 390 (DNER, 1999), foi dada a continuidade da pesquisa com a utilização desse material.

O resultado obtido no ensaio de equivalente de areia está de acordo com as especificações de serviço ES 153 (DNIT, 2010a) e ES 390 (DNER, 1999), as quais

exigem um valor superior à 55% para o resultado do referido ensaio.

A adesividade ao ligante asfáltico convencional mostrou-se insatisfatória, havendo, portanto, a necessidade de se utilizar um material dopante. A deficiência apresentada na adesividade ao ligante asfáltico pode ser explicada pela origem gnáissica dos agregados. Utilizou-se 0,1% em massa de BETUDOPE MASTER em relação à massa de emulsão asfáltica e procedeu-se a análise da adesividade ao ligante asfáltico, sendo o resultado encontrado satisfatório. Porém, quando feita a análise de adesividade ao ligante asfáltico para o ligante modificado (EMULEX), o resultado foi satisfatório. Portanto, verificou-se a melhoria de adesividade ao agregado mineral para a emulsão asfáltica modificada.

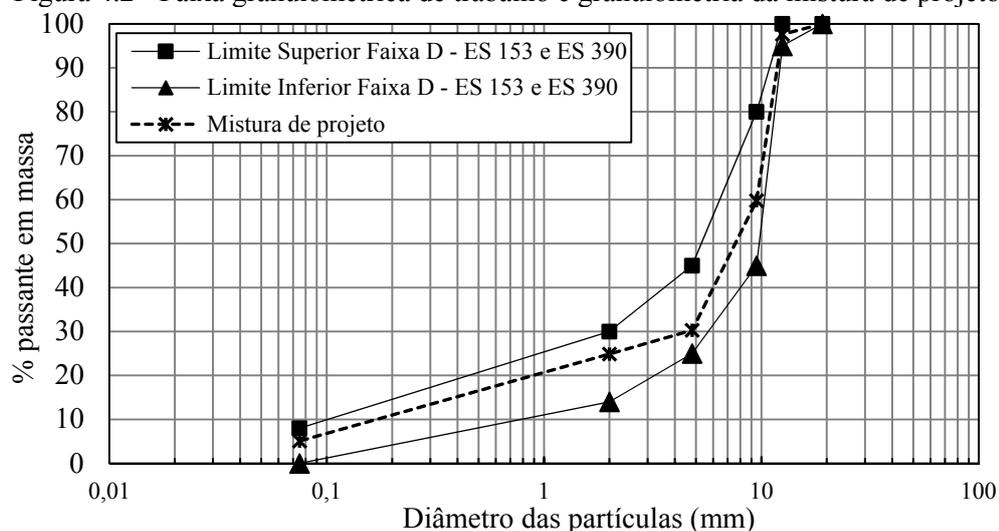
Os resultados da caracterização física dos ligantes asfálticos convencional e modificado utilizados são apresentados na Tabela 4.5, constatando-se a sua conformidade com as especificações de material EM 165 (DNIT, 2013) e EM 128 (DNIT, 2010d), respectivamente.

Tabela 4.5 - Resultados de caracterização física dos ligantes asfálticos

Propriedades analisadas	Material	
	RL-1C	EMULEX RL-1C
Densidade	1,03	1,03
pH da emulsão asfáltica	3,09	3,65
Carga de partículas	Carga positiva	Carga positiva
Peneiração da emulsão asfáltica (%)	0,01	0,00

Etapa 2 – Composição granulométrica de projeto. A Figura 4.2 ilustra os limites superior e inferior da faixa “D” [ES 153 (DNIT, 2010a) e ES 390 (DNER, 1999)] e a mistura de agregados (mistura de projeto) utilizada nesta pesquisa.

Figura 4.2 - Faixa granulométrica de trabalho e granulometria da mistura de projeto



A faixa granulométrica selecionada para o estudo foi a “D”, destinada à camada de rolamento, segundo a especificação ES 153 (DNIT, 2010a). A mistura de agregados foi composta por 3% de brita 1, 70% de brita 0 e 27% de pó de pedra.

Etapa 3 – Determinação do teor de ligante inicial. Os resultados obtidos nessa etapa e sua respectiva discussão encontram-se descritas no item “2.3. RESULTADOS” desse trabalho. Ademais, para o presente trabalho, admitiu-se um intervalo de teor de emulsão asfáltica inicial, em relação ao peso total da mistura (%EA), de: $6,71\% < \%EA < 9,31\%$.

Etapa 4 – Determinação do teor de umidade de molhagem e do teor de umidade de compactação. As misturas asfálticas, utilizando os ligantes asfálticos convencional e modificado, apresentaram resultados semelhantes para os teores de umidade de molhagem e de compactação. Para ambas misturas, admitiu-se o teor de umidade de molhagem e o teor de umidade de compactação de, respectivamente, 2,5% e 4,41% em massa e em relação à massa de agregados minerais. Esses resultados, com suas respectivas discussões para a mistura asfáltica convencional, estão descritas no item “2.3. RESULTADOS” desse estudo.

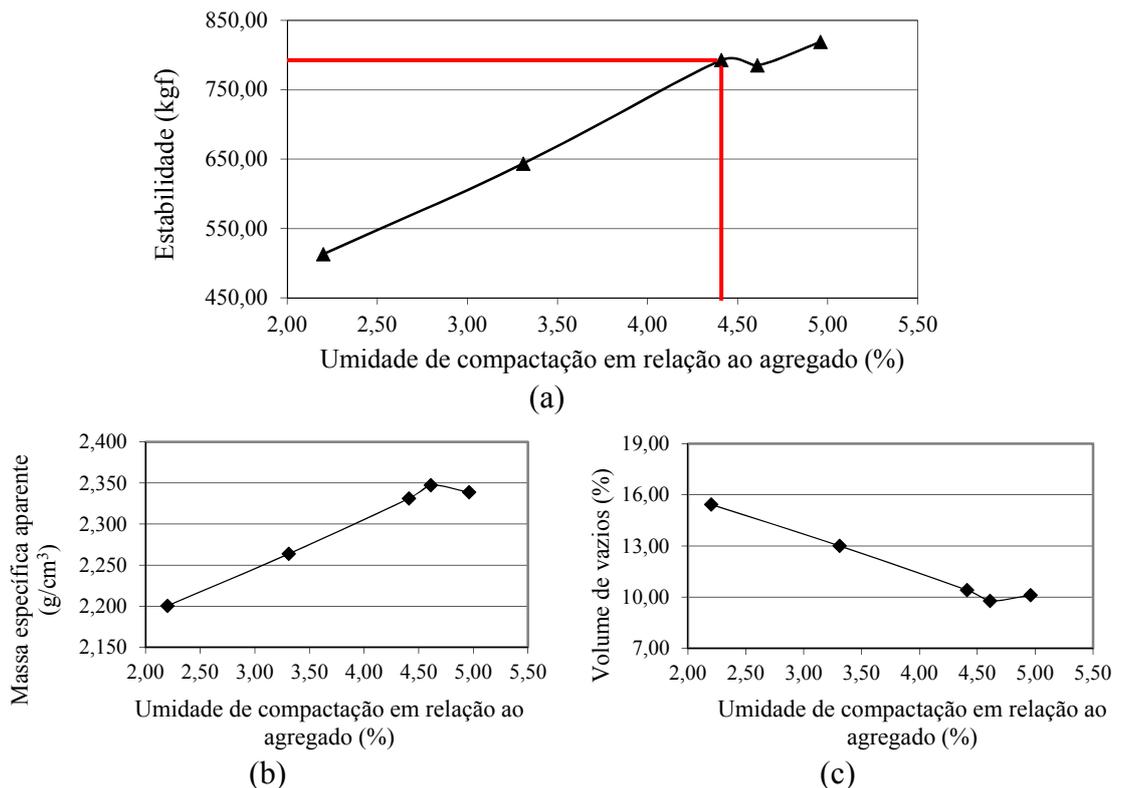
Para a mistura asfáltica com emulsão modificada, analisou-se, a princípio, o teor de umidade de molhagem de 2,5% em uma mistura com o teor de 7,0% de emulsão asfáltica, em termos de trabalhabilidade e recobrimento dos grãos. Como o resultado foi satisfatório, prosseguiu-se para a análise do teor de umidade de compactação, utilizando-se o teor de umidade de molhagem de 2,5%. O teor de emulsão asfáltica escolhido foi de 7,0%, o mesmo teor escolhido para a análise da mistura convencional.

Foram produzidos, a princípio, quatro teores de umidade de compactação: 40%, 60%, 80% e 90% da umidade total da mistura (ht). Esses teores correspondem, respectivamente, a 2,20%, 3,31%, 4,41% e 4,96% em relação ao peso dos agregados secos. Para o teor de umidade de compactação de 90% (4,96% em relação ao peso dos agregados secos), observou-se um aumento da Estabilidade *Marshall* da massa asfáltica seca, porém, no ato da compactação, a mistura asfáltica apresentou exsudação (Figura 4.3a) e inadequada consistência (Figura 4.3b), justificando a adoção de um quinto teor de umidade de compactação de 85% da umidade total da mistura (4,61% em relação ao peso dos agregados secos), para o qual a exsudação e a inconsistência física foram eliminadas. A Figura 4.4 mostra os valores de Estabilidade *Marshall*, massa específica aparente e volume de vazios encontrados na análise do teor de umidade de compactação.

Figura 4.3 - (a) Exsudação do material betuminoso na base do molde no momento da compactação; (b) aspecto do corpo de prova após a compactação



Figura 4.4 – (a) Valores de Estabilidade Marshall, (b) massa específica aparente e (c) volume de vazios resultantes da análise de umidade de compactação da mistura asfáltica com emulsão asfáltica modificada



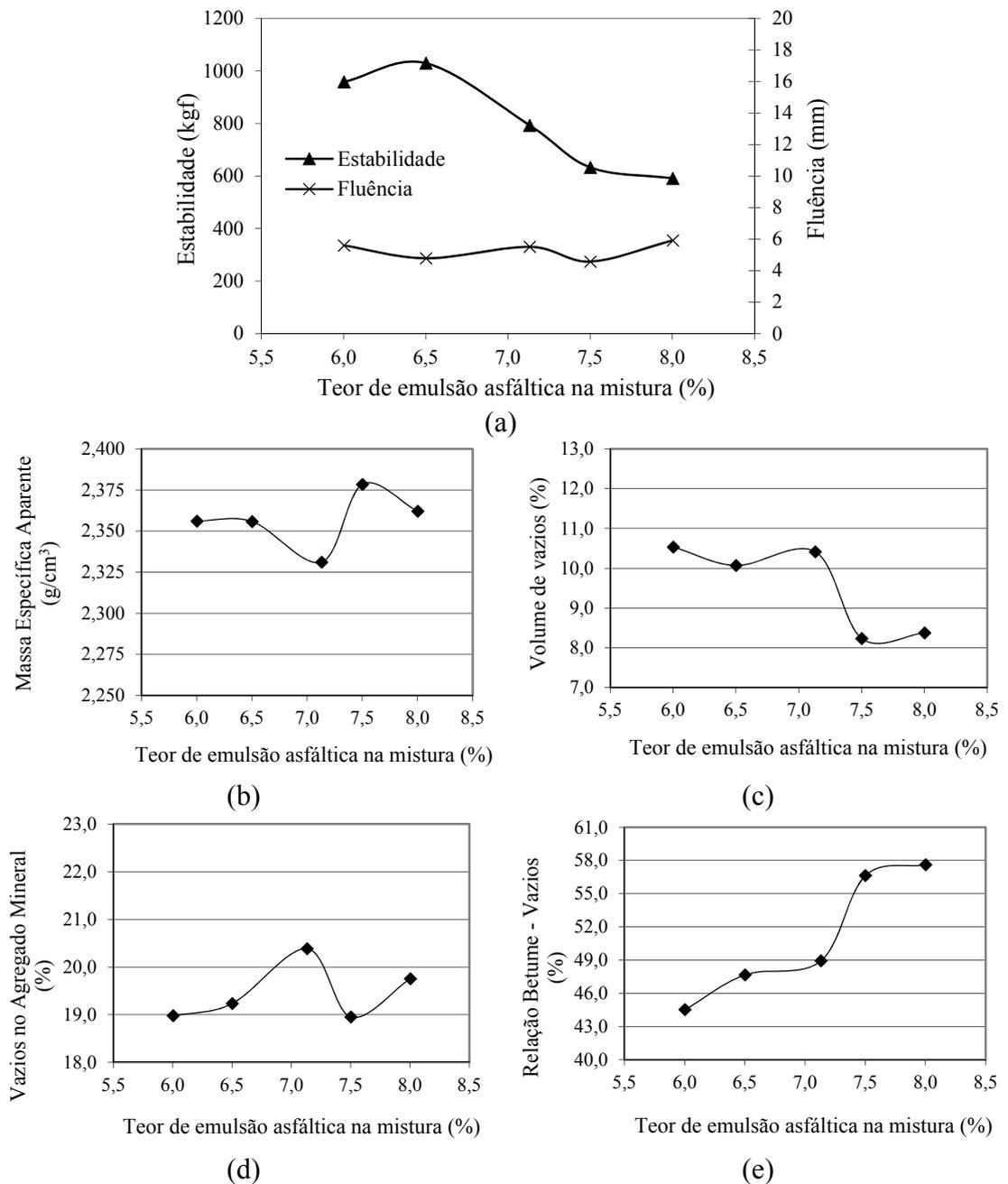
A partir dos resultados de Estabilidade *Marshall* e das condições observadas na compactação, adotou-se o teor de umidade de compactação de 4,41% em relação ao peso seco de agregados.

Etapa 5 – Dosagem Marshall. Após o processo de dosagem da mistura asfáltica convencional, obteve-se uma mistura asfáltica de projeto com o teor de emulsão asfáltica

de 7,0%, apresentando valores de volume de vazios (Vv), Estabilidade *Marshall* e Fluência *Marshall*, respectivamente, iguais a 11,9%, 777,9kgf e 5,3mm. Esses resultados, com suas respectivas discussões para a mistura asfáltica convencional, estão descritos no item “2.3. RESULTADOS” desse trabalho.

Na Figura 4.5 encontra-se os parâmetros da dosagem da mistura asfáltica com emulsão modificada.

Figura 4.5 - Parâmetros da Dosagem *Marshall* da mistura com controle de umidade de compactação, em relação ao teor de emulsão asfáltica modificada: (a) Estabilidade e Fluência *Marshall*; (b) Massa Específica Aparente; (c) Volume de vazios; (d) Vazios no Agregado Mineral; e (e) Relação Betume - Vazios



Em posse dos parâmetros da dosagem dessa mistura, admitiu-se que o teor de

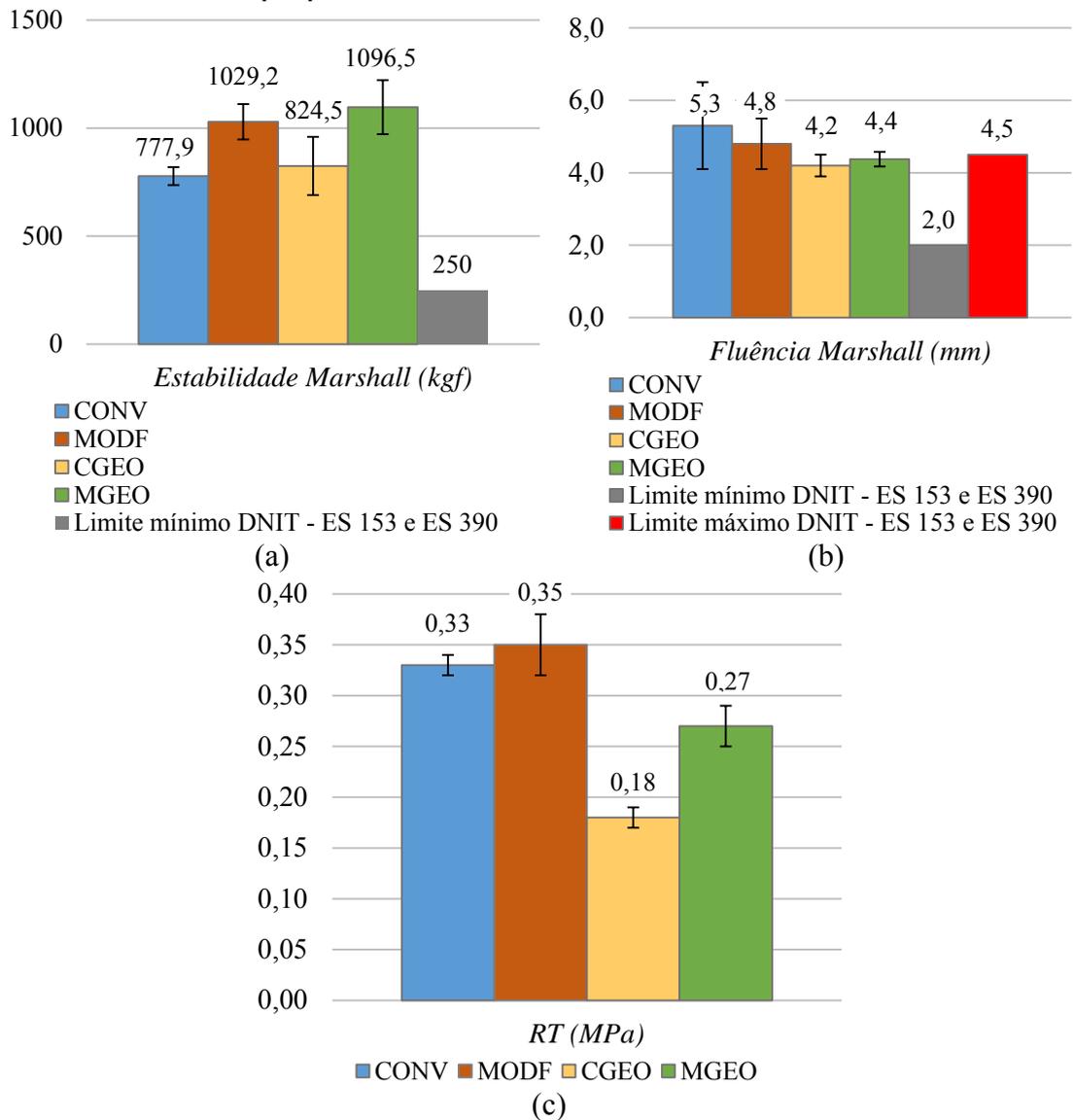
emulsão asfáltica de projeto foi de 6,5%, para o qual a mistura compactada apresentou valores de Vv, Estabilidade *Marshall* e Fluência *Marshall*, respectivamente, iguais a 10,1%, 1029,2 kgf e 4,8 mm. Tendo em vista os resultados obtidos, pode-se notar que os valores de Vv e Estabilidade *Marshall* atendem às especificações de serviço ES 153 (DNIT, 2010a) e ES 390 (DNER, 1999), porém o valor de Fluência não. Como a propriedade Fluência *Marshall* está em desuso para análises de misturas asfálticas, foi mantida a escolha da mistura de projeto.

A partir da análise das dosagens das misturas com ligantes asfálticos convencional e modificado, pode-se observar que houve uma redução no teor de emulsão asfáltica na mistura de projeto (7,0% para a mistura com emulsão asfáltica convencional, 6,5% para a mistura com emulsão asfáltica modificada). Outro aspecto a se observar foi que a mistura ficou mais compacta com a aplicação da emulsão asfáltica modificada, visto que o volume de vazios caiu de 11,9% para 10,1%. Por fim, a Estabilidade *Marshall* aumentou e a Fluência diminuiu (os valores passaram de 777,9 kgf e 5,3 mm, para 1029,2 kgf e 4,8 mm, respectivamente). Esses resultados indicam que a mistura de projeto com emulsão asfáltica modificada se apresentou mais compacta, mais rígida (menos deformável) e mais resistente à aplicação de carga contínua do que a mistura de projeto com emulsão asfáltica convencional.

Etapa 6 – Produção dos corpos de prova para a análise das propriedades mecânicas. Seguindo o procedimento descrito no subitem “4.2.2. Métodos”, os corpos de prova da mistura asfáltica com emulsão asfáltica convencional foram confeccionados utilizando um teor de emulsão asfáltica de 7,0%, em relação à massa total da mistura, e os corpos de prova da mistura asfáltica com emulsão asfáltica modificada foram confeccionados utilizando um teor de emulsão asfáltica de 6,5%, em relação à massa total da mistura, para os casos com e sem reforço geossintético. Para uma melhor identificação, o código utilizado para os corpos de prova da mistura com emulsão convencional foi “COVN”, para a mistura com emulsão convencional contendo a geogrelha foi “CGEO”, para a mistura com emulsão modificada foi “MODF” e para a mistura com emulsão modificada contendo a geogrelha foi “MGEO”.

Etapa 7 – Determinação das propriedades mecânicas. A Figura 4.6 apresenta a comparação dos valores obtidos nos ensaios *Marshall* e de Resistência à Tração por Compressão Diametral (RT), com seus respectivos desvios-padrão.

Figura 4.6 – Resultados obtidos para as propriedades mecânicas Estabilidade *Marshall* (a), Fluência *Marshall* (b) e Resistência à Tração por Compressão Diametral (RT) (c) das misturas asfálticas a frio densas pesquisadas



Foi observado que a utilização da emulsão modificada, EMULEX RL-1C, trouxe melhorias no desempenho da mistura asfáltica, em termos de Estabilidade e Fluência *Marshall*. Ademais, nota-se que a incorporação da geogrelha também resultou na melhoria do desempenho das misturas asfálticas quanto a essas propriedades, uma vez que houve aumentos nos valores de Estabilidade e reduções nos valores de Fluência. Os valores de Estabilidade estão em conformidade com o valor mínimo estabelecido pelas especificações de serviço ES 153 (DNIT, 2010a) e ES 390 (DNER, 1999), de 250 kgf. Já para a Fluência *Marshall*, somente com a incorporação do reforço é que a mistura apresentou valor dentro do intervalo de 2,0 a 4,5mm estabelecido pelas especificações de serviço ES 153 (DNIT, 2010a) e ES 390 (DNER, 1999). Dessa forma, para o ensaio *Marshall*, esses resultados mostraram que tanto a modificação do ligante asfáltico quanto a incorporação do reforço geossintético foram capazes de produzir melhorias na

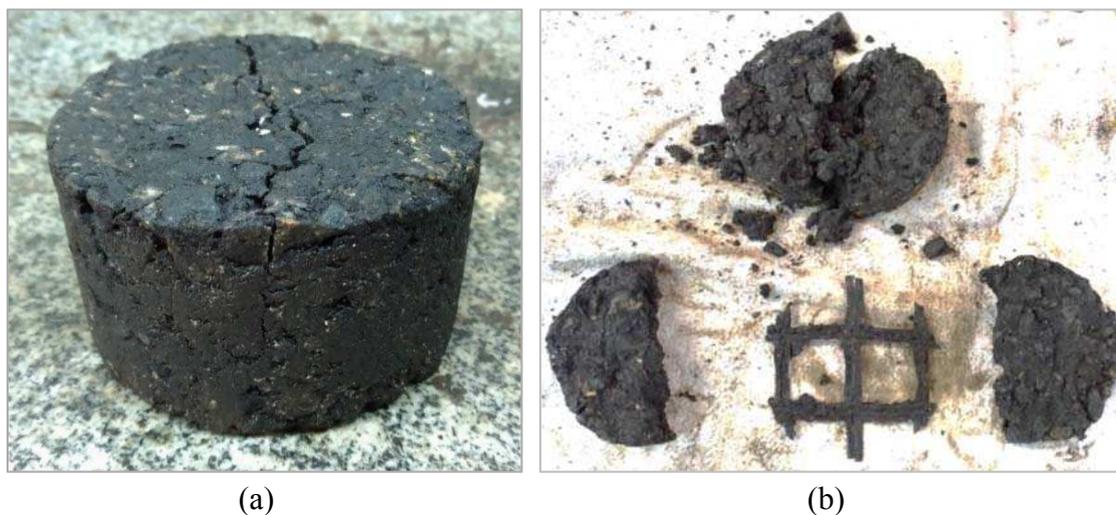
estabilidade e fluência da mistura asfáltica do tipo pré-misturado a frio denso (PMFD), ou seja, produziu um aumento na habilidade da mistura asfáltica em resistir à deformação permanente provocada por um carregamento externo.

Tendo em vista os resultados obtidos através do ensaio de resistência à tração por compressão diametral (RT), notou-se que, no caso onde há o elemento geossintético na mistura (CGEO e MGEO), houve um ganho de resistência com a substituição da emulsão asfáltica convencional pela modificada. Entretanto, analisando exclusivamente as misturas asfálticas sem a incorporação da geogrelha (CONV e MODF), a substituição do ligante asfáltico não implicou em alteração significativa dessa propriedade. Comparando-se as misturas asfálticas pesquisadas, nota-se que há uma queda dessa resistência em decorrência da inserção do elemento geossintético, tanto para as misturas com emulsão convencional como para aquelas com emulsão modificada. Conforme discutido no item “3.3. RESULTADOS” desse trabalho, esse fato deve-se, provavelmente, a dois motivos principais: (i) a mobilização ineficiente do reforço geossintético e (ii) a deficiência de aderência na interface mistura asfáltica – geogrelha.

Segundo discutido no item “3.3. RESULTADOS” desse trabalho, no ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral, as tensões internas induzidas pelo carregamento externo abrangem um pequeno volume do corpo de prova, restringindo a extensão das deformações necessárias para mobilizar a capacidade resistente do reforço geossintético. Os autores também ressaltam que a posição relativa do reforço no interior do corpo de prova pode ser um fator pelo qual a mobilização da geogrelha pode ser ineficiente.

A Figura 4.7a mostra o corpo de prova da mistura reforçada “MGEO” após o ensaio de resistência à tração. Salienta-se que não foi possível exumá-lo, separando seus elementos componentes básicos (reforço e massa asfáltica) sem a utilização de nenhuma ferramenta, diferentemente do que foi feito com o corpo de prova da mistura reforçada “CGEO” (Figura 4.7b) cujos componentes foram mais facilmente dissociados na exumação. A Figura 4.7b ilustra a facilidade de separar o elemento geossintético da mistura asfáltica convencional, facilidade essa não verificada ao se utilizar o ligante asfáltico modificado na mistura asfáltica. Assim, a mudança do tipo de emulsão pode ter influenciado favoravelmente as propriedades de aderência do sistema mistura asfáltica – geogrelha, melhorando, assim, o comportamento mecânico da mistura asfáltica reforçada em termos de resistência à tração (RT) comparativamente à mesma propriedade da mistura asfáltica reforçada constituída por ligante asfáltico convencional.

Figura 4.7 - Corpo de prova da mistura “MGEO” após a realização do ensaio de resistência à tração por compressão diametral (a) e corpo de prova da mistura “CGEO” após separação manual do elemento de reforço (b)



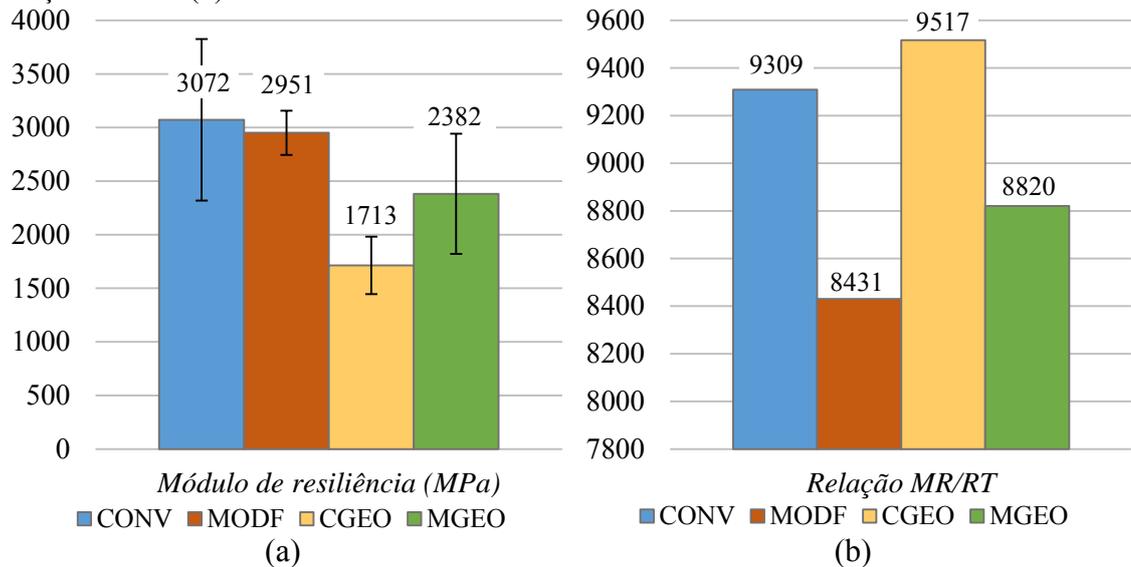
É importante que se destaquem aqui as razões pelas quais a coesão da mistura asfáltica aparentemente não influenciou nesse comportamento diferenciado previamente discutido. Sabe-se que coesão e aderência são propriedades essencialmente distintas, sendo que a primeira diz respeito à contribuição da componente “mistura asfáltica compactada” para a resistência às solicitações e, a segunda, à contribuição da interação mistura asfáltica – reforço (geogrelha, nessa pesquisa) para a resistência às mesmas solicitações. Na presente pesquisa, foi observado que não houve incremento da coesão por conta do tipo de ligante, pois não houve aumento significativo no parâmetro de resistência à tração (RT) quando se compara as respectivas misturas não reforçadas (CONV e MODF). Em compensação, constata-se experimentalmente que o ligante modificado melhorou a aderência da mistura asfáltica com a geogrelha, pois foi observado um aumento significativo da resistência à tração quando alterado o tipo de ligante asfáltico nas misturas reforçadas.

É possível constatar que a mobilização da contribuição da componente de coesão interna da mistura asfáltica ao aumento da resistência proporcionada pela emulsão asfáltica modificada, nas duas classes de mistura (reforçada e não reforçada), mostra-se dependente da natureza do esforço solicitante característico do ensaio, visto que, nos ensaios compressivos (Estabilidade e Fluência *Marshall*), essa mobilização mostrou-se mais evidente que nos ensaios de tração estática (RT).

A Figura 4.8 apresenta os resultados dos ensaios para determinação do Módulo de Resiliência (MR) das misturas asfálticas convencional e reforçada, contendo também a relação MR/RT. Em relação ao valor de MR, quando se analisa somente a influência do tipo de ligante asfáltico, ou seja, analisando-se as misturas asfálticas sem a incorporação

da geogrelha, pode-se observar que houve uma alteração não significativa na magnitude dessa propriedade, similarmente ao que foi constatado para a RT dessas misturas. No entanto, para as misturas reforçadas, os resultados obtidos mostram que houve uma melhora no desempenho da mistura asfáltica reforçada quando se utilizou a emulsão asfáltica modificada.

Figura 4.8 - Resultados obtidos para as propriedades mecânicas Módulo de Resiliência (a) e relação MR/RT (b)



Considerando-se que a configuração do ensaio de Módulo Resiliente é similar ao de determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral, diferenciando-se essencialmente quanto à natureza da carga externa aplicada (dinâmica e estática, respectivamente), o comportamento das misturas asfálticas para ambos os ensaios tende a ser similar, o que permite reforçar as suposições apresentadas anteriormente para o ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral. Novamente observa-se que a coesão, propriedade relacionada à mistura asfáltica, não foi significativamente alterada, visto que os valores de RT e MR, para misturas não reforçadas, não apresentaram diferenças significativas. Assim, conclui-se que a melhoria do desempenho das misturas reforçadas, observada nesses ensaios, ocorre devido à alteração do ligante asfáltico que, aparentemente, melhorou a aderência da mistura asfáltica com a geogrelha. Portanto, entende-se que, a propriedade que rege o desempenho das misturas asfálticas não reforçadas é exclusivamente a coesão, e que as propriedades que regem o desempenho das misturas reforçadas são a coesão conjuntamente com a aderência entre a mistura asfáltica e o reforço geossintético, sendo essa última mobilizada em maior magnitude quando da inclusão do ligante asfáltico modificado na mistura asfáltica. Considerando-se que a configuração do ensaio de Módulo Resiliente é similar ao de determinação da

Resistência à Tração por Compressão Diametral, diferenciando-se essencialmente quanto à natureza da carga externa aplicada (dinâmica e estática, respectivamente), o comportamento das misturas asfálticas para ambos os ensaios tende a ser similar, o que permite reforçar as suposições apresentadas anteriormente para o ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral.

Novamente observa-se que a coesão, propriedade relacionada à mistura asfáltica, não foi significativamente alterada, visto que os valores de RT e MR, para misturas não reforçadas, não apresentaram diferenças significativas. Assim, conclui-se que a melhoria do desempenho das misturas reforçadas, observada nesses ensaios, ocorre devido à alteração do ligante asfáltico que, aparentemente, melhorou a aderência da mistura asfáltica com a geogrelha. Portanto, entende-se que a propriedade que rege o desempenho das misturas asfálticas não reforçadas é exclusivamente a coesão, e que as propriedades que regem o desempenho das misturas reforçadas são a coesão conjuntamente com a aderência entre a mistura asfáltica e o reforço geossintético, sendo essa última mobilizada em maior magnitude quando da inclusão do ligante asfáltico modificado na mistura asfáltica.

Quanto ao índice MR/RT, independentemente da condição reforçada ou não da mistura asfáltica, observou-se uma redução do mesmo para as amostras contendo a emulsão asfáltica modificada, o que pode ser indicativo de que há, para as misturas com tal ligante, uma melhor compatibilização entre a resistência à tração e a rigidez do material. Bernucci *et al.* (2008) destacam que a razão MR/RT tem sido considerada na literatura técnica como um indicador da vida de fadiga de misturas asfálticas compactadas, visto que tal índice integra, simultaneamente, dados de rigidez e de resistência do material, sendo preferível, de um lado, uma menor magnitude dessa razão, devido à necessidade estrutural de se projetar camadas de revestimento asfáltico que não sejam excessivamente rígidas, visando evitar a elevada absorção de tensões que levem ao trincamento prematuro do revestimento, e, de outro lado, uma elevada resistência à tração, visto que uma maior resistência à tração na ruptura é, geralmente, também associada a uma maior resistência à fadiga. Assim, estima-se que as misturas asfálticas contendo o ligante modificado apresentem um melhor comportamento mecânico em termos de fadiga, o que precisa ser confirmado pelo ensaio de Vida de Fadiga.

A Figura 4.9 apresenta os resultados obtidos dos ensaios de Vida de Fadiga para as misturas asfálticas estudadas. A Tabela 4.6 apresenta os parâmetros dos modelos matemáticos de ajuste dos dados experimentais, obtidos através de regressão linear, para as misturas asfálticas analisadas.

Figura 4.9 - Projeção do comportamento à fadiga das misturas asfálticas pesquisadas

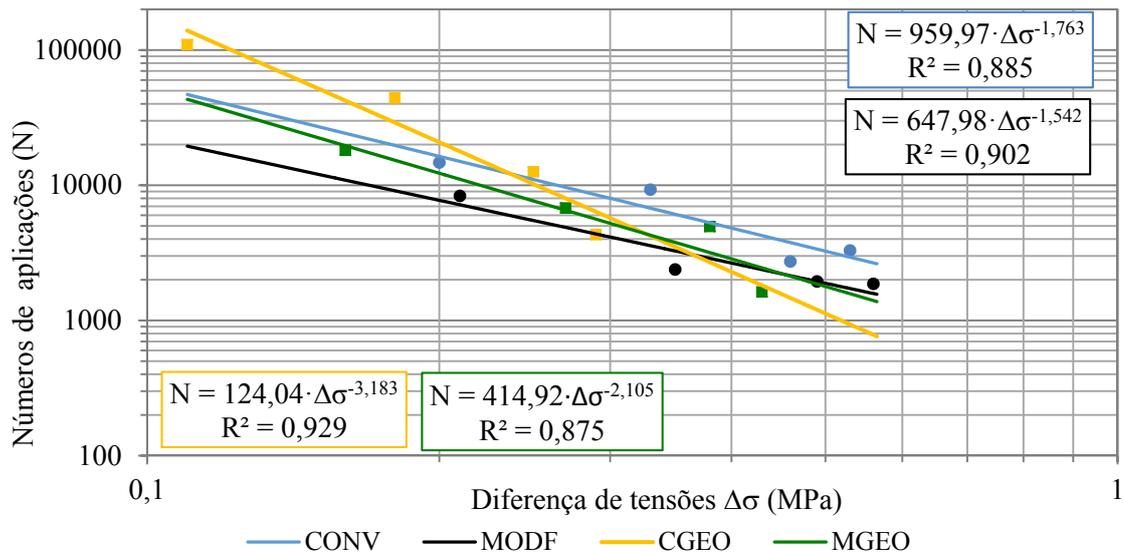


Tabela 4.6 - Parâmetros dos modelos matemáticos de ajuste dos dados experimentais derivados do ensaio de vida de fadiga

Misturas asfálticas	$N = k_i \times (1/\Delta\sigma)^{n_i}$		
	k_i	n_i	R^2
CONV	959,97	1,763	0,885
MODF	647,98	1,542	0,902
CGEO	124,04	3,183	0,929
MGEO	414,92	2,105	0,875

A partir dos gráficos e dos parâmetros fornecidos pela análise de regressão, pode-se perceber que o efeito da alteração do ligante, no caso das misturas sem o reforço geossintético, foi negativo. Apesar de observar uma redução na sensibilidade ao nível de tensão, traduzida pelo coeficiente n_i , (quanto maior a magnitude desse coeficiente, maior o decréscimo de resistência à fadiga ao aumentar o nível de tensão aplicado), a mistura contendo o ligante modificado apresentou um desempenho, em termos de ciclos de carga, inferior ao da mistura convencional. Com relação às misturas reforçadas, observa-se que a utilização do ligante modificado proporcionou um melhor desempenho, comparado à mistura convencional, traduzido pela redução da sensibilidade ao nível de tensão e por apresentar um N (número de ciclos que leva o material à ruptura) maior para os níveis mais altos de tensão aplicada.

Com a utilização da emulsão asfáltica modificada, observou-se também que as misturas, reforçadas ou não, apresentaram valores de N , para os níveis mais altos de tensão aplicada, similares. Porém, novamente houve diferenças na sensibilidade do comportamento à fadiga ao nível de tensão, visto que a mistura não reforçada apresentou um coeficiente n_i menor do que o da mistura reforçada. Para Marcon (2016), misturas que apresentam valores maiores desse parâmetro (n_i) são consideradas mais suscetíveis à

deformação de tração. Morilha Jr. (2004) sugere que quanto menor a suscetibilidade à variação de tensões, melhor o comportamento da mistura asfáltica em serviço.

Comparando os resultados da análise de Vida de Fadiga com os resultados do índice MR/RT, percebe-se que as expectativas de que as misturas que continham ligante asfáltico modificado apresentassem um melhor desempenho quanto à fadiga, visto que apresentaram uma melhor compatibilização entre a resistência à tração e a rigidez do material quando comparado às misturas asfálticas convencionais, não foram confirmadas. Essa constatação reforça ainda mais as orientações de Vasconcelos (2004), segundo as quais o parâmetro MR/RT não deve eliminar a necessidade de estudo da vida de fadiga de misturas asfálticas.

4.4. CONCLUSÃO

Nesse trabalho, propôs-se analisar e quantificar os efeitos da alteração do tipo de emulsão asfáltica (convencional e modificada) em misturas asfálticas com e sem a presença de um reforço geossintético (geogrelha). Esses efeitos foram avaliados sobre um conjunto de propriedades mecânicas de misturas asfálticas do tipo PMFD, a fim de complementar o conhecimento técnico-científico relacionado à caracterização mecânica de misturas asfálticas a frio, dada a lacuna de informações a respeito de tais misturas.

A partir dos resultados obtidos no ensaio de Estabilidade e Fluência *Marshall*, conclui-se que a alteração do ligante proporcionou uma melhoria do desempenho em ambas as misturas asfálticas, reforçadas ou não, em comparação com o desempenho apresentado pelas misturas com ligante asfáltico convencional. Nesse ensaio, de natureza compressiva, constata-se que a parcela de coesão interna foi realçada pela presença do ligante asfáltico modificado tanto nas misturas não reforçadas como nas reforçadas, salientando-se que, nessas últimas, também a parcela de aderência entre o reforço geossintético e a mistura asfáltica aparenta ter sido mobilizada por esse tipo particular de ligante.

Ao analisar o comportamento das misturas não reforçadas pesquisadas em termos de Resistência à Tração por Compressão Diametral (RT) e Módulo de Resiliência (MR), conclui-se que não houve diferenças significativas de desempenho. Quanto ao comportamento dessas misturas à fadiga, conclui-se que, ao utilizar-se o ligante asfáltico modificado, a mistura modificada apresentou um desempenho inferior ao desempenho da mistura convencional.

Em relação às misturas reforçadas, em termos de Resistência à Tração por Compressão Diametral (RT), Módulo de Resiliência (MR) e Vida de Fadiga, pode-se

concluir que a alteração do ligante convencional para o ligante modificado promoveu um melhor desempenho das misturas asfálticas quanto a essas propriedades. Essa melhoria no desempenho mecânico é reflexo da melhoria da aderência entre o reforço e a mistura asfáltica. Para os ensaios de tração por compressão diametral estático (RT) e dinâmicos (MR e Vida de Fadiga), não foi constatada a capacidade do ligante asfáltico modificado em mobilizar o efeito diferenciado da coesão interna da mistura asfáltica, tal como visto para a modalidade de ensaio compressivo (ensaio *Marshall*).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 14393**. Emulsões asfálticas - determinação da peneiração. Rio de Janeiro, 2012a. 3 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6299**. Emulsões asfálticas - determinação do pH. Rio de Janeiro, 2012b. 2 p.
- AHMEDZADE, P., TIGDEMIR, M., KALYONCUOGLU, S. F., Laboratory investigation of the properties of asphalt concrete mixtures modified with TOP-SBS. **Construction and Building Materials**, v. 21, n. 3, p. 626-633, 2007.
- ALATAS, T., YILMAZ, M., Effects of different polymers on mechanical properties of bituminous binders and hot mixtures. **Construction and Building Materials**, v. 42, n. 1, p. 161-167, 2013.
- AL-HADIDY, A. I., YI-QIU, T., Effect of polyethylene on life of flexible pavements. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 3, p. 1456-1464, 2009.
- AMARAL, S. C., **Estudos de misturas asfálticas densas com agregados do Estado do Pará, utilizando asfalto convencional (CAP-40) e asfalto modificado com polímero SBS (BETUFLEX B 65/60)**. 2000. 52p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.
- ATTAELMANAN, M., FENG, C. P., AI, A., Laboratory evaluation of HMA with high-density polyethylene as a modifier. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 5, p. 2764-2770, 2011.
- AWWAD, M. T., SHBEEB, L., The use of polyethylene in hot asphalt mixtures. **American Journal of Applied Sciences**, v. 3, n. 6, p. 390-396, 2007.
- BASTOS, G. A., CASAGRANDE, M.D.T., MOTTA, L. M. G., FOLLE, D., Ensaio de Tração em Disco Circular em Misturas Asfálticas Reforçadas com Geogrelhas. **Revista de Engenharia Civil Imed**, v. 2, n. 2, p.27-36, out. 2015. Complexo de Ensino Superior Meridional S.A. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.18256/2358-6508/rec-imed.v2n2p27-36>>. Acesso em: 5 fev. 2018.
- BATISTA, F. A. B., **Novas técnicas de reabilitação de pavimentos**. 2004. 463p. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2004.
- BERNUCCI, L. B., MOTTA, L.M.G., CERATTI, J. A. P., SOARES, J. B., **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**, Rio de Janeiro: Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfaltos (ABEDA), 2008. 504 p.
- BERTOLLO, S. A. M., **Avaliação laboratorial de misturas asfálticas densas modificadas com borracha reciclada de pneus**. 2002. 198p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.
- BROVELLI, C., CRISPINO, M., PAIS, J., PEREIRA, P., Using polymers to improve the rutting resistance of asphalt concrete. **Construction and Building Materials**, v. 77, n. 1, p. 117-123, 2015.

BÜHLER, A., **Estudo do efeito de grelhas de reforço na restauração de pavimentos**. 2007. 322p. Tese (Doutorado) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.2007.

CLERMAN, D. D. S., **Estudo laboratorial de misturas asfálticas a frio produzidas com incorporação de borracha de pneus**. 2004. 125p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

CORREIA, N. S., **Performance of flexible pavements enhanced using geogrid-reinforced asphalt overlays**. 2014. 205 p. Doctoral Dissertation - São Carlos School of Engineering of the University of Sao Paulo, Sao Carlos, SP, 2014.

CORREIA, N. S., ZORNBERG, J. G., Mechanical response of flexible pavements enhanced with geogrid-reinforced asphalt overlays. **Geosynthetics International**, v. 23, n. 3, p. 183-193, 2015.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER – ES 390**. Pavimentação – pré-misturado a frio com emulsão modificada por polímero. Rio de Janeiro, 1999. 14p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER – ME 035**. Agregados – determinação da abrasão “Los Angeles”: método de ensaio. São Paulo, 1998b. 06p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, **DNER - ME054**. Equivalente de areia.Rio de Janeiro, 1997. 10p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER – ME 078**. Agregado graúdo – adesividade a ligante betuminoso: método de ensaio. São Paulo, 1994b. 03p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER – ME 081**. Agregados – determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo: método de ensaio. Rio de Janeiro, 1998c. 06p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER – ME 083**. Agregados – análise granulométrica: método de ensaio. Rio de Janeiro, 1998a. 05p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER - ME 086**. Agregados – determinação do índice de forma: método de ensaio. Rio de Janeiro: IPR, 1994c. 05p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER – ME 107**. Mistura betuminosa a frio, com emulsão asfáltica – ensaio Marshall. Rio de Janeiro, 1994a. 09p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER –ME 117**. Mistura betuminosa –Determinação da densidade aparente. Rio de Janeiro, 1994d. 04p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER – ME 193**. Materiais betuminosos líquidos e semi-sólidos – determinação da densidade e da massa específica.Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), Rio de Janeiro, 1996. 06 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER – ME 194**. Agregados – determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman: método de ensaio. Rio de Janeiro, 1998d. 04 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT - EM 128**. Emulsões asfálticas catiônicas modificadas por polímeros elastoméricos – Especificação de material. Rio de Janeiro, 2010d. 05p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT - EM165**. Emulsões asfálticas para pavimentação – Especificação de material. Rio de Janeiro, 2013. 05p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT - ES153**. Pavimentação asfáltica – Pré-misturado a frio com emulsão catiônica convencional: especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2010a. 11p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT - ME 135**. Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas - Determinação do módulo de resiliência: método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010c. 06p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT - ME 136**. Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas - Determinação da resistência à tração por compressão diametral: método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010b. 06p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT – ME 156**. Emulsão asfáltica – Determinação da carga de partícula – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2011, 07p.

DURIEZ, M., ARRAMBIDE, J. **Liants hydrocarbonés**, Paris: Dunod, 1954. 752 p.

GORKEM, C., SENGOZ, B., Predicting stripping and moisture induced damage of asphalt concrete prepared with polymer modified bitumen and hydrated lime. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 6, p. 2227-2236, 2009.

GUPTA, S., VEERARAGAVAN, A., Fatigue behaviour of polymer modified bituminous concrete mixtures. **Journal of Indian Road Congress**, v. 70, n. 1, p. 55-64, 2009.

HINISLIOGLU, S., AGAR, E., Use of waste high-density polyethylene as bitumen modifier in asphalt concrete mix. **Materials Letters**, v. 58, n. 3-4, p. 267-271, 2004.

HOSSEINI, H.R.A.; DARBAN, A.K.; FAKHRI, K., The effect of geosynthetic reinforcement on the damage propagation rate of asphalt pavements. **Scientia Iranica**. Tehran, Iran, v. 16, n. 1, p. 26-32, 2009.

KHODAII, A., FALLAH, S., Effects of geosynthetic reinforcement on the propagation of reflection cracking in asphalt overlays. **International Journal of Civil Engineering**, v. 7, n. 2, p. 131–140, 2009.

KUMAR, P., CHANDRA, S., BOSE, S., Strength characteristics of polymer modified mixes. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 7, n. 1, p. 63-71, 2006.

MAMLOUK, M. S., WOOD, L. E., GADALLAH, A. A., **Laboratory evaluation of asphalt emulsion mixtures by use of the Marshall and indirect tensile tests.** Washington, D. C.: Transportation Research Board, 1980.

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

MARQUES, G. L. O., **Utilização do módulo de resiliência como critério de dosagem de mistura asfáltica; efeito da compactação por impacto e giratória.** 2004. 461 p. Tese (Doutorado) -COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

MORILHA JR., A., **Estudo sobre a ação de modificadores no envelhecimento dos ligantes asfálticos e nas propriedades mecânicas e de fadiga das misturas asfálticas.** 2004. 165p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

NG, A. K. Y., **Contribuição ao estudo de deformação permanente em misturas asfálticas densas à luz de ensaios de fluência por compressão uniaxial estática e dinâmica.** 2013. 148p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

POLACCO, G., FILIPPI, S., MERUSI, F., STASTNA, G., A review of the fundamentals of polymer-modified asphalts: Asphalt/polymer interactions and principles of compatibility. **Advances in Colloid and Interface Science**, v. 224, n. 1, p. 72-112, 2015.

QUIMI-KAO S.A., **Curso Básico de Emulsões Asfálticas**, Ciudad de México: Quimi-Kao S.A, 1993.

SANTANA, H., **Manual de pré-misturados a frio.** Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Petróleo (IBP), 1992. 298 p.

SANTOS, C. R. G., **Avaliação das influências do tipo de ligante e do volume de vazios na vida de fadiga de algumas misturas asfálticas.** 2005. 109p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

SENGOZ, B., ISIKYAKAR, G., Evaluation of the properties and microstructure of SBS and EVA polymer modified bitumen. **Construction and Building Materials**, v. 22, n. 9, p. 1897-1905, 2008.

SENGUL, C. E., ORUC, S., ISKENDER, E., AKSOY, A., Evaluation of SBS modified stone mastic asphalt pavement performance. **Construction and Building Materials**, v. 41, n. 1, p. 777-783, 2013.

SILVA, A. H. M., **Avaliação do comportamento de pavimentos com camada reciclada de revestimentos asfálticos a frio com emulsão asfáltica modificada por polímero.** 2011. 143p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.2011.

SILVA, S. C. C., **Ensaio comparativos de mistura asfáltica pré- misturado a frio com adição de borracha de pneu.** 2008. 137f. Dissertações (Mestrado) - Curso de

Mestrado em Ciência e Tecnologia de Materiais, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2008.

SILVA, T. K., CARVALHO, C. A. B., MARQUES, G. L. O., SANT'ANNA, G. L., SILVA, T. O., MACHADO, C. C., Dosagem de mistura betuminosa a frio e seu estudo sob efeitos de cargas estáticas e repetidas. **Revista Árvore**, v. 40, n. 1, p. 97-106, 2016.

SIRIWARDANE, H., GONDLE, R., BORA, K., Analysis of flexible pavements reinforced with geogrids. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 28, n. 3, p. 287-297, 2010.

SOBHAN, K., GENDUSO, M., TANDON, V., Effects of Geosynthetic Reinforcement on the Propagation of Reflection Cracking and Accumulation of Permanent Deformation in Asphalt Overlays. In: International Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology, 3., 2005, Cartagena, Colombia. **Anais...** Cartagena, Colombia: LACCEI, 2005.

TAPKIN, S., The effect of polypropylene fibers on asphalt performance. **Building and Environment**, v. 43, n. 6, p. 1065-1071, 2008.

TAYFUR, S., OZEN, H., AKSOY, A., Investigation of rutting performance of asphalt mixtures containing polymer modifiers. **Construction and Building Materials**, v. 21, n. 2, p. 328-337, 2007.

TINAJEROS, R. A. P., **Estudo do comportamento mecânico de misturas asfálticas a quente convencional e modificada com polímero**. 2016. 145p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2016a.

TINAJEROS, R. A. P., SILVA, T. O., PITANGA, H. N., LIMA, D. C., MARQUES, G. L. O., Estudo do comportamento mecânico de misturas asfálticas a quente produzidas com ligantes convencional e modificado por polímero SBS. In: Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, 30., 2016, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ANPET, 2016b.

TUCHUMANTEL JR., O. Influência da Umidade de Compactação no PMF Denso. In: Encontro de Asfalto, 10., 1990, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: IBP, 1990.

VASCONCELOS, K. L., **Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas a Quente Dosadas pelas Metodologias Marshall e Superpave com Diferentes Granulometrias**. 2004. 132 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2004.

WU, S., YE, Q., LI, N., Investigation of rheological and fatigue properties of asphalt mixtures containing polyester fibers. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 10, p. 2111-2115, 2008.

5. CONCLUSÃO

Nesse trabalho, propôs-se analisar e quantificar os efeitos da alteração do tipo de emulsão asfáltica e da inserção de um elemento geossintético de reforço sobre um conjunto de propriedades mecânicas de misturas asfálticas do tipo PMFD, a fim de complementar o conhecimento de misturas asfálticas a frio, dada a lacuna de informações a respeito de tais misturas. Portanto, após a realização desse trabalho, conclui-se que:

- A umidade de compactação tem influência direta e significativa no rearranjo das partículas da mistura asfáltica. Para as particularidades da pesquisa, tal influência foi significativa, visto que, para um mesmo tipo de material, pode-se produzir misturas com diferença de resistência mecânica da ordem de 98,5%, traduzida pelos correspondentes valores de Estabilidade Marshall obtidos de misturas asfálticas compactadas com e sem controle de umidade de compactação;
- O teor de umidade de molhagem utilizado, 2,5% em massa em relação à massa de agregados minerais, foi um valor razoável para a composição granulométrica de projeto, proporcionando um bom recobrimento das partículas com EA e uma boa trabalhabilidade da mistura asfáltica;
- O método de ensaio ME 107¹ não contempla a importância da umidade de molhagem e de compactação em relação à trabalhabilidade, recobrimento das partículas, resistência e rigidez das misturas asfálticas a frio;
- Para as particularidades dos ensaios que avaliaram as propriedades mecânicas e do sistema mistura asfáltica - reforço geossintético pesquisado, foram constatadas, experimentalmente, diferentes respostas dos materiais estudados quanto à mobilização da capacidade resistente do reforço;
- Essas diferentes respostas dos materiais mostraram, dependentes do tipo de resistência interna avaliado (compressiva ou de tração), da extensão com que cada tipo de ensaio tensiona internamente o sistema pesquisado, da aderência entre os componentes do sistema e do posicionamento do reforço geossintético relativamente ao plano de ruptura do sistema;
- A ineficiente aderência do elemento de reforço à mistura asfáltica compactada restringiu a integridade do conjunto, criando uma zona de

¹DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER – ME 107**. Mistura betuminosa a frio, com emulsão asfáltica – ensaio Marshall. Rio de Janeiro, 1994. 09p.

descontinuidade física no interior do sistema, a qual também contribuiu para o desempenho mecânico deficiente da mistura asfáltica reforçada nas diferentes modalidades de ensaios de compressão diametral contempladas na pesquisa;

- A respeito do efeito da alteração do ligante asfáltico, foi identificada uma melhoria no desempenho das misturas modificadas, tanto reforçadas quanto não reforçadas, em termos de Estabilidade e Fluência *Marshall*, quando comparadas às misturas asfálticas convencionais;
- Ao analisar o comportamento das misturas não reforçadas pesquisadas em termos de resistência à tração por compressão diametral (RT) e módulo de resiliência (MR), conclui-se que não houve diferenças significativas de desempenho entre as misturas que utilizaram os ligantes asfálticos convencional e modificado. Conclui-se, também, que, ao utilizar-se o ligante asfáltico modificado, a mistura modificada apresentou um desempenho ao comportamento à fadiga inferior ao desempenho da mistura convencional;
- Ao considerar o comportamento das misturas reforçadas, a alteração do ligante convencional para o ligante modificado promoveu um melhor desempenho, em termos de resistência a tração por compressão diametral (RT), módulo de resiliência (MR) e vida de fadiga. Essa melhora no desempenho mecânico é reflexo da melhor aderência entre o reforço e a mistura asfáltica;
- Para os ensaios de tração por compressão diametral estático (RT) e dinâmicos (MR e Vida de Fadiga), não foi constatada a capacidade do ligante asfáltico modificado em mobilizar o efeito diferenciado da coesão interna da mistura asfáltica, tal como visto para a modalidade de ensaio compressivo (ensaio *Marshall*).

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir das conclusões anteriores, pôde perceber a necessidade da ampliação do conhecimento das propriedades, tanto mecânicas quanto de aderência e de desempenho, de misturas asfálticas a frio, a fim de avaliar a viabilidade de incorporação de novas tecnologias na preparação das mesmas, reforçando a importância da adequação dos ensaios para a obtenção de seus parâmetros. Assim, sugere-se para trabalhos futuros:

- Escolher o teor de ligante não somente a partir de valores de Estabilidade e Fluência *Marshall*, devido aos altos valores de Estabilidade observados na dosagem. Propõe-se, neste caso, a inclusão de outras propriedades de desempenho, tais como RT, MR e vida de fadiga, para avaliar o teor de ligante de projeto;
- Realizar ensaios de aderência entre a interface mistura asfáltica a frio e reforço geossintético;
- Utilizar outras configurações de ensaio para avaliar a contribuição efetiva do reforço geossintético em relação à resistência à tração do sistema mistura asfáltica – geossintético, tais como os ensaios de resistência à fratura e flexão em 3 ou 4 pontos;
- Avaliar o desempenho das misturas estudadas em laboratório, em ensaios de deformação permanente e em ensaios de larga escala, tanto laboratoriais quanto em pistas de teste;
- Avaliar o desempenho de misturas asfálticas a frio com outros tipos de modificadores de emulsão asfáltica;
- Analisar a possibilidade de se correlacionar resultados obtidos nos ensaios de aderência na interface com os resultados de resistência à tração, módulo de resiliência e vida de fadiga;
- Investigar o emprego de outros tipos de geossintéticos na resposta mecânica das misturas asfálticas a frio, bem como o nível de eficiência da aderência na interface da mistura asfáltica e geossintético;
- Aplicar a metodologia utilizada em misturas asfálticas a quente;
- Investigar a comportamento mecânico das misturas asfálticas a frio reforçadas, empregando-se o mesmo método, mas com a posição do reforço geossintético indicada na Figura 3.10.