JAVIER YESID MAHECHA NUÑEZ

CARATERIZAÇÃO À FADIGA DE LIGANTES ASFÁLTICOS MODIFICADOS ENVELHECIDOS A CURTO E LONGO PRAZO

Dissertação apresentada ao Departamento de Engenharia de Transportes da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências, Programa de Engenharia de Transportes

Área de Concentração: Infraestrutura de Transportes

Orientador: Prof. Dr. Adalberto Leandro Faxina

São Carlos, SP

2013

Este trabalho foi licenciado com uma Licença Creative Commons - Atribuição – Não Comercial 3.0 Brasil. É permitido compartilhar e adaptar o trabalho para todo uso não comercial, desde que respeitada a atribuição. A licença jurídica (resumida ou completa) pode ser acessada em: http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/br/deed.pt

N962c Nuñez, Javier Yesid Mahecha
Caracterização à fadiga de ligantes asfálticos modificados envelhecidos a curto e longo prazo. / Javier Yesid Mahecha Nuñez; orientador Adalberto Leandro Faxina. São Carlos, 2013.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes e Área de Concentração em Infraestrutura de Transporte -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2013.

1. Ligantes asfálticos. 2. Fadiga. 3. Envelhecimento. 4. Ácido polifosfórico. 5. Polímeros. 6. Borracha moída. 7.DSR. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **JAVIER YESID MAHECHA NUÑEZ.**

Título da dissertação: "Caracterização à fadiga de ligantes asfálticos modificados envelhecidos a curto e longo prazo".

Data da defesa: 23/08/2013

Comissão Julgadora:	**Resultado:**
Prof. Dr. **Adalberto Leandro Faxina (Orientador)** (Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)	APROVADO
Prof. Associado **José Leomar Fernandes Júnior** (Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)	APROVADO
Profa. Titular **Liedi Légi Bariani Bernucci** (Escola Politécnica/USP)	aprovado

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes:
Prof. Associado **Antônio Nélson Rodrigues da Silva**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Titular **Denis Vinicius Coury**

A minha esposa Maria Mercedes Gamboa, minha mãe Enid Nuñez e minha irmã Miladis Mahecha pelo apoio, amor e incentivo

AGRADECIMENTOS

A Deus pela força espiritual que me proporcionou nesta etapa de minha vida

Ao povo brasileiro que com seu trabalho fez possível o sonho de cursar este programa de mestrado nesta grande universidade pública.

À MSc. Maria Mercedes Gamboa Medina pelas inúmeras contribuições e discussões que tanto aportaram neste trabalho.

Ao Professor Dr. Adalberto Leandro Faxina pela amizade, confiança, dedicação, ensinamentos e a paciência que tanto contribuíram ao desenvolvimento desta pesquisa.

Aos todos os Professores do Departamento de Engenharia de Transportes pelo acolhimento e ensinamentos, especialmente aos professores Jose Leomar Fernandes Junior e ao Professor Antonio Nelson Rodrigues pela atenção que me brindaram tanto no intercâmbio quanto na etapa de mestrado.

À Professora Dra. Cassie Hintz da Universidade de Carolina do Norte (EUA) e ao Professor Dr. Hussain Bahia da universidade de Wisconsin (EUA), pela colaboração e comentários.

Aos meus pais Jose Yesid Mahecha Aguirre e Enid Nuñez Torres e aos meus irmãos Alexander, Andersson e Miladis pelo apoio.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia de Transportes da EESC-USP pela colaboração.

Aos colegas do Departamento de Engenharia de Transporte pelos momentos compartilhados.

Ao colega MSc. Matheus David Inocente Domingos pela colaboração no desenvolvimento desta pesquisa.

Ao colega MSc. Fernando Hirose pela revisão do documento.

A meu amigo Fernando David Leite pelo acolhimento na minha chegada no Brasil

RESUMO

NUÑEZ, J. Y. M. Caracterização à fadiga de ligantes asfálticos modificados envelhecidos a curto e longo prazo. 2013. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2013.

O trincamento por fadiga é um dos principais mecanismos de deterioração dos pavimentos flexíveis e, mesmo assim, é, ainda hoje, um dos defeitos mais difíceis de serem controlados. Uma das alternativas para a melhoria das características de fadiga das misturas asfálticas é o emprego de ligantes asfálticos modificados, porém, há dúvida se o enrijecimento provocado pela adição dos modificadores pode influenciar a resistência à fadiga da mistura asfáltica. Com o intuito de mensurar características do ligante asfáltico que tenham relação com o trincamento por fadiga da mistura asfáltica, alguns ensaios de laboratório foram desenvolvidos recentemente, destacando-se dois: o ensaio de varredura de tempo (*time sweep*) e o ensaio de varredura de amplitude linear (LAS). O objetivo deste trabalho é caracterizar o comportamento à fadiga de 12 ligantes asfálticos modificados de mesmo grau de desempenho (PG 76-xx). As formulações CAP+PPA, CAP+SBS, CAP+SBS+PPA, CAP+Borracha, CAP+Borracha+PPA, CAP+PE, CAP+PE+PPA, CAP+EVA, CAP+EVA+PPA, CAP+SBR, CAP+SBR+PPA e CAP+Elvaloy+PPA foram preparadas tendo como base um ligante asfáltico 50/70 de classificação PG 64-xx. Com base na caracterização realizada neste estudo, as principais conclusões são: (a) o material que apresentou melhor vida de fadiga foi o CAP+EVA; (b) o material menos sensível à deformação foi o CAP puro; (c) o menos sensível à temperatura foi o CAP+PPA; (d) o efeito do PPA nos ligantes asfálticos com outros aditivos provocou diminuição da vida de fadiga para a maioria das formulações, aumento da sensibilidade aos níveis de deformação para todas as formulações, diminuição da sensibilidade à temperatura e aumento da sensibilidade ao envelhecimento para a maioria das formulações; (e) tomando por base o ordenamento final das melhores características à fadiga dos ligantes asfálticos segundo os parâmetros analisados, o CAP+Borracha apresenta o melhor desempenho global.

Palavras chave: Ligantes asfálticos, Fadiga, Envelhecimento, Ácido polifosfórico, Polímeros, Borracha moída, DSR.

ABSTRACT

NUÑEZ, J. Y. M. Fatigue characterization of short-term and long-term aged modified asphalt binders. 2013. Dissertation (Master) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2013.

Fatigue cracking is a major mechanism of deterioration of flexible pavements, and even then, it is still one of the defects that are more difficult to control. One alternative to improve fatigue characteristics of asphalt mixtures is the use of modified asphalt binders; however, there is no doubt that the stiffening caused by the addition of modifiers can influence the fatigue resistance of asphalt mixture. In order to measure characteristics of asphalt binders that are related to the fatigue cracking of asphalt mixture, some laboratory tests have been recently developed such as the time sweep and the linear amplitude sweep (LAS) test. The objective of this study is to characterize the fatigue behavior of 12 modified asphalt binders with the same high-temperature performance grade (PG 76-xx). The formulations AC+PPA, AC+SBS, AC+SBS+PPA, AC+Rubber, AC+Rubber+PPA, AC+PE, AC+PE+PPA, AC+EVA, AC+EVA+PPA, AC+SBR, AC+SBR+PPA and AC+Elvaloy+PPA were prepared with a 50/70 base asphalt binder graded as PG 64-xx in the Superpave specification. Based on the characterization made in this study, the main conclusions are the following: (a) the material that showed better fatigue life was the AC+EVA; (b) the material that is less sensitive to deformation was the neat AC; (c) the less sensitive one to temperature was the AC+PPA; (d) the effect of PPA in asphalt binders prepared with other additives caused a reduction in the fatigue life for many formulations, an increase in the sensitivity levels of deformation for all formulations, a reduction in the sensitivity to temperature and an increase in the sensitivity to aging for several formulations; (e) on the final ranking of the characteristics of asphalt binders according to the parameters analyzed in this research study, the AC+Rubber showed the best overall performance.

Keywords: Asphalt Binder, Fatigue, Aging, Polyphosphoric Acid, Polymer, Crumb Rubber, DSR.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Formulações e variáveis de processamento dos ligantes asfálticos modificados 60

Tabela 2. Parâmetros do modelo na temperatura de 25°C e amostras envelhecidas a curto prazo 66

Tabela 3. Parâmetros do modelo na temperatura de 35°C e amostras envelhecidas a curto prazo 66

Tabela 4. Parâmetros do modelo na temperatura de 25°C e amostras envelhecidas a longo prazo 67

Tabela 5. Parâmetros do modelo na temperatura de 35°C e amostras envelhecidas a longo prazo 67

Tabela 6. Número de ciclos na falha (N_f) no ensaio de varredura de tempo a 10 rad/s e 10% de deformação 70

Tabela 7. Resultados do LAS na análise do VECD na condição RTFOT e na temperatura de 25°C 74

Tabela 8. Resultados do LAS na análise do VECD na condição RTFOT e na temperatura de 35°C 74

Tabela 9. Resultados do LAS na análise do VECD na condição PAV e na temperatura de 25°C 75

Tabela 10 Resultados do LAS na análise do VECD na condição PAV e na temperatura de 35°C 75

Tabela 11. Valores do coeficiente B dos modelos de fadiga 92

Tabela 12. Parâmetro de tolerância ao dano a_f (mm) no ensaio LAS 93

Tabela 13. Sensibilidade do parâmetro a_f ao aumento da temperatura 97

Tabela 14. Sensibilidade do N_f ao aumento da temperatura no ensaio de varredura de tempo 99

Tabela 15. Sensibilidade do N_f ao aumento da temperatura para o nível de deformação de 3% 100

Tabela 16. Sensibilidade do N_f ao aumento da temperatura para o nível de deformação de 30% 100

Tabela 17. Sensibilidade do a_f ao envelhecimento 102

Tabela 18. Sensibilidade do N_f ao envelhecimento no ensaio de varredura de tempo 103

Tabela 19. Sensibilidade do N_f ao envelhecimento para o nível de deformação de 3% 104

Tabela 20. Sensibilidade do N_f ao envelhecimento para o nível de deformação de 30%..... 105

Tabela 21. Valores do parâmetro G*senδ (kPa) 106

Tabela 22. Matriz dos coeficientes R^2 dos parâmetros de fadiga dos ligantes asfálticos 111

Tabela 23. Ordenamento final dos ligantes asfálticos quanto às suas características à fadiga 115

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Identificação do trincamento por fadiga. (Adaptado do LTPP Miller e Bellinguer 2003) 24

Figura 2. Respostas fundamentais dos pavimentos em função da carga, das propriedades dos materiais e das espessuras das camadas (Adaptado de Hass et al. 2007) 26

Figura 3. Correlação entre a vida de fadiga do ligante asfáltico e a vida de fadiga média de misturas asfálticas medidas na mesma temperatura (Adaptado de Bahia et al. 2001b) 33

Figura 4. Correlações entre o parâmetro G*senδ e a vida de fadiga da mistura asfáltica medida a 10Hz na temperatura intermediária (Adaptado de Bahia et al. 2001a). 35

Figura 5. a) Esquema do ensaio oscilatório no DSR e b) Carregamento no ensaio de varredura de tempo. 47

Figura 6. Aspecto típico de um ensaio de fadiga no DSR e determinação do número de ciclos (Adaptado de Johnson et al. 2007) 48

Figura 7. Definição de vida de fadiga: Gráfico típico da DER versus o número de ciclos.(Adaptado de Anderson et al. 2001) 49

Figura 8. Definições de falha e progressão do dano no ensaio de varredura de tempo a deformação controlada (Adaptado de Anderson et al. 2001) 50

Figura 9. Esquema de carregamento no ensaio LAS proposto (Adaptado de Johnson 2010). 53

Figura 10 a) Representação da fratura do material (Adaptado de Hintz 2012) e b) fotografia da fratura do material no DSR (arquivo próprio) 54

Figura 11. Aderência entre o esquema de carregamento real (aplicado pelo reômetro) e o proposto (Adaptado de Hintz 2012) 55

Figura 12. Taxa de energia liberada (G_f) versus crescimento da fissura (a_f) e taxa de crescimento da fissura versus o comprimento da fissura no ensaio LAS: a) carregamento por degraus (Adaptado de Johnson, 2010).e b) carregamento linear contínuo. (Adaptado de Hintz, 2012) 56

Figura 13 Taxa de crescimento da fissura em função do comprimento da fissura(HINTZ, 2012) 57

Figura 14. Exemplo de obtenção da vida de fadiga no ensaio de varredura de tempo para o CAP 50/70 65

Figura 15. Taxa de energia dissipada a 25°C e amostras envelhecidas a curto prazo 68

Figura 16. Taxa de energia dissipada a 35°C e amostras envelhecidas a curto prazo 68

Figura 17. Taxa de energia dissipada a 25°C e amostras envelhecidas a longo prazo 69

Figura 18. Taxa de energia dissipada a 35°C e amostras envelhecidas a longo prazo 69

Figura 19. Ordenamentos dos materiais no ensaio de varredura de tempo..... 72

Figura 20. Ordenamento dos valores de N_f do ensaio LAS para baixos níveis de deformação (3%)..... 76

Figura 21. Ordenamento dos valores de N_f do ensaio LAS para altos níveis de deformação (30%)..... 77

Figura 22. Estimativa da vida de fadiga em função da deformação na condição de envelhecimento a curto prazo e temperatura de 25°C..... 78

Figura 23. Estimativa da vida de fadiga em função da deformação na condição de envelhecimento a curto prazo e temperatura de 35°C..... 79

Figura 24. Estimativa da vida de fadiga em função da deformação na condição de envelhecimento a longo prazo e temperatura de 25°C..... 80

Figura 25. Estimativa da vida de fadiga em função da deformação na condição de envelhecimento a longo prazo e temperatura de 35°C..... 81

Figura 26. Comparativo das vidas de fadiga em função da deformação. CAP puro, CAP+PPA e CAP+Elvaloy+PPA..... 83

Figura 27. Comparativo das vidas de fadiga em função da deformação. CAP puro, CAP+PPA, CAP+Borracha e CAP+Borracha+PPA..... 84

Figura 28. Comparativo das vidas de fadiga em função da deformação. CAP puro, CAP+PPA, CAP+SBS e CAP+SBS+PPA..... 85

Figura 29. Comparativo das vidas de fadiga em função da deformação. CAP puro, CAP+PPA, CAP+EVA e CAP+EVA+PPA..... 87

Figura 30. Comparativo das vidas de fadiga em função da deformação. CAP puro, CAP+PPA, CAP+PE e CAP+PE+PPA..... 88

Figura 31 Comparativo das vidas de fadiga em função da deformação. CAP puro, CAP+PPA, CAP+SBR e CAP+SBR+PPA..... 90

Figura 32. Determinação do valor do a_f na temperatura de 25°C envelhecimento a curto e longo prazos..... 93

Figura 33. Ordenamento dos valores do parâmetro a_f 94

Figura 34. Taxa de crescimento da fissura (da/dN) x a de alguns materiais que não apresentaram o mínimo local na determinação do a_f 95

Figura 35. Correlação entre G*senδ e a_f do ensaio LAS a 25˚C na condição envelhecida no PAV 107

Figura 36. Correlação entre G*senδ e a_f do ensaio LAS a 35˚C na condição envelhecida no PAV 107

Figura 37. Correlação entre G*senδ e N_f do ensaio de varredura de tempo a 25˚C na condição PAV 108

Figura 38. Correlação entre G*senδ e N_f do ensaio de varredura de tempo a 25˚C na condição PAV (descartando o dado do SBR) 108

Figura 39. Correlação entre G*senδ e N_f do ensaio de varredura de tempo a 35˚C na condição PAV 108

Figura 40. Correlação entre G*senδ e N_f do ensaio LAS a 25˚C na condição PAV a 3% de deformação 109

Figura 41. Correlação entre G*senδ e N_f do ensaio LAS a 35˚C na condição PAV a 3% de deformação 109

Figura 42. Correlação entre G*senδ e N_f do ensaio LAS a 25˚C na condição PAV a 30% de deformação 109

Figura 43. Correlação entre G*senδ e N_f do ensaio LAS a 35˚C na condição PAV a 30% de deformação 110

Figura 44. Ordenamentos finais da vida de fadiga e da sensibilidade dos parâmetros de fadiga aos efeitos da temperatura e do envelhecimento 117

Figura 45. Posição média dos ordenamentos da vida de fadiga dos ligantes asfálticos 118

Figura 46. Posição média dos ordenamentos da sensibilidade ao nível de deformação 119

Figura 47. Posição média dos ordenamentos da sensibilidade à temperatura 119

Figura 48. Posição média dos ordenamentos da sensibilidade ao envelhecimento 120

Figura 49. Taxa de energia dissipada obtida do ensaio LAS, a 25°C e amostras envelhecidas a curto prazo 122

Figura 50. Determinação do número de ciclos na falha N_f para os ligantes asfálticos CAP puro e CAP+Borracha a 35°C e amostras envelhecidas a curto prazo 122

Figura 51. Curvas da/dN e de torque (fila superior) e de tensão oscilatória (fila inferior) para o CAP+Borracha 124

Figura 52. Curvas da/dN e de torque (fila superior) e de tensão oscilatória (fila inferior) para o CAP+EVA 125

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASTHO	*American Association of State Highway and Transportation Officials*
ASTM	*American Society for testing and Materials*
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
DER	*Dissipated Energy Ratio* - Taxa de energia dissipada
DER-SP	Departamento de Estrada de Rodagem do Estado de São Paulo
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DSR	Reômetro de Cisalhamento Dinâmico
EMA	Etil-Metacrilato
EVA	Copolímero de etileno acetato de vinila
FHWA	*Federal Highway Administration*
GEIPOT	Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes
LAS	*Linear Amplitude Sweep* - Varredura de amplitude Linear
LTPP	*Long Term Pavement Performance*
NCHRP	*National Coperative Highway Research Program*
PE	Polietileno
PG	*Performance Grade* – Grau de desempenho
PPA	Ácido Polifosfórico
REPLAN	Refinaria de Paulínia (SP)
RTFOT	*Rolling Thin Film Oven Test*
SBR	Borracha de estireno-butadieno
SBS	Copolímero de estireno butadiene estireno
SHRP	*Strategic Highway Research Program*
VECD	*Viscoelastic Continuum Damage – Dano Contínuo Viscoelástico*
PAV	*Pressure Aging Vessel*

LISTA DE SIMBOLOS

δ	Ângulo de fase
G^*	Módulo Complexo, módulo em regime oscilatório de cisalhamento
$G^*sen\delta$	Parâmetro da especificação Superpave para fadiga
N_f	Número de ciclos à falha por fadiga
N_{p20}	Critério de falha no ensaio de varredura de tempo
a_f	Parâmetro da análise de tolerância ao dano no ensaio LAS

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 19

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 23

2.1. O PROCESSO DE FADIGA NOS PAVIMENTOS ASFÁLTICOS 23
2.2. A FADIGA NO DIMENSIONAMENTO DOS PAVIMENTOS 25
2.3. MODELOS DE PREVISÃO DE DESEMPENHO À FADIGA 26
2.4. ENSAIOS DE FADIGA EM MISTURAS ASFÁLTICAS 30
2.5. A FADIGA NO LIGANTE ASFÁLTICO 32
2.5.1. Especificações dos ligantes asfálticos quanto à fadiga 34
2.5.2. Limitações do atual parâmetro de fadiga da especificação Superpave 36
2.6. VARIÁVEIS QUE AFETAM A FADIGA DOS MATERIAIS ASFÁLTICOS 37
2.6.1. Modo de aplicação do carregamento 37
2.6.2. Taxa de carregamento ou frequência 38
2.6.3. Nível de deformação 39
2.6.4. Temperatura 39
2.6.5. Tipo de ligante e modificador 40
2.6.6. Geometria da amostra 41
2.6.7. Envelhecimento 42
2.6.8. Efeitos dos períodos de recuperação (*healing*) 43
2.7. CONCEITO DE ENERGIA DISSIPADA 45
2.8. PRINCIPAIS ENSAIOS DESENVOLVIDOS PARA A DETERMINAÇÃO DA VIDA DE FADIGA NO LIGANTE ASFÁLTICO 46
2.8.1. Varredura de tempo (*time sweep*) 47
2.8.2. Varredura de Amplitude Linear (Linear Amplitude Sweep LAS) 52
2.8.3. LAS modificado 54

3. MATERIAIS E MÉTODOS 59

3.1. MATERIAIS 59
3.2. PROCEDIMENTOS 60
3.2.1. Ensaio de varredura de tempo (*time sweep*) 61
3.2.2. Ensaio de varredura de amplitude linear (LAS) 63

4. APRESENTAÇÃO E DISCUSÃO DOS RESULTADOS 65

4.1. ENSAIO DE VARREDURA DE TEMPO 65
4.2. ENSAIO DE VARREDURA DE AMPLITUDE LINEAR (LAS) 73
4.2.1. Análise do dano contínuo viscoelástico (VECD) 73
4.2.2. Análise do índice de tolerância ao dano pelo parâmetro a_f 92
4.3. EFEITO DA TEMPERATURA NA VIDA DE FADIGA DOS LIGANTES ASFÁLTICOS 97
4.3.1. Efeito da temperatura com base no parâmetro a_f de tolerância ao dano obtido no ensaio LAS 97
4.3.2. Efeito da temperatura no ensaio de varredura de tempo 98

4.3.3.Efeitos da temperatura com base nos modelos de fadiga da análise do dano contínuo viscoelástico VECD 99
4.4. EFEITO DO ENVELHECIMENTO NA VIDA DE FADIGA DOS LIGANTES ASFÁLTICOS 101
4.4.1.Efeito do envelhecimento com base no parâmetro a_f 101
4.4.2.Efeito do envelhecimento no ensaio de varredura de tempo 102
4.4.3.Efeitos do envelhecimento com base nos modelos de fadiga da análise do dano contínuo viscoelástico VECD 104
4.5. COMPARAÇÃO DOS PARÂMETROS DE FADIGA COM O PARÂMETRO DE FADIGA (G*SENδ) DA ESPECIFICAÇÃO SUPERPAVE 106
4.6. RELAÇÕES ENTRE OS PARÂMETROS DE FADIGA DOS LIGANTES ASFÁLTICOS 110

5. ORDENAMENTO DOS MATERIAIS EM TERMOS DOS PARÂMETROS DE FADIGA 113

6. CONSIDERAÇÕES ADICIONAIS 121

6.1. APLICAÇÃO DO CONCEITO DA ENERGIA DISSIPADA NOS RESULTADOS DO ENSAIO LAS 121
6.2. PARÂMETRO DE TOLERÂNCIA AO DANO DOS LIGANTES ASFÁLTICO .. 123

7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES 127

8. REFERÊNCIAS 133

1. INTRODUÇÃO

Existem mais de 1,7 milhão de quilômetros de rodovias no Brasil, das quais 82% (1,4 milhão) correspondem a rodovias não-pavimentadas (EXAME, 2008). Esta extensa rede rodoviária sem pavimentar demanda altos volumes de investimentos, que devem ser bem aproveitados por meio de projetos de pavimentos rodoviários econômicos, duráveis e sustentáveis.

Concomitante com esse conceito de sustentabilidade, o estudo dos materiais usados na pavimentação se torna fundamental, de maneira a se fazer uma seleção mais racional daqueles materiais, sempre visando o melhor desempenho no campo. No intuito de melhorar o comportamento dos ligantes asfálticos quanto aos defeitos mais frequentes nos pavimentos, dentre eles a fadiga, a utilização de modificadores tem sido cada vez mais comum. Estas modificações podem se refletir em um melhor desempenho dos pavimentos ante a crescente magnitude das cargas e dos volumes de tráfego nas rodovias.

A maioria dos modificadores, à exceção dos óleos, é reconhecidamente favorável ao incremento da resistência da mistura asfáltica à deformação permanente. Tais ganhos normalmente são obtidos porque os modificadores enrijecem o ligante asfáltico e proporcionam a ele uma maior elasticidade. Nas temperaturas intermediárias e baixas, em que ocorrem os trincamentos de origem térmica e por fadiga, o papel do ligante asfáltico é gradativamente mais definitivo. Porém, é importante saber se o acréscimo de rigidez obtido com a adição do modificador vai se estender às temperaturas intermediárias e baixas e se tal acréscimo de rigidez será ou não favorável às resistências à fadiga e ao trincamento térmico.

Perante a necessidade de conhecer os efeitos dos modificadores e aproveitar melhor as potencialidades que oferecem, a caracterização das propriedades dos ligantes asfálticos modificados ante o processo de fadiga tem ganhado cada vez mais importância. A disposição em caracterizar de maneira ampla o comportamento reológico de ligantes asfálticos modificados por diversos modificadores motivou a criação de uma linha de pesquisas no Laboratório de Estradas do Departamento de Transportes da Escola de Engenharia de São Carlos da USP. Um dos primeiros trabalhos concluídos foi o de Domingos (2011), que constatou, por meio do ensaio de fluência e recuperação sob múltiplas tensões (MSCR), que a adição de modificadores aumenta a resistência à deformação permanente do ligante asfáltico. Tais melhorias se verificaram porque os modificadores proporcionaram aumento da rigidez e da recuperação elástica do ligante asfáltico. O passo seguinte deste esforço foi verificar se tais

ganhos em rigidez e recuperação elástica se estenderiam até as temperaturas intermediárias e se poderiam proporcionar aumento também da resistência à fadiga do ligante asfáltico.

O trincamento por fadiga é visto como um dos mecanismos de ruptura mais complexos e é um dos defeitos mais comuns nos pavimentos asfálticos no Brasil e no mundo (QUEIROZ, 1981). Este mecanismo de ruptura é produzido pela ação repetida das cargas do tráfego, as quais induzem tensões e deformações que poderiam levar eventualmente à perda da integridade estrutural da camada asfáltica (EL-BASYOUNY e WITCZAK, 2005a). No processo de trincamento por fadiga, tem sido reconhecida a importante contribuição do ligante asfáltico, já que o mecanismo de ruptura começa e se propaga neste material. Portanto, a associação da fadiga dos materiais asfálticos ao dano no ligante asfáltico é um dos aspectos que deve ser controlado nas especificações (BAHIA et al., 2001a).

Além da preponderante participação que tem o ligante asfáltico dentro do processo de fadiga, existe outra razão que motiva a avaliação do dano por fadiga no ligante asfáltico: a realização de ensaios com pequenas quantidades de material e por meio de testes mais simples, se comparados aos que normalmente são feitos em misturas asfálticas. O controle do desenvolvimento da fadiga na mistura asfáltica por meio de propriedades ou parâmetros obtidos do ligante asfáltico é um sonho ainda não concretizado e que absorve grandes esforços de diversos pesquisadores.

Atualmente, as especificações tentam estabelecer parâmetros para garantir um ótimo desempenho dos materiais usados em pavimentação. A especificação Superpave® para ligantes asfálticos, produto do programa SHRP (*Strategic Highway Research Program*) dos Estados Unidos, utiliza o parâmetro G*senδ para controlar a fadiga. Porém, como foi constatado por vários pesquisadores (DEACON et al., 1997; BAHIA (2001b); TSAI e MONISMITH, 2005; DELGADILLO e BAHIA, 2005;), este parâmetro não é o mais apropriado para caracterizar o comportamento dos ligantes asfálticos e sua contribuição no dano por fadiga da mistura asfáltica.

Um dos inconvenientes do uso do parâmetro G*senδ está no fato de que este parâmetro é avaliado na faixa da viscolelasticidade linear e com poucos ciclos, ao passo que o processo de dano por fadiga ocorre na faixa não-linear e depois de vários ciclos de carregamento (BAHIA et al., 1999). Outros pesquisadores, como Tsai e Monismith (2005), após a avaliação da influência de 9 ligantes asfálticos em uma gama representativa de estruturas, de condições

ambientais e de cargas de tráfego, constataram que este parâmetro não permite estabelecer uma diferença clara ou consistente quanto ao desempenho à fadiga.

Por conta dessas deficiências encontradas, têm surgido alternativas na direção de proporcionar um ensaio e/ou parâmetro que substitua o atual parâmetro de fadiga (G*senδ) da especificação Superpave e que permita uma adequada descrição do comportamento à fadiga dos ligantes asfálticos (BAHIA et al., 2001a; JOHNSON, 2010). Uma das primeiras propostas para substituir este parâmetro foi o ensaio de varredura de tempo (*time sweep*). Este ensaio descreve adequadamente o comportamento do material à fadiga, porém tem a desvantagem de exigir tempos de execução prolongados (BAHIA et al., 2001a), o que inviabiliza sua implementação em especificações.

Para solucionar esse problema do tempo de duração do ensaio, um ensaio acelerado de fadiga, denominado varredura de amplitude linear (LAS), foi proposto Johnson (2010). A análise dos resultados deste ensaio é baseada na teoria do dano contínuo viscoelástico (VECD). Mais recentemente, foram apontadas algumas deficiências no ensaio LAS, em relação ao modo de carregamento, o que levou à proposição de modificações no procedimento de ensaio e na análise dos resultados (HINTZ, 2012). A norma da AASHTO TP 101-12UL, publicada em 2013, incorpora essas modificações e inclui dois tipos de análise: 1) a análise baseada na teoria do dano contínuo viscoelástico (VECD) e 2) a análise de tolerância ao dano baseada no parâmetro a_f (uma medida do comprimento da trinca na fratura da amostra).

Este trabalho tem por objetivo caracterizar o comportamento à fadiga de vários ligantes asfálticos modificados por meio dos ensaios de varredura de tempo e de varredura de amplitude linear (LAS). Foram avaliados 12 ligantes asfálticos modificados de mesmo grau desempenho sob altas temperaturas (PG 76-XX) e o ligante asfáltico de base que lhes deu origem, de PG 64-XX. Foram formulados dois tipos de ligante asfáltico, um composto por formulações do tipo CAP+modificador e outro composto por formulações do tipo CAP+modificador+PPA. Os modificadores empregados foram: ácido polifosfórico (PPA), Elvaloy, borracha moída de pneus, SBS, EVA, PE e SBR.

A principal contribuição deste trabalho é a caracterização à fadiga de ligantes asfálticos modificados que incluem em sua composição um elenco dos modificadores mais comuns, utilizando dois ensaios (varredura de tempo e varredura de amplitude linear) em duas condições de temperatura e duas de envelhecimento. Foram obtidos ordenamentos dos materiais em relação aos diversos parâmetros de fadiga obtidos dos ensaios. Foram estudados

os efeitos do nível de deformação alto e baixo (caso a estrutura do pavimento apresente alta ou baixa deformabilidade, respectivamente), da temperatura (25 e 35°C) e do envelhecimento (curto e longo prazos) na vida de fadiga dos ligantes asfálticos. O estudo destes efeitos pode auxiliar os projetistas a adotar critérios de escolha dos ligantes asfálticos mais racionais e que levem em conta as condições às quais os materiais possam estar submetidos no campo. Adicionalmente, foram feitas algumas considerações sobre o critério de análise dos resultados do ensaio de varredura de amplitude linear, que visam contribuir à estimativa da vida de fadiga nos ligantes asfálticos modificados.

Esta dissertação apresenta, no capítulo 2, uma breve discussão acerca do processo de fadiga nos pavimentos asfálticos e nas misturas asfálticas. A fim de dar ênfase ao fenômeno de fadiga no ligante asfáltico, são abordados também neste capítulo o efeito das diferentes variáveis que influenciam o comportamento do material, as limitações do atual parâmetro de fadiga da especificação Superpave ($G^*sen\delta$) e os desenvolvimentos mais recentes no que tange aos ensaios de fadiga no ligante asfáltico. No capítulo 3, são apresentados os materiais e métodos de ensaio utilizados neste estudo.

O capítulo 4 apresenta os resultados e as discussões dos resultados dos ensaios de varredura de tempo e de varredura de amplitude linear. No capítulo 5, é apresentado o ordenamento dos materiais em termos dos parâmetros de fadiga. No capítulo 6, são abordadas algumas considerações adicionais encontradas no decorrer da pesquisa e que visam contribuir para o conhecimento do comportamento dos ligantes asfálticos à fadiga. O capítulo 7 apresenta as conclusões e as sugestões para pesquisas futuras seguida da lista de referências bibliográficas citadas no estudo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para o presente estudo foi feita uma revisão da literatura com o propósito de descrever o processo de fadiga nos pavimentos flexíveis e contextualizar ao leitor quanto à importância e alcance da presente pesquisa. Apesar deste estudo estar focado na fadiga no ligante asfáltico, é preciso conhecer como se manifesta a fadiga nos pavimentos, como é avaliado o processo de fadiga na mistura asfáltica e a contribuição que o ligante asfáltico tem no processo de fadiga. Neste capitulo, apresentam-se também as variáveis que incidem no processo de fadiga no ligante asfáltico, como as especificações atuais tentam controlar este fenômeno, e os desenvolvimentos mais recentes nos ensaios de fadiga no ligante asfáltico.

2.1. O PROCESSO DE FADIGA NOS PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

A fadiga é um processo caracterizado pela deterioração progressiva dos materiais quando são solicitados a tensões ou deformações repetidas. Nos materiais asfálticos usados em pavimentação rodoviária, estas tensões ou deformações são causadas pelo carregamento cíclico devido ao tráfego dos veículos. Estas solicitações, apesar de serem inferiores à resistência última do material, causam o seu dano progressivo com o tempo.

Este processo, reconhecido como um importante mecanismo de deterioração dos pavimentos (MONISMITH e WITCZAK, 1982), tem sido observado há muito tempo. Dentre os primeiros pesquisadores em relacionar determinados tipos de trincas com o carregamento cíclico do tráfego, estão Nijboer e Van der Poel (1953), Hveem (1955), Porter (1942) e Moavenzadeh (1971).

Segundo Rauhut e Kennedy (1982)[1] apud Fernandes Jr (1994) a fadiga é o tipo mais comum de deterioração dos pavimentos flexíveis, sendo também o mecanismo de ruptura que demanda a maior parcela de recursos nos serviços de manutenção e restauração de rodovias. Para Queiroz (1981), as trincas no revestimento são o principal mecanismo de deterioração observado nas rodovias brasileiras.

Existem diversos fatores que influenciam a deterioração por fadiga dos pavimentos. Dentre os mais importantes estão: magnitude das cargas, pressão de enchimento, o tipo de

---

[1] RAUHUT, J.B.; KENNEDY, T.W. (1982) Characterizing Fatigue Life for Asphalt Concrete Pavements. **Transportation Research Record** TRR 888, Transportation Research Board. Washington, D.C.

rodagem, o tipo de pneu, o tipo de eixo, o número de aplicações de carga, estrutura do pavimento e as propriedades da mistura asfáltica (FERNANDEZ JR, 1994).

O manual de identificação de defeitos do LTPP (Long Term Pavement Performance) descreve o trincamento por fadiga como aquele que ocorre em áreas de tráfego repetido (trilha de rodas), conforme ilustrado na Figura 1. Este manual classifica o trincamento por fadiga segundo três níveis de severidade: baixo, moderado e alto:

- baixo: trincamento sem nenhuma ou com poucas trincas conectadas, as fissuras não apresentam erosão nos bordos ou permanecem seladas, não há evidência de bombeamento;
- moderado: uma área de fissuras interconectadas começa a formar um padrão completo, as fissuras podem ter uma leve erosão nos bordos, mas permanecem seladas, não há evidência de bombeamento;
- alto: uma área considerável de fissuras abertas e interconectadas entre si formando um padrão completo, blocos de revestimento podem movimentar-se com o passagem do tráfego, o bombeamento é evidente (comumente identificadas como couro de jacaré).

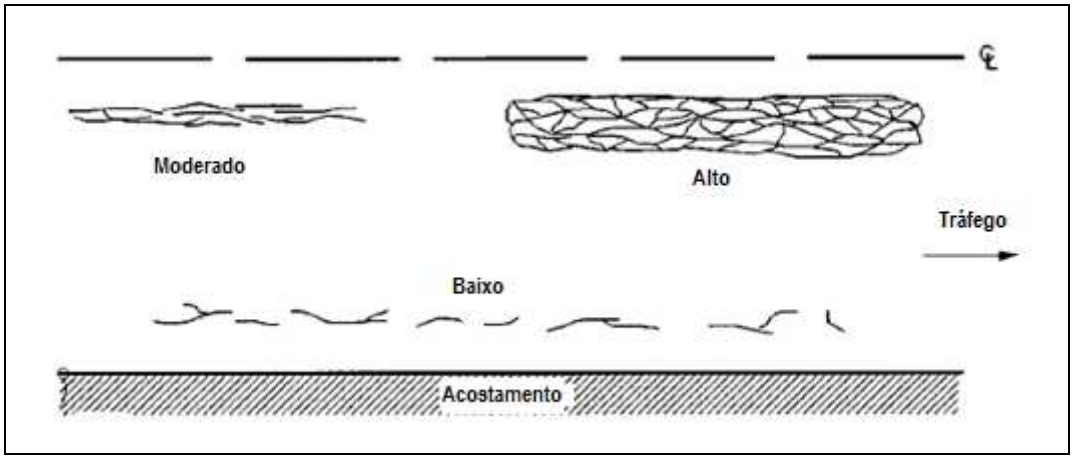


Figura 1. Identificação do trincamento por fadiga. (Adaptado do LTPP Miller e Bellinguer 2003)

A consideração do trincamento por fadiga nos pavimentos é importante por três aspectos principais. O primeiro é que este tipo de defeito diminui a capacidade estrutural pelo enfraquecimento da camada asfáltica e a exposição das camadas de base à umidade e outros contaminantes. O segundo aspecto está relacionado com a redução do coeficiente de atrito entre o pavimento e os pneus dos veículos, diminuido a segurança e reduzindo os níveis de serviço. A terceira é a migração de materiais à superfície que produz aumento dos níveis de

ruído, ocasionado pelo atrito entre os materiais, diminuindo os níveis de serviço. Estes aspectos levam a intervenções de manutenção inevitáveis e na maioria das vezes custosas (MARTONO, 2008).

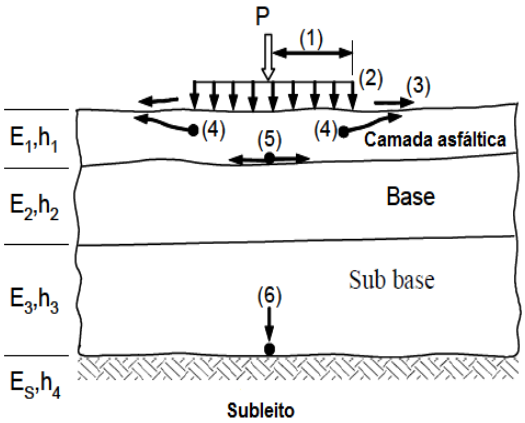
2.2. A FADIGA NO DIMENSIONAMENTO DOS PAVIMENTOS

Até o final da década de 1960, todos os métodos empregados no dimensionamento de pavimentos asfálticos eram empíricos. Os métodos empíricos apresentam a vantagem de basear-se na observação da realidade, mas têm o problema do número de casos estudados, que pode ser limitado, e nem sempre é possível a extrapolação a outros casos e condições diferentes. Estes métodos estão baseados na observação de pavimentos em serviço e principalmente nos resultados obtidos do comportamento de diferentes pavimentos asfálticos no AASHO *Road Test* (1956-1961). Após um extenso exame dos dados do AASHO *Road Test* foi proposto um método de dimensionamento que com diferentes modificações e melhoras foi usado por muitos anos, até surgir o novo método empírico-mecanístico da AASTHO em 2002 (PEREZ et al., 2005). Este novo foco empírico-mecanístico da AASTHO 2002 para dimensionamento prevê três principais tipo de defeitos: deformação permanente em todas as camadas do pavimento, trincamento de origem térmica e trincamento por fadiga. (EL-BASYOUNY e WITCZAK, 2005a).

A aparição dos métodos analíticos, principalmente a partir do desenvolvimento dos programas de computador que permitem obter o estado de tensões e deformações produzidas na camada asfáltica pela ação das cargas, tem proporcionado um grande avanço na análise dos pavimentos asfálticos. Estes métodos supõem que o pavimento é constituído por um conjunto de camadas apoiadas sobre o subleito. Supõe-se que todas elas, incluído o subleito, têm comportamento elástico. Atualmente, os programas de computador podem supor um comportamento mais complexo dos materiais, (viscoelástico, não-linear, plástico, e outros), mas uma hipótese simplificadora e comumente usada é supor o comportamento elástico linear dos materiais e analisar dois mecanismos de falha:

- falha por deformação permanente, por acúmulo de deformações plásticas produzidas nas camadas do pavimento e no subleito;
- falha por trincamento por fadiga, no caso dos pavimentos flexíveis com várias camadas é unicamente a camada asfáltica a que suporta este mecanismo de deterioração.

No caso das deformações permanentes as deformações consideradas são as que se produzem na direção da carga (ponto 6 na Figura 2) enquanto que no trincamento por fadiga, a deformação considerada é a horizontal na base da camada asfáltica (ponto 5 na Figura 2).



(1) Raio da área carregada

(2) Pressão dos pneus (pode ser não uniforme)

(3) Deformação ou tensão de tração na superfície

(4) Deformação cisalhante lateral

(5) Tensão ou deformação de tração na base da camada asfáltica

(6) Tensão, deformação ou deflexão vertical no topo do subleito

Figura 2. Respostas fundamentais dos pavimentos em função da carga, das propriedades dos materiais e das espessuras das camadas (Adaptado de Hass et al. 2007)

Apesar de não incluírem todos os parâmetros e interações, muitos modelos empírico-mecanísticos incluem os parâmetros de maior significância e, dessa forma, podem fornecer resultados aceitáveis, particularmente em situações onde as soluções aplicadas a projetos anteriores não são aplicáveis.

2.3. MODELOS DE PREVISÃO DE DESEMPENHO À FADIGA

Deacon (1965) foi o primeiro a propor que a ruptura das misturas asfálticas por fadiga poderia ser representado pela equação 1 que relaciona a deformação horizontal de tração na fibra inferior da camada asfáltica (ε_{ht}) e o número (N) de aplicações do eixo-padrão de 80 kN necessárias para produzir trincas de nível moderado (HAAS et al., 1994):

$$N = a\left(\frac{1}{\varepsilon_{ht}}\right)^{b} \qquad (1)$$

onde: *a* e *b* são coeficientes determinados experimentalmente.

A equação anterior sugere o desenvolvimento de uma deformação horizontal crítica na base da camada asfáltica. Esta deformação é a que inicia a ruptura por fadiga após certo número de repetições de carga. Segundo este modelo, as trincas desenvolvem-se sempre de baixo para cima, dentro da camada de revestimento.

Ao longo do tempo, foram propostas equações de ruptura como a desenvolvida pela empresa de consultoria *Austin Research Engineers* (A.R.E., 1975) com base nos dados do *AASHO Road Test* e em investigação laboratorial das propriedades estruturais de 27 seções de pavimento que apresentaram ao menos trincas classe 2 ou moderada.

$$N = 9{,}73 \cdot 10^{-15}\left(\frac{1}{\varepsilon_{ht,1}}\right)^{5{,}16} \qquad (2)$$

sendo o coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,93.

Pesquisadores como Finn et al. (1973) adotaram equações para previsão da evolução das trincas por fadiga que incluem o módulo de rigidez da camada asfáltica (*E*):

$$N = a\left(\frac{1}{\varepsilon_{ht}}\right)^{b} \cdot \left(\frac{1}{E}\right)^{c} \qquad (3)$$

onde: *a*, *b* e *c* são coeficientes determinados experimentalmente.

Com base no modelo proposto por Zube e Forsyth (1966), Pereira e Pereira (1989) fizeram uma adaptação para as condições brasileiras, que é utilizada pela norma para avaliação de pavimentos flexíveis DNER-PRO 10-79, mediante correções em função da temperatura e do método de ensaio para determinação da deflexão na superfície do pavimento (FERNANDEZ JR, 1994). O modelo fornece a vida de fadiga (N) em função da resposta estrutural de flexão superficial (δ1, em 0,01 mm) e da espessura do revestimento asfáltico (H1, em cm):

$$N = \left(\frac{19{,}33}{\delta 1}\right)^{5{,}96} \cdot (H1) - 3{,}28 \qquad (4)$$

No Brasil, Queiroz (1981) utilizou os dados da Pesquisa de Inter-Relacionamento de Custos de Construção, Conservação e Utilização de Rodovias (GEIPOT, 1980) para o desenvolvimento de equações para previsão do aparecimento e progressão de trincas por fadiga em pavimentos brasileiros. Ele utilizou dois modelos para o desenvolvimento das equações: um para a previsão do surgimento da primeira trinca e outro para previsão da velocidade de propagação das trincas ao longo do tempo.

A equação adotada para a previsão do número de repetições (N) do eixo-padrão de 80 kN necessárias para o aparecimento da primeira trinca classe 2 ou moderada é a seguinte:

$$\log(N) = 6{,}87 - 1{,}97 \cdot \log\left(\varepsilon_{vc,1} \cdot 10^{-4}\right) \qquad (5)$$

onde: $\varepsilon_{vc,1}$ é a deformação vertical de compressão na fibra inferior da camada asfáltica, sendo o coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,31.

A equação para previsão da evolução da porcentagem da área com trincas de classe 2 ou moderada (A_T) é função do número de repetições do eixo-padrão de 80 kN (N) e da tensão horizontal de tração na fibra inferior do revestimento ($\sigma_{ht,1}$):

$$A_T = 8{,}70 + 0{,}258 \cdot (\sigma_{ht,1}) \cdot (\log N) + 1{,}006 \cdot 10^{-7} \cdot (\sigma_{ht,1}) \cdot N \qquad (6)$$

considerando que: a unidade de $\sigma_{ht,1}$ é o kgf/cm^2, sendo o R^2desta equação é igual a 0,50.

Também no Brasil, o Departamento de Estrada de Rodagem do Estado de São Paulo (DER-SP) recomenda usar a equação 7 válida tanto para ensaios a tensão controlada quanto para ensaios à deformação controlada. A deformação ε_t corresponde à deformação de tração, nas fibras inferiores da camada asfáltica, N é o número equivalente de operações de eixo simples padrão de rodas duplas de 80 kN acumulado para o período de projeto; os coeficientes K e n são determinados por regressões lineares, particulares para cada tipo de mistura asfáltica e modificados para refletir o desempenho no campo.

$$N = K * \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^n \qquad (7)$$

Estudos feitos por Pinto e Pleusler (1980) usando um CAP de penetração 50/70 recomendam o emprego da equação anterior com o valor do parâmetro K igual a $2{,}85.10^{-7}$ e o valor do n igual a 3,69.

Na guia de projeto do método empírico-mecanístico da AASTHO (2002), dois tipos de trincamento por fadiga são considerados. As do primeiro tipo são as clássicas trincas que se propagam de baixo para cima comumente associadas com as trincas em forma de couro de jacaré. As do segundo tipo são as trincas que se propagam de cima para baixo que se manifestam na superfície na forma de trincas longitudinais (EL-BASYOUNY e WITCZAK, 2005b).

De acordo com o modelo de trincamento por fadiga proposto pela AASTHO 2002, a fadiga está baseada no conceito de dano acumulado. O dano é calculado como a relação entre as repetições de cargas previstas acumuladas do tráfego e o número de repetições de cargas admissíveis, conhecida como lei de Miner. O trincamento por fadiga é expresso em porcentagem. Teoricamente, o trincamento por fadiga ocorre quando o dano acumulado é 100%. A equação para calcular o dano por trincamento por fadiga é a seguinte:

$$D = \sum_{i=1}^{T} \frac{n_i}{N_i} \qquad (8)$$

onde: D= dano; T=número total de períodos; n_i = número de repetições no períodos i; N_i= número de repetições na falha ou admissível sobre as condições prevalecentes no período i;

A forma matemática geral para o número de aplicações de cargas repetidas no MEPDG (Mechanistic-empirical Pavement Desing Guide - AASTHO, 2002) segue o seguinte modelo, que é função da deformação de tração em determinada localização e do módulo da camada asfáltica (EL-BASYOUNY e WITCZAK, 2005b; NCHRP, 2004).

$$Nf = \beta_{f1} k_1 (\varepsilon_t)^{-\beta_{f3} k_2} (E)^{-\beta_{f3} k_3} \qquad (9)$$

onde: N_f= número de repetições ao trincamento por fadiga; ε_t =deformação de tração no ponto crítico; E= rigidez do material (psi); k_{f1}, k_{f2}, k_{f1}= constantes obtidas dos ensaios dos materiais em laboratório;

Os coeficientes β_{f1} , β_{f2} , β_{f3} são parâmetros de calibração a serem determinados segundo as condições locais e espessuras. Segundo a literatura, β_{f1} pode ser assumido como 1(um), a menos que a espessura da camada asfáltica seja menor que 3 polegadas. Como é

recomendado na literatura, a calibração deveria ser feita executando o software do MEPDG para combinações dos fatores β_{f2} e β_{f3} (KANG e ADAMS, 2007).

2.4. ENSAIOS DE FADIGA EM MISTURAS ASFÁLTICAS

As propriedades de fadiga dos materiais são expressas como a relação entre um critério de vida de fadiga escolhido arbitrariamente (associado ao número de aplicações de carga) e a correspondente tensão ou deformação (DIJK, 1975). Desde os primeiros estudos da falha por fadiga em metais foi deduzido que podia ser estabelecida uma relação logarítmica entre a tensão ou a deformação imposta e o número de solicitações (PEREZ et al., 2005):

$$\log(N_{\varepsilon}) = a - b \cdot \log(\varepsilon) \tag{10}$$

$$\log(N_{\sigma}) = a - b \cdot \log(\sigma) \tag{11}$$

onde: N_{ε} , N_{σ} = número de solicitações de carga aplicadas em um ensaio de fadiga a deformação ou tensão controladas; ε = deformação imposta, em um ensaio de fadiga a deformação controlada; σ =tensão imposta, em um ensaio de fadiga a tensão controlada. a, b, c e d = constantes da regressão características do material ensaiado

Essa lei tem sido aplicada para as análises do comportamento à fadiga de misturas betuminosas com diferentes tipos de ensaio. Os ensaios mais comuns podem ser agrupados em sete categorias (GUO, 2007):

(1) Flexão simples, com uma relação direta entre a vida de fadiga e a tensão/deformação desenvolvida por vigas submetidas a carregamento pulsante ou senoidal nos terços centrais ou no ponto central; vigas em balanço rotativas; vigas trapezoidal em balanço submetida a carregamento senoidal.

Deacon (1965) desenvolveu um aparelho de flexão a tensão controlada com dois pontos de carga. Kallas e Puzinauskas (1972) utilizaram diferentes corpos-de-prova no sistema de carregamento de Deacon, enquanto Pell (1962) utilizou o aparelho de ensaio rotativo em balanço. Esta técnica mede uma propriedade fundamental e os resultados podem ser usados diretamente no projeto estrutural do pavimento. As principais limitações do método são a validação dos resultados de laboratório quando comparados com o desempenho dos

pavimentos *in-situ*; além disto, o estado de tensão é essencialmente uniaxial e utiliza a teoria elástica.

(2) Flexão apoiada, com uma relação direta entre a vida de fadiga e a tensão/deformação desenvolvida por carregamento em vigas ou placas que são apoiadas de diferentes maneiras para simular diretamente os modos de carregamento *in-situ*, por vezes, para simular um estado de tensões mais representativo. O ensaio de fadiga em flexão apoiada consiste na colocação de um elemento de concreto asfáltico apoiado sobre uma superficie elástica, geralmente feita de borracha.

Embora este método simule melhor as condições de campo, o estado de tensão é predominantemente uniaxial e depende de como o corpo-de-prova é "preso" no aparelho de ensaio, não sendo possível submeter o material à inversão de tensões (BARKSDALE e MILLER, 1977).

(3) Axial, com relações diretas entre a vida de fadiga e a tensão/deformação desenvolvida pela aplicação de cargas pulsantes ou sinusoidais, uniaxialmente, com ou sem reversão da tensão. O método axial inclui apenas tração e tensão/compressão. À exceção da capacidade de simular os pulsos de carga observados no campo, este teste não representa bem as condições de campo. Raithby e Ramshaw (1972) utilizaram tração direta e de carga axial de compressão em amostras, enquanto Kallas (1970) aplicou tração, compressão, e a combinação de ambos, com as frequências de carga diversas.

(4) Diametral, com uma relação direta entre a vida de fadiga e a tensão/deformação desenvolvida por meio da aplicação de cargas pulsantes em corpos-de-prova cilíndricos na direção diametral. O teste diametral oferece um estado biaxial de tensões, o que possivelmente representa melhor as condições de campo. Um dos principais problemas com este método é que ele subestima significativamente a resistência à fadiga se a tensão de tração principal é utilizada como determinante do dano.

(5) Triaxial, com uma relação direta entre a vida de fadiga e a tensão/deformação desenvolvida por meio de testes semelhantes ao teste axial direto, mas com confinamento. Várias instituições, como a Universidade de Nottingham (PELL e BROWN, 1972; PELL e COOPER, 1975) e a Universidade da Califórnia-Berkeley (MCLEAN, 1974; SOUSA, 1986) desenvolveram este tipo de dispositivo para representar melhor o estado de tensões *in-situ*. A única preocupação sobre este tipo de teste é que as deformações cisalhantes

devem ser bem controladas, caso contrário a vida de fadiga prevista poderia ser consideravelmente diferente a dos resultados em campo.

(6) Ensaios usando princípios da mecânica da fratura para prever a resistência à fadiga. De acordo com este método, a fadiga consiste em três fases principais: a iniciação da fissura, o crescimento da fissura estável e a propagação de fissura instável. Admite-se que a segunda fase consome a maior parte da vida de fadiga. Consequentemente, os modelos quantitativos de fadiga baseados na mecânica da fratura foram propostos nesta fase (MAJIDZADEH et al, 1971; SALAM, 1971; MONISMITH e SALAM, 1973). Embora este método não exija a realização de um ensaio em particular e esta teoria explique bem a propagação de fissuras a baixas temperaturas, a sua aplicabilidade não é boa pela necessidade de uma quantidade considerável de dados experimentais.

(7) Ensaios de pista. Inclui ensaios em laboratório e arranjos em escala real, com uma relação direta entre a quantidade de fissuras, o número de aplicações de carga e a medida e/ou o calculo da tensão/deformação. Testes em escala real tanto para as configurações de faixas lineares quanto circulares têm sido usados. Atualmente há um grande número de instalações ativas de grande escala em todo o mundo. Uma síntese do NCHRP 235 e 325 (HUGO e EPPS, 2004; METCALF, 2005) resumiu a estado da arte.

Existem grandes diferenças entre a vida de fadiga obtida em diversos estudos (PORTER e KENNEDY, 1975). Isto é devido principalmente às diferenças nos métodos de ensaio, às condições de carga, às propriedades do material e às condições ambientais. Os mecanismos dos diferentes métodos de ensaios também diferem um do outro quanto à forma do carregamento, à distribuição de tensões, à forma de onda do carregamento, à frequência do carregamento, à deformação permanente e ao estado de tensões (GUO, 2007).

2.5. A FADIGA NO LIGANTE ASFÁLTICO

O papel que o ligante asfáltico tem dentro do processo de fadiga é de importância preponderante, pela capacidade de aglutinar os outros componentes da mistura asfáltica. A influência do ligante asfáltico no comportamento à fadiga das misturas asfálticas tem sido estudada por vários pesquisadores (DEACON et al., 1997; BAHIA et al., 2001a,b; TSAI e MONISMITH, 2005).

Os resultados dos ensaios de laboratório à fadiga em misturas asfálticas realizados por Deacon et al., (1997) mostraram que a resistência à fadiga deste materiais é dependente do tipo de ligante asfáltico. Resultados dos ensaios a deformação controlada feitos por Bahia et al., (2001 a,b) mostraram a relação entre a vida de fadiga de misturas asfálticas e a vida de fadiga do ligante asfáltico em ensaios de varredura de tempo. Os resultados apresentados na Figura 3 mostram a relação entre a vida de fadiga média das misturas asfálticas e do ligante asfáltico, determinados com o critério de falha do número de ciclos no qual se tem uma redução do módulo inicial de 50%. Como se observa na figura, há uma boa correlação (R^2=0,84) para os nove ligantes asfálticos testados. Estes resultados motivaram o desenvolvimento de novos ensaios de fadiga do ligante asfáltico. A partir desses resultados, o estudo da fadiga no ligante se mostra promissor, podendo chegar a ser um bom indicador da vida de fadiga da mistura asfáltica.

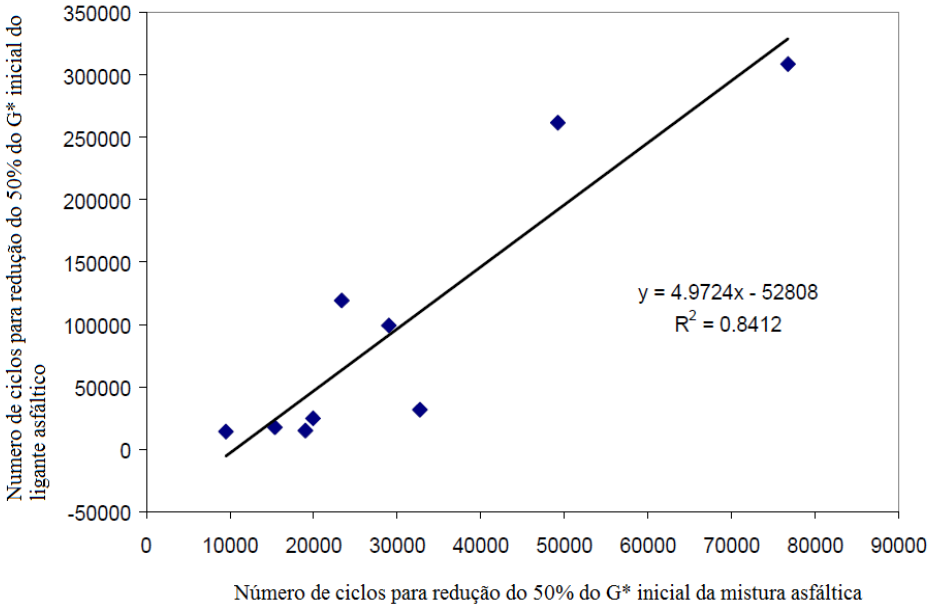


Figura 3. Correlação entre a vida de fadiga do ligante asfáltico e a vida de fadiga média de misturas asfálticas medidas na mesma temperatura (Adaptado de Bahia et al. 2001b)

Tsai e Monismith (2005) analisaram o efeito das variáveis mais importantes no comportamento à fadiga nos pavimentos asfálticos. Estes autores realizaram ensaios de fadiga em misturas asfálticas e simulações do comportamento à fadiga de estruturas de pavimento considerando várias situações ambientais. Eles concluíram que a variável ligante asfáltico e a variável interação da estrutura com o ligante asfáltico têm impacto no comportamento à fadiga.

2.5.1. Especificações dos ligantes asfálticos quanto à fadiga

A especificação Superpave para ligantes asfálticos resultante do programa *Strategic Highway Research Program* (SHRP), está baseada no desempenho e tenta abordar a maior parte dos defeitos encontrados nos pavimentos asfálticos: trincas por fadiga, deformação permanente e trincamento de origem térmica (DEACON et al., 1997). O parâmetro associado à fadiga no ligante asfáltico, nesta especificação, é o G" (G*senδ), medido no material envelhecido a longo prazo no Pressure Aging Vessel (PAV) na temperatura intermediária do pavimento. O parâmetro G*senδ é um indicador da energia total dissipada durante carregamento cíclico (WEN e BAHIA, 2009).

O uso do parâmetro G*senδ para controlar a fadiga foi baseado em parte nos resultados de ensaios feitos à deformação controlada, em misturas asfálticas com dois agregados de referência e oito ligantes asfálticos, durante o programa SHRP. Estes estudos indicaram que a vida de fadiga das misturas asfálticas no laboratório é função do parâmetro $G_o$senδ, que é o módulo de dissipação no carregamento sinusoidal. Assim pareceu lógico usar G*senδ no ligante asfáltico como parâmetro para controlar a fadiga na mistura asfáltica, desde que esta seja atribuída ao ligante. Dados muitos limitados dos ligantes asfálticos usados na pista de testes de Zaca-Wigmore (California-EUA) sugeriram que para este parâmetro era apropriado o valor máximo de 5000 kPa (DEACON et al., 1997).

Assim, na especificação Superpave, o valor do G*senδ é limitado ao valor máximo de 5000 kPa na temperatura intermediária do grau de desempenho (PG), a 10 rad/s, na condição envelhecida no PAV. Recentemente, foram incorporados nesta especificação, segundo a AASHTO 320-09, os níveis de tráfego no limite daquele valor, sendo o valor máximo de 5000 kPa para o nível de tráfego padrão "S" (menos de 10^7 solicitações do eixo-padrão), e máximo de 6000 kPa para os tráfegos pesado "H" (entre 10^7 e $3*10^7$ solicitações do eixo-padrão) e muito pesado "V" (acima de $3*10^7$ solicitações do eixo padrão).

Pesquisas posteriores mostraram que o parâmetro G*senδ não é efetivo para caraterizar a resistência à fadiga de pavimentos asfálticos, especialmente na medida em que mais ligantes asfálticos modificados foram ensaiados quanto a seu comportamento à fadiga (BAHIA et al., 1999).

Uma das principais conclusões do projeto NCHRP 9-10 é que a especificação AASHTO MP1 (original da especificação Superpave) não é exata para classificar ligantes asfálticos modificados de acordo com a sua contribuição para a resistência ao dano na mistura

asfáltica (BAHIA et al., 2001a). Esta não foi uma nova descoberta, mas sim uma confirmação de muitas preocupações que as agências rodoviárias dos estados norte americanos e da indústria tinham manifestado desde a implementação da especificação Superpave em 1993. Os resultados apontaram que o parâmetro medido sob pequenas deformações e alguns ciclos de carregamento não é confiável na estimativa do comportamento ao dano de ligantes asfálticos modificados e não modificados. Estes resultados também indicaram que o uso simplista do conceito de energia dissipada na derivação do G*senδ para a fadiga foi equivocado porque esta energia dissipada representa principalmente o amortecimento viscoelástico e não, necessariamente, a energia dissipada no dano por fadiga (DELGADILLO e BAHIA, 2005).

Levando em conta as considerações anteriores e ante a falta de uma boa correlação deste parâmetro do ligante asfáltico com a vida de fadiga da mistura asfáltica (Figura 4) nos ensaios feitos por (BAHIA et al., 2001a), ficou demonstrada a necessidade de procurar um ensaio que represente melhor a resistência à fadiga do ligante asfáltico.

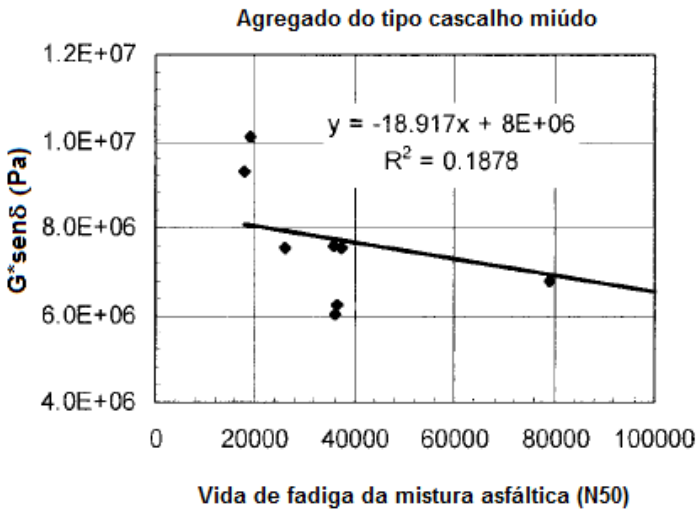


Figura 4. Correlações entre o parâmetro G*senδ e a vida de fadiga da mistura asfáltica medida a 10Hz na temperatura intermediária (Adaptado de Bahia et al. 2001a).

No ítem 2.8 são descritos os ensaios mais importantes na caracterização da vida de fadiga dos ligantes asfáticos e que, como dito antes, visam substituir o atual parâmetro de fadiga da especificação (G*senδ).

2.5.2. Limitações do atual parâmetro de fadiga da especificação Superpave

Análises de regressão feitas por Deacon et al., (1997) foram usadas para relacionar o módulo de dissipação (G*senδ) com a vida de fadiga em laboratório a 20°C e frequência de 10Hz. Observou-se que o incremento do módulo de dissipação foi acompanhado de reduções bastante significativas da resistência à fadiga da mistura asfáltica. Eles afirmam que o módulo de dissipação de ligantes asfálticos envelhecidos fornece uma boa indicação da resistência à fadiga de misturas asfálticas idênticas. Assim, o módulo de dissipação se mostra, à primeira vista, como um parâmetro promissor para ser incluído nas especificações do ligante asfáltico.

Deacon et al. (1997) analisaram 18 estruturas de pavimentos por meio de simulações do comportamento dos materiais no campo, mostrando que a vida de fadiga simulada melhorou tanto para módulos de dissipação baixos quanto para altos. O desempenho dos pavimentos simulados se mostrou mais baixo nos níveis intermediários do módulo de dissipação, (na faixa de 2000 a 4000 kPa).

Análises feitas por Tsai e Monismith (2005) na avaliação da influência de 9 ligantes asfálticos, sobre o desempenho à fadiga dos pavimentos para uma gama representativa de estruturas, condições ambientais e cargas de tráfego, chegaram a conclusões similares às obtidas por Deacon et al. (1997), no sentido de que o parâmetro da atual especificação (G*senδ) não garante um comportamento adequado do material. Nos resultados obtidos por eles, as propriedades do ligante asfáltico avaliadas não diferenciaram o desempenho das misturas asfálticas nas estruturas analisadas e o parâmetro G*senδ não apresentou um padrão de comportamento consistente. Na opinião daqueles autores o atual requisito de fadiga da especificação Superpave é inapropriado. Embora valores baixos do módulo de dissipação (G*senδ), de modo geral, melhoraram a vida de fadiga das misturas asfálticas sob deformação controlada, os efeitos do módulo de dissipação nas simulações de campo não são tão simples.

Outros resultados dos estudos feitos por El-Basyouny e Witczac (2005a) mostram que para camadas asfálticas muito delgadas (1 polegada de espessura), a melhor mistura asfáltica é aquela que apresenta menor rigidez. Na medida em que a mistura é mais rígida, a quantidade de trincas que se propagam de baixo para cima devidas à fratura por fadiga aumenta consideravelmente. Em essência, se são usadas camadas asfálticas muito finas deve se empregar uma mistura asfáltica mais flexível, ou seja, altos teores de ligante asfáltico, pequenos tamanhos nominais de agregados minerais e ligante asfáltico mais mole. Para camadas espessas (10 polegadas de espessura), o efeito pode ser oposto ao encontrado para as

camadas asfálticas delgadas, ou seja, o dano por fadiga aumenta na medida em que diminui a rigidez da mistura asfáltica.

Além disso, autores como Deacon et al. (1997) também destacam o conflito básico entre a atual especificação Superpave, que define um limite máximo no módulo de dissipação, e simulações de desempenho de campo, que sugerem que módulos maiores são benéficos para a maioria das estruturas de pavimentos.

Outra limitação do parâmetro G*senδ está relacionada ao fato deste parâmetro ser calculado com base na energia dissipada inicial (W_i), calculada depois de poucos ciclos de carregamento, ao passo que o acúmulo de dano por fadiga acontece após de vários ciclos de carregamento (DELGADILLO e BAHIA, 2005). Segundo Bahia et al. (2001a) este parâmetro é medido na faixa viscoelástica-linear, a deformação controlada e com poucos ciclos, o que impede uma estimativa do comportamento ao dano por fadiga no ligante asfáltico. Isto explica as baixas correlações que o parâmetro G*senδ tem com o comportamento à fadiga da mistura asfáltica.

2.6. VARIÁVEIS QUE AFETAM A FADIGA DOS MATERIAIS ASFÁLTICOS

O comportamento à fadiga do ligante asfáltico é influenciado por vários fatores, que estão relacionados com as condições as quais o ligante asfáltico será submetido durante sua vida de serviço. As principais variáveis identificadas são: o modo de aplicação de carga, a taxa de carregamento, o nível de deformação, a temperatura, o tipo de ligante asfáltico e de modificador e o efeito dos períodos de recuperação (*healing).*

2.6.1. Modo de aplicação do carregamento

Umas das razões que dificultam o entendimento do processo de fadiga é que os resultados dos ensaios de fadiga são dependentes do modo de carregamento. Os ensaios de fadiga nos materiais asfálticos são frequentemente realizados sob dois modos de carregamento: deformação ou tensão controlada. Quando o material é ensaiado à deformação controlada, a deformação imposta é mantida constante, variando a tensão ou carga durante o ensaio. Quando o material é ensaiado a tensão controlada a tensão ou carga é mantida constante registrando-se a deformação produzida.

Estudos como os de Christensen e Anderson (1992) mostram que, em ensaios a deformação controlada, ligantes asfálticos com baixa rigidez (para determinadas condições de tempo de carregamento e de temperatura) poderiam ter melhor comportamento à fadiga que ligantes mais rígidos. A tensão controlada ocorre o contrario: ligantes asfálticos mais rígidos poderiam se comportar melhor.

Com base em várias observações, a equipe de pesquisadores do SHRP A-002 indicaram o modo de deformação controlada como o modo de carregamento considerado crítico no campo. Historicamente, a fadiga tem sido associada com a rigidez dos ligantes asfálticos, seja porque são rígidos desde o começo ou porque tenham endurecido por causa do envelhecimento oxidativo. (CHRISTENSEN e ANDERSON, 1992).

Adicionalmente, a situação considerada como crítica é quando o pavimento está suportado por camadas inferiores fracas e está sujeito a tráfego pesado. Sob estas condições, o processo seria do tipo deformação controlada, sendo as deflexões e deformações controladas pelas deflexões das camadas inferiores (CHRISTENSEN e ANDERSON, 1992). Estes autores concluíram que o modo de deformação controlada é o crítico para predizer o desempenho do ligante asfáltico em aplicações de pavimentação. Sob deformação controlada, existe uma forte tendência a melhorar a resistência à fadiga com a diminuição da rigidez do ligante asfáltico.

2.6.2. Taxa de carregamento ou frequência

A resposta dos materiais, particularmente dos viscoelásticos, é dependente da taxa de carregamento ou frequência, sendo um fator a considerar na determinação da vida de fadiga dos ligantes asfálticos e das misturas asfálticas (BAHIA et al., 2001; MARTONO e BAHIA, 2003).

A frequência está relacionada com a velocidade do tráfego, a qual pode variar significativamente em campo. Frequências altas estão relacionadas a velocidades de tráfego altas e frequências baixas a velocidades de tráfego baixas. Para 60 mph (96,5 km/h) a frequência equivalente do ensaio seria 10 Hz. Para tráfego lento (15 mph ou 24,1 km/h) a frequência é de 2,5 Hz (DELGADILLO e BAHIA, 2005).

Resultados dos ensaios de fadiga a deformação controlada realizados por Bahia et al. (1999), em ligantes asfálticos modificados, nas frequências de 0.1, 1 e 10 Hz com 20% de

deformação, mostraram quão expressivo é o efeito da frequência. Segundo os autores, para o ligante asfáltico modificado com polietileno testado na frequência de 10 Hz, após 3000 ciclos, o módulo complexo G* se diminuiu em torno de 10 vezes em relação ao modulo inicial, ao passo que a variação de G* com o número de ciclos é menor na frequência de 1 Hz com o mesmo nível de deformação. Os resultados dos ensaios indicam que a variação do módulo com o número de ciclos é mais expressiva para frequências altas.

2.6.3. Nível de deformação

O comportamento à fadiga dos ligantes asfálticos é altamente dependente dos níveis de carga aplicados. Altas deformações (ou tensões) levam o material mais rapidamente à falha (BAHIA et al., 2001a). Esta condição é usual em estruturas de pavimentos delgados, onde os níveis de deformações são altos (DELGADILLO e BAHIA, 2005).

O parâmetro da especificação Superpave (G*senδ) não considera a carga aplicada ao ligante asfáltico na caracterização por fadiga. A consideração da estrutura de pavimento pode levar em conta as diferenças entre estruturas de pavimentos fracos e fortes. Desta maneira a imprecisão devida à não consideração da condição do pavimento poderia ser corrigida. Além disto, estimar o domínio das deformações em que o ligante asfáltico está submetido dentro da mistura asfáltica é uma tarefa complexa (BAHIA et al., 1999). Experimentos feitos por aqueles autores mostram que a aplicação de 1% de deformação cisalhante na mistura asfáltica pode resultar em deformações do ligante asfáltico na faixa de 0,3 a 32%.

2.6.4. Temperatura

As propriedades do ligante asfáltico são dependentes da temperatura, sendo o aumento da temperatura capaz de tornar o ligante asfáltico menos rígido. A rigidez do material poderia estar associada com o seu comportamento à fadiga. Esta hipótese está implícita na especificação Superpave pela limitação a um valor máximo do parâmetro G*senδ. Anderson et al. (2001) apontam que é razoável assumir que a vida de fadiga é incrementada com o aumento da temperatura se os ensaios são feitos no mesmo nível de deformação. Resultados dos ensaios de fadiga em ligantes asfálticos modificados no reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR), realizados por aqueles autores, mostram que a vida de fadiga é incrementada com a temperatura até um valor máximo depois do qual esta decresce.

Bonnetti et al. (2002) verificaram, por meio de ensaios de fadiga no ligante asfáltico, que existe um efeito significativo da temperatura na vida de fadiga do material, mas esse efeito é altamente dependente do tipo de modificador dos níveis de tensão usados.

Por outro lado Bodin et al. (2004) conduziram um estudo onde são analisadas as mudanças na temperatura do material ao longo dos ensaios de fadiga no ligante asfáltico. Estas mudanças de temperatura poderiam estar relacionadas com o processo de dissipação de energia durante o ensaio. Os resultados dos ensaios de varredura de deformação feitos por eles mostraram como a uma frequência de 25Hz a temperatura do ligante começou a aumentar a partir de 0,004 de deformação nas condições do ensaio. Na varredura de deformações a 1 Hz, aparentemente não existem efeitos de temperatura observados, mesmo dentro da região não-linear. Isto significa que os efeitos da temperatura somente interferem na combinação de altas frequências e altas deformações. Eles também concluem que o critério de falha baseado na taxa de energia dissipada (explicado no item 2.8.1) aparentemente não tem interferência das mudanças de temperaturas iniciais e poderia estar mais claramente relacionado com o fenômeno de fadiga. É interessante notar que este aumento de temperatura poderia ter relação com o fenômeno de fratura de borda, que será explicado mais adiante no item 2.8.2.

2.6.5. Tipo de ligante e modificador

A identificação de qual modificador proporciona o melhor desempenho nos pavimentos e de quais causas levam determinados modificadores a apresentarem os melhores resultados tem sido muito difícil (BONETTI et al., 2002). Estudos feitos por Bahia et al. (1999) indicaram que o comportamento à fadiga varia segundo o tipo de ligante asfáltico, evidenciando que a composição química tem um profundo efeito no comportamento à fadiga. Neste estudo, os autores mostraram uma diferença significativa no comportamento à fadiga pela adição de diferentes modificadores (SBS-linear, SBS-radial, SB-diblock, EVA, Polietileno e EMA) a um ligante asfáltico puro de classificação PG 58. Os resultados dos ensaios de varredura de tempo feitos a deformação controlada de 20% destes autores, mostraram que a modificação aumentou a resistência ao dano por fadiga.

Os resultados dos ensaios feitos por Hintz (2012) utilizando o procedimento de ensaio de varredura de amplitude linear modificado (LAS), mostram os benefícios da modificação de ligantes asfálticos quanto à tolerância ao dano. Esta autora analisou o efeito dos

modificadores SBS e polietileno (PE), utilizando um ligante de base PG 64-22 e constatou o incremento na vida de fadiga por conta da adição destes modificadores.

Os benefícios da modificação dos ligantes asfálticos também são mostrados nos estudos feitos por outros autores, por meio de ensaios de varredura de tempo. Bonetti et al., (2002) avaliou a vida de fadiga de ligantes asfálticos modificados por SB, SBS radial, SB di block, borracha moída e EVA, em ensaios de varredura de tempo feitos em dois níveis de frequência (10rad/s e 10Hz) a deformação e a tensão controladas. Os resultados deste estudo mostram também que o efeito dos modificadores varia significativamente dependendo das condições de ensaio.

Anderson et al., (2001) mostrou por meio de ensaios de varredura de tempo a deformação controlada que a vida de fadiga de ligantes asfálticos modificados por SB(4%) e EVA(4%) é incrementada com a adição destes modificadores. Resultados dos ensaios de fadiga feitos por Youtcheff et al. (2004) em misturas asfálticas utilizando o ensaio de flexão em viga de quatro pontos e o critério da redução de 50% da rigidez, mostram o incremento da vida de fadiga por conta dos modificadores: Elvaloy (2,2%), SBS (3,75%) , EVA (5,5%) e borracha moída (5,0%), destacando como o de melhor comportamento o ligante asfáltico modificado com Elvaloy.

2.6.6. Geometria da amostra

Alguns pesquisadores (ANDERSON et al., 2001; SOENEN et al., 2004) têm expressado suas preocupações acerca do uso da geometria de placas paralelas para caracterização da fadiga dos ligantes asfálticos no DSR. Anderson et al. (2001) afirmaram que o DSR não é apropriado para avaliar o comportamento à fadiga do ligante asfáltico por causa de um fenômeno que eles denominam instabilidade de fluxo e efeitos da fratura de borda (explicados no item 2.8.3.). Soenen et al. (2004) mencionaram que o DSR é adequado para determinar a vida de fadiga no ligante asfáltico mas somente pode ser usado para avaliar as propriedades da fadiga em estreitos valores de rigidez ou temperatura. A rigidez precisa ser suficientemente alta para evitar os efeitos de borda e fluxo, mas não pode ser demasiadamente alta por causa dos erros de compliância do equipamento.

Anderson et al. (2001) têm sinalado que neste tipo de ensaio, os efeitos de borda influenciam os resultados da vida de fadiga dos ligantes asfálticos. No entanto, este problema

foi analisado em um estudo da Universidade Wisconsin em conjunto com a FHWA (*Federal Highway Administration*) e a MTE (*Mathy Technology and Engineering, Inc*). A pesquisa, solicitada pelos ETG (*Experts Task Group*) de ligantes asfalticos do TRB (*Transportation Reseach Board*), comparou a vida de fadiga de ligantes asfálticos usando a geometria de placas paralelas com a vida de fadiga de mástiques usando o ensaio de torção em amostra cilíndrica (MARTONO et al., 2004). Neste estudo, foram ensaiados dois ligantes puros e três ligantes modificados, a 25 e 10ºC. Os resultados do estudo mostraram ordenamentos similares usando a geometria de placas paralelas no ligante asfáltico e na amostra cilíndrica. Se a tendência é confirmada, pode-se assumir que os efeitos de borda não têm um efeito significativo no ensaio de fadiga no ligante asfáltico ao usar a geometria de placas paralelas Martono (2008) mostrou ordenamentos similares da vida de fadiga utilizando a geometria de placas paralelas e a amostra cilíndrica de mástiques, o que evidencia que o fenômeno de fratura de borda não afeta significativamente os ensaios de fadiga no ligante asfáltico.

2.6.7. Envelhecimento

As propriedades reológicas do ligante asfáltico mudam ao longo do tempo. Tais mudanças ocorrem durante a produção e continuam durante o tempo de serviço. Este fenômeno se traduz em um enrijecimento do ligante asfáltico que pode afetar a vida de fadiga do material.

Pesquisadores do programa SHRP constataram que a estufa de filme fino rotativo (TFOT) poderia ser usada para simular o efeito do envelhecimento durante o processo de usinagem e compactação e que o envelhecimento no PAV (Preassure Aging Vessel) por 20 horas do resíduo do material envelhecido no RTFOT poderia simular o envelhecimento que sofre o ligante asfáltico ao longo de 5 anos de serviço.

Ensaios de fadiga realizados por Bahia et al. (1999) em um ligante asfáltico virgem mostraram a mudança no comportamento à fadiga depois do envelhecimento no PAV. Os resultados dos ensaios de varredura de tempo feitos por aqueles autores mostraram que o envelhecimento no PAV aumentou o dano por fadiga, particularmente a baixos níveis de deformação.

Segundo Soenen e Eckmann (2000), o dano por fadiga é aumentado com o aumento da deformação, especialmente para ligantes asfálticos oxidados e envelhecidos. Após o

envelhecimento, os coeficientes angulares da reta dos modelos de fadiga são maiores. Amostras envelhecidas mostraram maior resistência à fadiga a baixos níveis de deformação, mas para altos níveis de deformação as amostras envelhecidas são mais propensas à falha por fadiga.

2.6.8. Efeitos dos períodos de recuperação (*healing*)

No ligante asfáltico, quando se tem um carregamento aplicado, seguido de um período sem carregamento (tempo de relaxação), o dano por fadiga que acontece no material durante os períodos de carregamento é recuperado. Este fenômeno é conhecido como *healing*. Esta capacidade de recuperação nos ligantes asfálticos está relacionada com a componente viscosa da rigidez do ligante asfáltico G*senδ (BABURAMANI, 1999).

Conceitos de energia da fratura têm sido usados para estimar os fatores de translação entre laboratório e campo (AL-BABBISSI e LITTE, 1990) pela influência do *healing*. Tseng e Lytton (1990) sugerem que a melhora na vida de fadiga devida aos tempos de relaxação pode estar relacionada às diferenças nas energias de fratura necessárias para obter uma abertura de fissuras equivalente em carregamento contínuo e descontínuo (depois de um período de relaxação).

Aqueles autores estudaram a contribuição dos fatores de translação devidos aos períodos de relaxação e verificaram que os fatores de translação entre as medidas da vida de fadiga em laboratório e a vida de fadiga em serviço poderiam ser atribuídos à recuperação do micro-dano do ligante asfáltico, durante os períodos de recuperação entre as cargas de tráfego. Além disso, concluíram que a magnitude dos fatores de translação é dependente do número de períodos de relaxação entre cargas de tráfego, ou seja, quanto mais curtos os períodos de relaxação (tráfego mais frequente), menores os fatores de translação. A redução da vida de fadiga com o incremento da frequência da carga tem sido explicada com base na hipótese de que há menos tempo para a recuperação da mistura asfáltica (KONG KAM WA et al., 1997).

O manual da Shell (1978) sugere que os efeitos de recuperação e carregamento intermitente (períodos de relaxação entre carregamentos sucessivos de tráfego) podem resultar em maior aumento da vida de fadiga com fatores na faixa de 2 a 10, dependendo do tipo de mistura asfáltica (fatores baixos para misturas asfálticas abertas e fatores altos para misturas densas). Um fator de 4 foi atribuído para os efeitos de recuperação na Holanda (GROENENDIJK et al., 1997).

Outros pesquisadores como Goodrich (1988, 1991), Christensen e Anderson (1992), Smith e Hesp (2000) e Kim et al. (2003) têm usado a análise dinâmico mecânica (*dynamic mechanical analysis* DMA) para caracterizar misturas asfálticas submetidas a carregamento com intervalos de relaxação. Estes estudos incluíram aspectos relacionados às geometrias da amostra usada, a composição da amostra e a seqüência de aplicação de carga (incluindo os períodos de relaxação). Castro e Sanchez (2006) usaram o corpo-de-prova retangular, diferente do DMA, para seus ensaios de fadiga. Todas as pesquisas mostraram que os períodos de relaxação podem aumentar a vida de fadiga (TAN et al., 2007).

Para o ligante asfáltico, há poucas pesquisas que incluam características de carregamentos com intervalos de relaxação. Dois tipos de ensaio são comumente usados para analisar a influência dos tempos de relaxação no ligante asfáltico: armazenamento-recuperação e carregamento intermitente. No ensaio de carregamento intermitente os períodos de relaxação estão incluídos dentro dos ciclos de fadiga, ao passo que no ensaio de armazenamento-recuperação um longo período de relaxação é aplicado após um determinado grau de dano (BODIN et al., 2004). Estes autores confirmaram por meio de ensaio de fadiga com carregamento intermitente que existe uma recuperação como consequência do aumento do módulo nos períodos de recuperação, o que poderia ter um efeito benéfico no aumento da vida de fadiga dos ligantes asfálticos. Segundo Baburamani (1999), os ligantes asfálticos mais duros têm maior dificuldade para se recuperar. De acordo com Tayebally et al. (1993), pavimentos sem fissuras e de longa vida normalmente são compostos por ligantes asfálticos moles.

O estudo feito por Bahia et al. (1999) mostrou efeitos significativos dos períodos de relaxação no dano por fadiga de ligantes asfálticos testados no DSR. Os autores ensaiaram um ligante asfáltico puro aplicando 5000 ciclos durante 30 minutos seguidos de ensaio e depois com um período de relaxação de 12 horas. Os resultados confirmaram que o *healing* tem um efeito significativo na recuperação do dano por fadiga e que esta recuperação é dependente do tempo.

Outras pesquisas mostram que a vida de fadiga é maior quando se tem carregamentos com intervalos de relaxação do que quando se tem carregamento contínuo, existindo, assim, uma recuperação do ligante asfáltico durante o tempo de relaxação (TAN et al., 2007). Nos ensaios feitos por aqueles autores no DSR, após o período de relaxação, o módulo complexo tende a aumentar e a energia dissipada e o ângulo de fase diminuem. Assim, períodos de

relaxação poderiam prolongar a vida de fadiga do ligante asfáltico, sendo esta capacidade de recuperação incidente sobre o comportamento à fadiga dos pavimentos asfálticos.

2.7. CONCEITO DE ENERGIA DISSIPADA

No passado, alguns pesquisadores como Heukelom (1966) fizeram esforços para descrever o comportamento à fadiga com base em considerações de energia. Quedevile (1971) publicou seus resultados experimentais acerca de energia dissipada em ensaios de cisalhamento em ligantes asfálticos puros. Dijk (1975) mostra que existe uma correlação entre o número de aplicações de tensões à fratura e o total de energia dissipada neste ponto. Para os cálculos da energia total, ele assume que a energia dissipada por ciclo durante o ensaio a tensão controlada é mantida constante.

A energia dissipada é medida em laboratório com o ensaio dinâmico de viga, onde as ondas de tensão e deformação são sinusoidais. Neste ensaio dinâmico, a energia dissipada por unidade de volume por ciclo (W_0) é expressa como:

$$W_0 = \pi \cdot \sigma_0 \cdot \varepsilon_0 \cdot sen\phi_0 \qquad (12)$$

onde: σ_0 = amplitude da tensão; ε_0 = amplitude de deformação; ϕ_0 = ângulo de fase.

A definição é baseada na definição de potência. No ensaio de fadiga onde a amplitude da deflexão durante o ensaio permanece constante, a amplitude da força poderia diminuir indicando que o módulo de rigidez muda durante o ensaio.

Por outro lado, em um ensaio em que a amplitude da força permanece constante, a amplitude de deflexão poderia aumentar. O ângulo de fase durante o ensaio de fadiga também poderia mudar. Para determinar a energia total dissipada por unidade de volume é integrada a função força ou deflexão. Para este fim, a escala de tempo da função força e a função do ângulo de fase é dividida em intervalos fixos de ciclos de carga constante. A energia dissipada W_i nesse intervalo é calculada usando os valores médios para tensão, deformação e ângulo de fase.

$$W_i = \pi \cdot N_i \cdot \overline{\sigma}_i \cdot \overline{\varepsilon}_i \cdot sen\overline{\phi}_i \qquad (13)$$

onde: N_i é o número de aplicações de carga no intervalo de tempo.

Deste modo, a energia total dissipada por unidade de volume é determinada pelo somatório:

$$W_t = \sum_{i=1}^{n} W_i \qquad (14)$$

Este conceito, tempos depois, foi aplicado para determinar a energia dissipada nos ensaios de fadiga nos ligantes asfálticos (Ver item 2.8.1)

2.8. PRINCIPAIS ENSAIOS DESENVOLVIDOS PARA A DETERMINAÇÃO DA VIDA DE FADIGA NO LIGANTE ASFÁLTICO

Como foi mostrado anteriormente, diversos estudos têm indicado que a adoção do controle da rigidez do ligante asfáltico, limitado pelo valor máximo do parâmetro de dissipação G*senδ da especificação Superpave, não é apropriado para relacionar o comportamento à fadiga dos ligantes asfálticos usados em pavimentação, (DEACON et al., 1997; ANDERSON et al., 2001; TSAI e MONISMITH, 2005; JOHNSON, 2010; BAHIA et al., 1999, 2001; SHENOY, 2002). Alguns pesquisadores (DEACON et al., 1997) inclusive têm sugerido que o parâmetro deve ser eliminado da especificação Superpave.

Atualmente, existem diversas abordagens e diferentes ensaios desenvolvidos com o intuito de entender melhor o comportamento do ligante asfáltico à fadiga e, consequentemente, controlar o desempenho dos materiais frente a este mecanismo de deterioração. Como alternativas ao atual parâmetro de fadiga da especificação Superpave, têm surgido outros procedimentos de ensaio que visam substituí-lo, procurando superar a sua deficiência para representar e controlar o fenômeno. Os principais ensaios são o ensaio de varredura de tempo (time sweep) e o ensaio de varredura de amplitude linear (LAS).

2.8.1. Varredura de tempo (*time sweep*)

O teste de varredura de tempo ou *time sweep* foi desenvolvido durante o NCHRP *Project* 9-11(BAHIA et al., 2001a), no intuito de resolver as deficiências do parâmetro de fadiga da especificação Superpave. O ensaio é baseado na definição de dano por fadiga como a degradação da integridade do material pela ação de cargas repetidas. Neste procedimento, é possível escolher a amplitude da carga que será aplicada, o que permite levar em consideração a estrutura do pavimento e as cargas devidas ao tráfego (HINTZ et al., 2011).

O ensaio é feito no reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR) e foi sugerido como o procedimento mais adequado para aplicação de cargas repetidas a uma temperatura e uma frequência selecionadas, de modo a induzir dano no ligante asfáltico (BAHIA et al., 2001a).

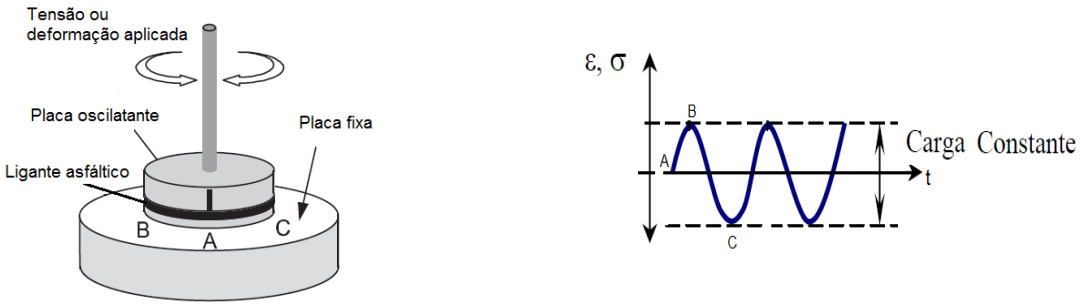


Figura 5. a) Esquema do ensaio oscilatório no DSR e b) Carregamento no ensaio de varredura de tempo.

A temperatura de ensaio é normalmente a temperatura intermediária do grau de desempenho (PG) e é usada a geometria de placas paralelas (Figura 5a) de 8 mm de diâmetro com o espaçamento entre as placas de 2 mm. O procedimento de ensaio realizado no DSR consiste na aplicação de carregamentos cíclicos em regime oscilatório, feitos a deformação ou tensão controlada e em uma frequência fixa (Figura 5b).

Existem vários critérios de falha neste ensaio, os quais estão baseados na observação das propriedades viscoelásticas do material. Inicialmente, o critério de falha ou ponto de fadiga foi definido arbitrariamente como o número de ciclos completados quando o módulo complexo, G*, é igual a 50% do módulo complexo inicial, G^*_i (SHENOY, 2002) como mostra a Figura 6. Este critério foi comparado com os resultados obtidos em misturas asfálticas, apresentando R^2 igual a 0,84 quando comparados com o número de ciclos associados a uma redução de 50% do módulo da mistura asfáltica, em ensaios em vigas (BAHIA et al., 2001a). Estes resultados mostraram que este tipo de ensaio no ligante

asfálticos é promissor, podendo ser ainda um bom indicador do dano por fadiga em misturas asfálticas.

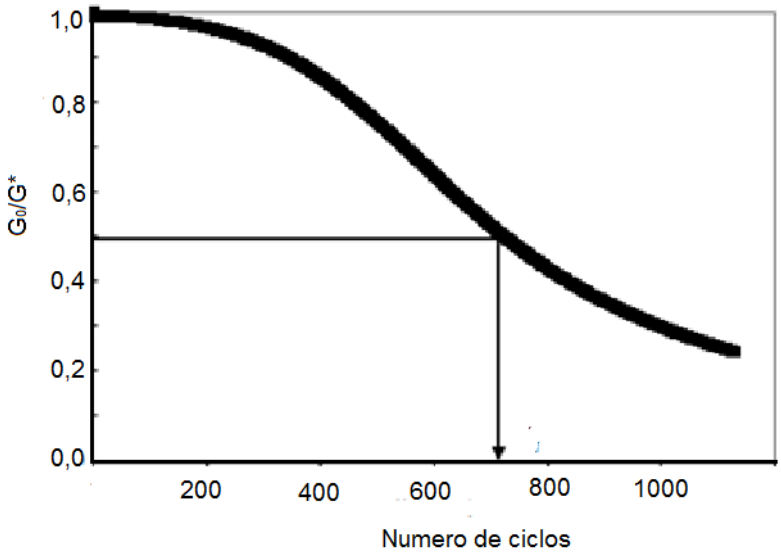


Figura 6. Aspecto típico de um ensaio de fadiga no DSR e determinação do número de ciclos (Adaptado de Johnson et al. 2007)

A norma AASTHO TP8-94 adotou o critério do número de ciclos requerido para obter 50% de perda no módulo como definição da vida de fadiga (N_f) em misturas asfálticas, para ensaios de deformação controlada. De igual maneira este critério também foi adotado para definir da vida de fadiga nos ligantes asfálticos. Pesquisas posteriores mostraram que este critério, aplicado ao ligante asfáltico, é arbitrário e não tem relação com o acumulo de dano na amostra (ANDERSON et al., 2001), o que motivou a proposição de outras definições de falha, como a baseada no conceito de energia dissipada.

Energia dissipada no ensaio de varredura de tempo

Embora o conceito de energia dissipada tenha sido desenvolvido e aplicado inicialmente a misturas asfálticas em ensaios de viga (DIJK, 1975), o princípio pode ser aplicado também para calcular a energia dissipada no ligante asfáltico. O critério baseado na energia dissipada inclui a taxa de energia dissipada DER (*Dissipated Energy Ratio*) e a taxa de acúmulo de dano (ANDERSON et al., 2001). A energia dissipada por ciclo, Wi, é calculada com a seguinte equação.

$$W_i = \pi \cdot \tau_i \cdot \gamma_i * sen(\delta_i) \tag{15}$$

onde: W_i = energia dissipada no ciclo i; τ_i = tensão cisalhante no ciclo i; γ_i = deformação no ciclo i; δ_i = ângulo de fase no ciclo i.

A energia dissipada acumulada até o ciclo n (W_{Tn}) é definida como:

$$W_{T_n} = \sum_{i=1}^{n} W_i \tag{16}$$

A taxa de energia dissipada DER definida por Pronk e Hopman (1990), usada como critério de fadiga, é determinada pela seguinte relação:

$$DER = \frac{W_{T_n}}{W_n} \tag{17}$$

Pronk (1995) uso primeiramente a intersecção das assíntotas como critério de vida de fadiga (ponto A da Figura 7).

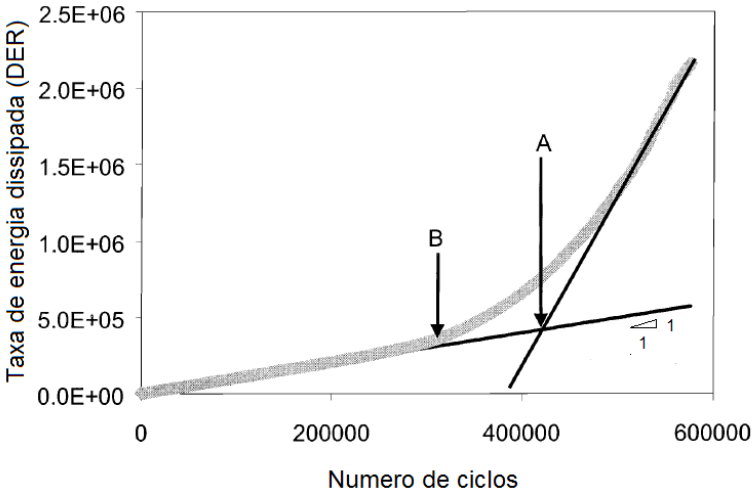


Figura 7. Definição de vida de fadiga: Gráfico típico da DER versus o número de ciclos.(Adaptado de Anderson et al. 2001)

Em seguida foi considerado que este critério poderia superestimar a vida de fadiga do material, pois a transição entre as duas fases pode ser muito ampla. Finalmente o autor definiu a falha como o ponto no gráfico onde começa a amostra começa a ter comportamento não

linear (ponto B da Figura 7). Esta mudança do coeficiente angular ocorre onde há uma mudança rápida das propriedades com o aumento do número de repetições de carga (ANDERSON et al., 2001).

Na Figura 8, se mostra uma variação típica do módulo complexo com o número de ciclos. Segundo Anderson et al. (2001) o gráfico pode ser dividido em três fases. Na primeira fase, ocorre uma diminuição inicial rápida do módulo (fase I). Bodin et al. (2004) observaram que nesses primeiros ciclos do ensaio se produz uma diminuição brusca da rigidez devida a um aumento rápido da temperatura interna do material.

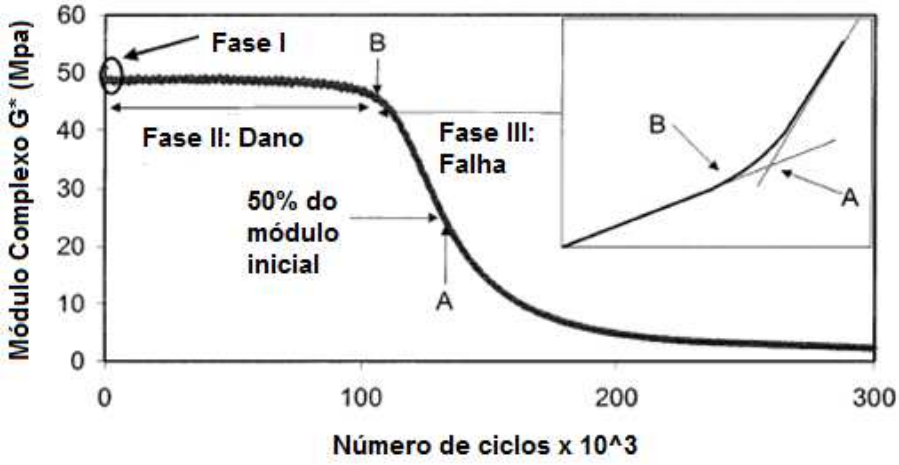


Figura 8. Definições de falha e progressão do dano no ensaio de varredura de tempo a deformação controlada (Adaptado de Anderson et al. 2001)

Como foi mencionado anteriormente, estes autores também concluem que este critério de falha baseado na taxa de energia dissipada aparentemente não tem interferência das mudanças de temperatura iniciais e poderia estar mais claramente relacionado com o fenômeno de fadiga. Depois desta primeira fase, o módulo complexo continua diminuindo com o número de ciclos, mas a uma taxa bem menor (fase II). Esta fase corresponde ao acúmulo de dano no material. Na fase final (fase III), o módulo cai bruscamente.

Na Figura 8, pode-se observar como o primeiro critério de falha proposto por Pronk (1995), usando a interseção das assíntotas, é próximo ao ponto onde o módulo complexo tem uma redução de 50% com relação ao seu valor inicial. Segundo Anderson et al. (2001) a tendência apresentada nesta figura é típica de dados obtidos a temperaturas onde o módulo inicial do material foi de 5 a 45 MPa. Com base nisto, o critério de falha do ponto onde tem início o comportamento não-linear se mostra mais adequado (ANDERSON et al., 2001).

Na revisão de critérios de fadiga para misturas asfálticas, Ghuzlan e Carpenter (2000) concluíram que o uso da energia dissipada tem mais acurácia na indicação do acumúlo de dano na amostra. De acordo com os autores, o uso da energia dissipada acumulada distingue indiretamente o fato de que nem toda a energia dissipada induz dano, sendo parte dessa energia dissipada em fluxo viscoso (ANDERSON et al., 2001).

No processo de desenvolvimento dos ensaios para avaliar a fadiga de ligantes asfálticos, procurou-se avaliar a resistência à fadiga independente do modo de carregamento ou do tipo de pavimento. A abordagem baseada na taxa de energia dissipada foi selecionada por se acreditar que este método é independente do modo de carregamento (PRONK, 1995). O critério de falha empregado nesta abordagem é o N_p (ponto B da Figura 7), o qual representa o número de ciclos até onde a amostra não apresenta dano, isto é, até onde o coeficiente angular do gráfico da taxa de energia dissipada (DER) versus número de ciclos permanece linear.

Embora este critério represente melhor uma mudança do material durante o processo de fadiga, a sua determinação na curva não é exata, exigindo a definição de um critério no qual seja fácil observar o momento que se produz a mudança de comportamento. Com base neste raciocínio, esta mudança pode ser definida como a porcentagem de desvio dos pontos da curva em relação à reta com inclinação de 45 º. Assim, o ponto de dano por fadiga para os ligantes (N_{p20}) foi definido como o ponto onde a taxa de energia dissipada se desvia 20% da reta com inclinação de 45º. Se a energia de entrada inicial é a mesma, o valor de N_{p20} obtido usando tensão controlada ou deformação controlada pode ser a mesma (DELGADILLO e BAHIA, 2005).

O parâmetro N_{p20} corresponde com o ponto de formação das fissuras por fadiga e é prévio ao ponto de início da propagação das mesmas, por isso oferece um critério razoável para definir a falha por fadiga de ligantes asfálticos. Esta medida pode ser determinada usando a equação 18 (BONNETTI et al., 2002).

$$20\% = \frac{DER_{Np20} - N_{p20}}{N_{p20}} * 100 \qquad (18)$$

onde: N_{p20} = número de ciclos associado a um desvio do 20% em relação à linha de igualdade DER=N

Estudos feitos por Bonnetti et al. (2002), utilizando os critérios de falha N_{p10} e N_{p20}, constataram que o N_{p20} representa melhor o comportamento à fadiga dos ligantes asfálticos, sendo o que se mostra mais claramente definido, menos afetado pelo erro experimental e menos sensível ao tipo de carregamento. Aquele parâmetro também foi interpretado como o número de ciclos no qual a propagação de fissuras tem início. Embora sejam reconhecidas as vantagens deste ensaio por apresentar independência do modo de carregamento e por permitir estabelecer relações entre o número de ciclos e as propriedades do material, o principal problema é que o ensaio pode levar várias horas para ser realizado.

2.8.2. Varredura de Amplitude Linear (Linear Amplitude Sweep LAS)

Em 2010, foi proposto um novo ensaio: o teste de varredura de amplitude linear (LAS-Linear Amplitud Sweep). O ensaio proposto inicialmente por Johnson (2010) recebeu aceitação pelos especialistas e foi submetido como esboço de norma da AASTHO. Este procedimento de ensaio surgiu como uma tentativa para substituir o ensaio de varredura de tempo frente à desvantagem que apresenta quanto ao tempo de realização do ensaio.

O ensaio LAS é similar ao ensaio de varredura do tempo no que se refere ao carregamento cíclico e à geometria das placas utilizada no DSR. A diferença está na forma de carregamento, que é aplicado com incrementos progressivos da deformação para acelerar o dano (Figura 9). Essa varredura de amplitude é precedida de uma varredura de frequência, na qual se obtém a resposta viscoelástica linear do material para ser usada no modelo teórico proposto por Johnson (2010).

A análise do ensaio LAS proposta por Johnson (2010) emprega a teoria do dano contínuo viscoelástico (*Viscoelastic Continuum Damage*-VECD), que tem sido usada extensivamente para modelar o comportamento à fadiga de misturas asfálticas. O benefício principal do uso da teoria do dano contínuo viscoelástico é a possibilidade de estimar a vida de fadiga em qualquer amplitude de deformação por meio de um único ensaio.

A aplicação da teoria de dano contínuo viscoelástico segue a teoria de Schapery (1975) do modelo de trabalho potencial. A base desta teoria está no incremento do dano viscoelástico inspirado na termodinâmica de processos irreversíveis. Segundo aquela teoria um material tem certo potencial para absorver energia externa, seja em termos de deformação ou de energia dissipada devido ao dano.

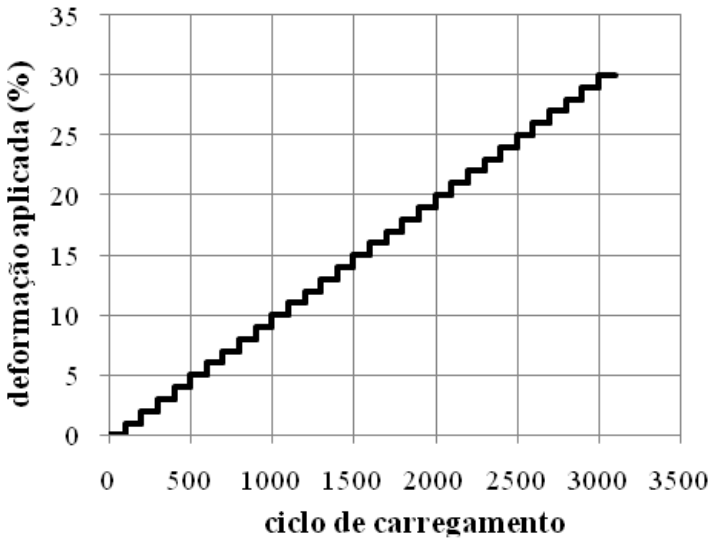


Figura 9. Esquema de carregamento no ensaio LAS proposto (Adaptado de Johnson 2010).

Quando o dano afeta a capacidade do material de recuperar seu estado original o processo não pode ser simplesmente revertido removendo a carga. Portanto, a força disponível para incrementar o dano (i.e, a taxa de dano) pode ser definida como a mudança na energia potencial do material (W) com relação à mudança na quantidade de dano (D) no material, sendo que essa relação (dW/dD) é a força requerida equivalente à disponível para incrementar o dano (HINTZ et al., 2011; JOHNSON, 2010).

$$\frac{dD}{dt} = -\frac{\partial W}{\partial D} \tag{19}$$

onde: dD/dt = taxa de dano; W = energia potencial do material; D = quantidade de dano.

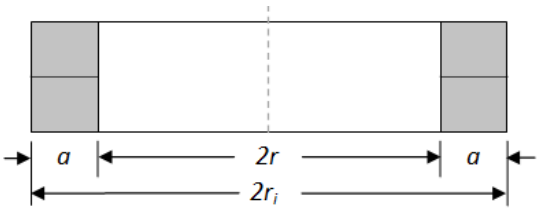
Schapery (1975) sugeriu que o aumento do dano no material viscoelástico pode ter uma forma similar a da lei de Paris, que define o incremento de fissuras para outros materiais. Deste modo, a equação anterior é transformada em:

$$\frac{dD}{dt} = \left(-\frac{\partial W}{\partial D}\right)^{\alpha} \tag{20}$$

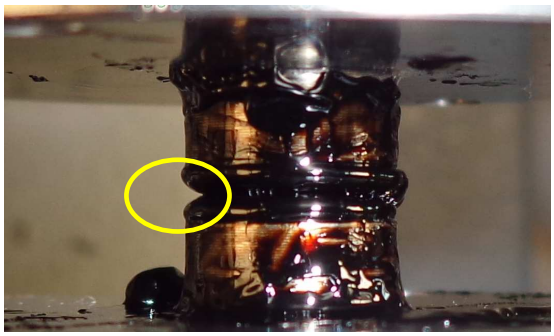
onde: α é o expoente que determina a taxa de energia liberada.

2.8.3. LAS modificado

Embora os procedimentos para determinar a vida de fadiga no ligante asfáltico anteriormente descritos apresentem boas correlações com os resultados de misturas asfálticas, existem ainda outras abordagens que tentam explicar o comportamento à fadiga. Hintz (2012) levanta a hipótese de que no processo de fadiga se originam mudanças na geometria da amostra devidas à fissuração e à fratura de ordem macro, ao invés de mudanças nas propriedades viscoelásticas como sugere Johnson (2010). Tais mudanças, que diminuem o raio efetivo da amostra, seriam as responsáveis pela variação na capacidade de carregamento durante os ensaios de fadiga. Na Figura 10a), é apresentada uma representação da fratura do material no ensaio e na Figura 10b), uma fotografia da fratura durante o ensaio no DSR ilustrando a redução do raio da amostra.



a)



b)

Figura 10 a) Representação da fratura do material (Adaptado de Hintz 2012) e b) fotografia da fratura do material no DSR (arquivo próprio)

Mecânica da fratura

O estudo realizado por Hintz (2012) sugere que os resultados dos ensaios deveriam ser analisados usando modelos baseados na análise da mecânica da fratura, pois é observado que uma fratura de ordem macro acontece durante o ensaio. Hintz (2012) aponta que outra deficiência do ensaio LAS proposto por Johnson (2010) está nas amplas e abruptas mudanças na amplitude do carregamento, o que produz um efeito de condicionamento das fissuras.

Hintz (2012) aponta que o DSR não está projetado para mudanças abruptas na amplitude do carregamento. Para eliminar este efeito, a pesquisadora propõe substituir os incrementos na amplitude de carregamento em degraus (Figura 9) por incrementos lineares

sem saltos (Figura 11). Este esquema de carregamento envolve os mesmos ciclos de carga (tempo de ensaio) e a mesma faixa de amplitudes de carregamento.

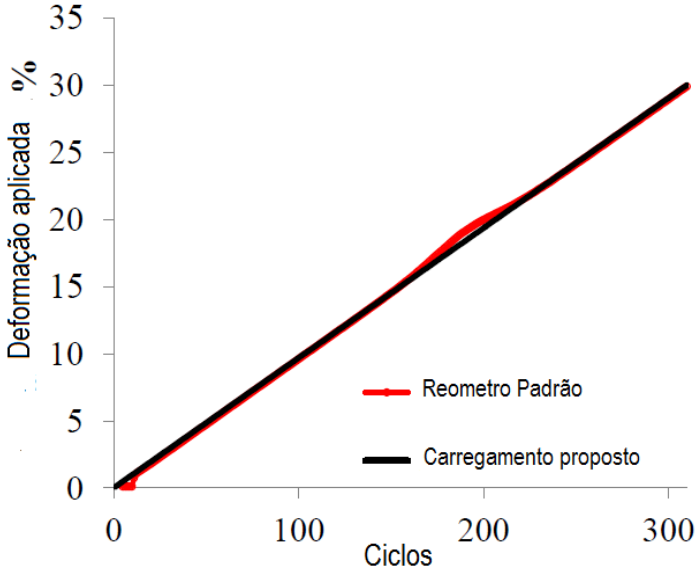
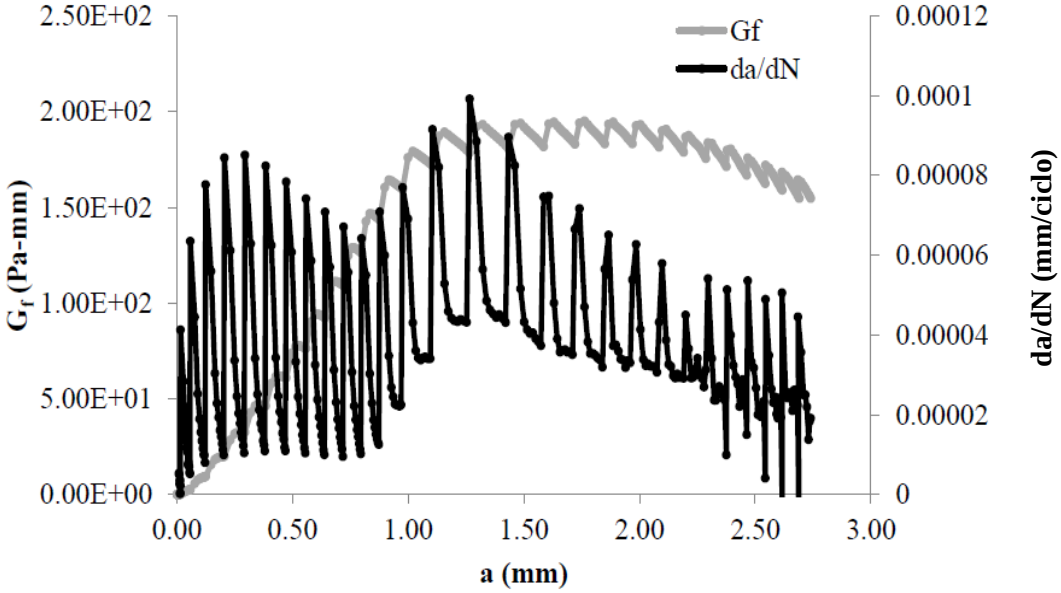


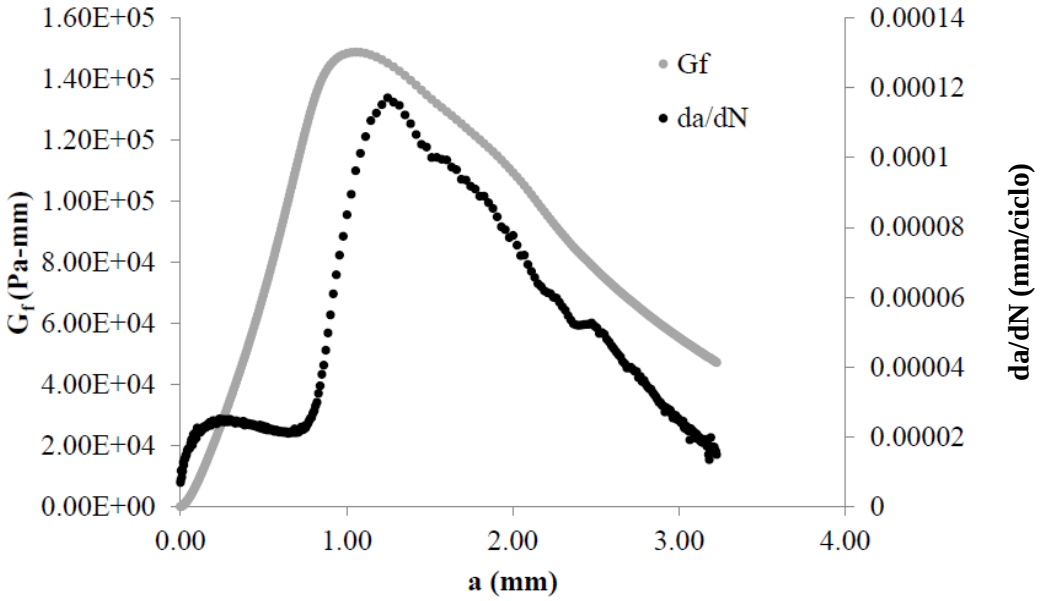
Figura 11. Aderência entre o esquema de carregamento real (aplicado pelo reômetro) e o proposto (Adaptado de Hintz 2012)

A tendência na taxa de energia liberada G_f e a taxa de crescimento das fissuras no esquema de carregamento proposto por Johnson (2010) é apresentado na Figura 12a. Na Figura 12b é apresentada a tendência da energia liberada e do crescimento das fissuras para o esquema de carregamento proposto por Hintz (2012). É possível observar que usando o novo esquema de carregamento, com incrementos na amplitude do carregamento muito pequenos, é possível ter uma curva de tendência mais suave na taxa de crescimento da fissura e na taxa da energia liberada.

Hintz (2012) comparou o incremento da taxa da propagação da fissura em função do comprimento da fissura para vários ligantes asfálticos da mesma rigidez a partir de mudanças na temperatura. Os resultados destes ensaios também foram comparados com os ensaios de varredura de tempo observando uma tendência similar. O estudo mostrou o ensaio LAS modificado como um método prático e mais rápido para o ordenamento de ligantes asfálticos, classificando-os pela sua tolerância ao dano.



a)



b)

Figura 12. Taxa de energia liberada (G_f) versus crescimento da fissura (a_f) e taxa de crescimento da fissura versus o comprimento da fissura no ensaio LAS: a) carregamento por degraus (Adaptado de Johnson, 2010).e b) carregamento linear contínuo. (Adaptado de Hintz, 2012)

Critério de falha

Dois parâmetros de falha foram considerados por Hintz (2012) para avaliar a tolerância ao dano. O primeiro parâmetro foi o comprimento da fissura (a_f) e o segundo a deformação efetiva (γ_f). A deformação efetiva é a deformação calculada assumindo a geometria inicial e a correspondente amplitude do ângulo de deflexão. Foram feitas duas considerações para a avaliação desses parâmetros: sensibilidade ao tipo de ligante e o ordenamento de materiais obtido no ensaio de varredura de tempo. Destas duas comparações, foi escolhido o critério de comprimento da fissura (a_f) como o parâmetro selecionado para o ordenamento relativo à tolerância ao dano no ensaio LAS.

O critério de falha (a_f) proposto pela autora para analisar o LAS corresponde ao valor do comprimento da fissura onde se apresenta o mínimo local da curva da taxa de crescimento da fissura em função do comprimento da fissura (Figura 13). Este ponto é prévio ao incremento rápido na taxa de crescimento da fissura. Baseado neste critério um comprimento da fissura na falha maior é desejável, indicando que o ligante asfáltico pode resistir a uma fissura maior antes da rápida propagação.

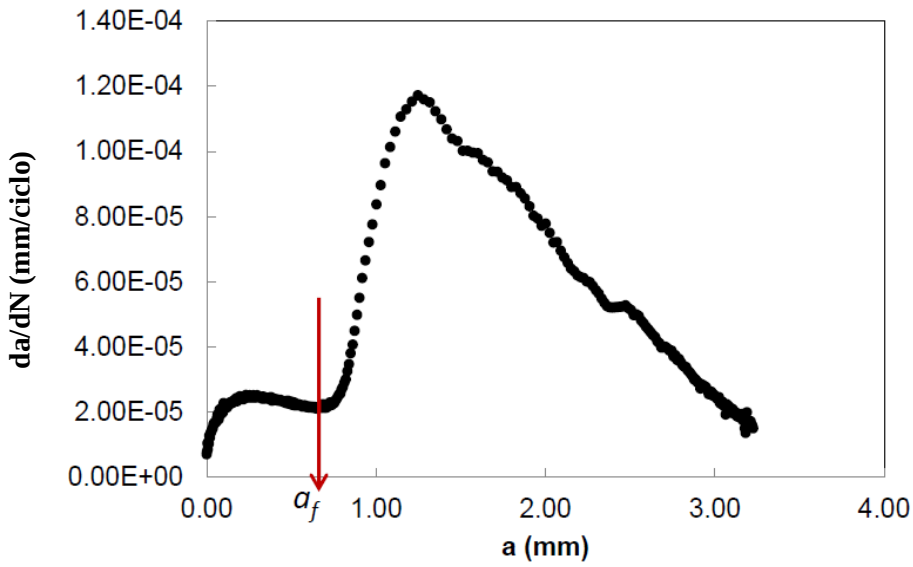


Figura 13 Taxa de crescimento da fissura em função do comprimento da fissura(HINTZ, 2012)

Fratura da borda em ensaios de fadiga

Estudos anteriores aos realizados por Hintz (2012) tinham indicado a presença de fratura de borda nos ensaios de fadiga no DSR. A fratura da borda é uma fissura

circunferencial formada na periferia de uma amostra cilíndrica (ABOUTORABI et al., 1998; KEENTOK e XUE, 1999, ANDERSON et al., 2001; SOENEN et al., 2004).

Estudos feitos por Anderson et al. (2001) a temperaturas onde o módulo inicial é de 5 MPa mostraram uma coincidência entre a súbita variação do módulo complexo (ponto B da Figura 8) e a aparição de uma distorção na circunferência. O ponto em que tem início a redução do módulo coincide com uma fenda axisimétrica no ponto médio entre as duas placas paralelas. Com o incremento do carregamento, a indentação se propaga para o interior, causando uma redução da seção transversal da amostra.

Segundo Keentok e Xue (1999), a fratura de borda nos ensaios do DSR pode ser resultado da instabilidade do fluxo causada pelo desenvolvimento de tensões normais ou fratura. Anderson et al. (2001) afirmaram que esta fratura de borda está associada às diferenças nas tensões normais primárias e secundárias. Bahia et al. (2011) estudaram estas tensões normais durante os ensaios de fadiga no DSR para diferentes ligantes asfálticos e condições de ensaio, encontrando valores de tensões normais pouco significativas e que diminuem com o aumento do número de ciclos. Esse resultado indicaria que a fratura de borda observada durante o ensaio de fadiga no DSR é um fenômeno de fratura e não uma instabilidade do fluxo (HINTZ, 2012).

Hintz (2012) também menciona que o DSR somente consegue medir torque e ângulo de deflexão diretamente. Assim, as tensões e as deformações são calculadas assumindo que o raio da amostra não muda. Havendo redução do raio efetivo da amostra, os cálculos podem apresentar erros. Deste modo, sob ensaios de deformação controlada, a observação da diminuição do módulo complexo pode refletir unicamente as mudanças no torque.

Diante destas duas teorias aparentemente contraditórias, foi lançada, em 2013 a norma AASHTO TP 101-12-UL, na qual se inclui a modificação no carregamento proposta por Hintz (2012), conservando os dois tipos de análise: 1) a proposta por Johnson (2010) com base no dano contínuo viscoelástico, quantificando a fadiga a partir das propriedades reológicas e a varredura de amplitude e 2) a análise de tolerância ao dano proposto por Hintz (2012), com base nos resultados da varredura de amplitude unicamente.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste item, são apresentados os materiais utilizados no desenvolvimento desta pesquisa, as condições de preparação das amostras e a descrição dos equipamentos de laboratório e dos procedimentos de ensaio empregados.

3.1. MATERIAIS

Para este estudo, foram preparados ligantes asfálticos modificados com formulações que atingiram dois graus acima do PG do ligante asfáltico de base, na temperatura alta, ou seja, a classificação PG 76-XX.

Na preparação dos ligantes asfálticos, foram utilizados os seguintes materiais:

(1) CAP 50/70, com classificação por grau de desempenho PG 64-XX, fornecido pela Replan-Petrobras;

(2) borracha moída de pneu, fornecida pela empresa Ecija Comércio Exportação e Importação de Produtos Ltda., resultante do processo de trituração de bandas de rodagem de pneus de veículos de passeio;

(3) ácido polifosfórico (PPA) de designação comercial Innovalt E-200, fornecido pela Innophos Inc., dos Estados Unidos;

(4) copolímero estireno butadieno estiteno SBS tipo TR-1101, adquirido da Kraton e fornecido pela Betunel;

(5) borracha de estireno-butadieno (SBR) tipo Solprene 1205, adquirida da Dynasol e fornecida pela Betunel;

(6) etileno acetato de vinila (EVA) tipo HM 728, adquirido da Politeno e fornecido pelo Cenpes-Petrobras;

(7) polietileno (PE) tipo UB160-C de baixa densidade, produzido pela Unipar;

(8) terpolímero Elvaloy tipo 4170, fornecido pela Dupont.

O misturador de baixo cisalhamento utilizado foi o da marca Fisatom, modelo 722D, e o de alto cisalhamento foi o da marca Silverson, modelo L4R. As formulações dos ligantes asfálticos estão detalhadas na Tabela 1

Tabela 1. Formulações e variáveis de processamento dos ligantes asfálticos modificados

ligante asfáltico	formulação (%)			rotação (rpm)	temperatura (ºC)	tempo (min)
	CAP	modificador	PPA			
50/70	100,0	-	-	-	-	-
CAP+PPA	98,8	-	1,2	300	130	30
CAP+Elvaloy+PPA	98,4	1,3	0,3	300	190	120, PPA aos 60
CAP+borracha	86,0	14,0	-	4.000	190	90
CAP+borracha+PPA	88,5	11,0	0,5	4.000	190	120, PPA aos 90
CAP+SBS	95,5	4,5	-	4.000	180	120
CAP+SBS+PPA	96,5	3,0	0,5	4.000	180	120, PPA aos 60
CAP+EVA	92,0	8,0	-	300	180	120
CAP+EVA+PPA	96,6	3,0	0,4	300	180	120, PPA aos 90
CAP+PE	94,0	6,0	-	440	150	120
CAP+PE+PPA	96,5	3,0	0,5	400	150	120, PPA aos 60
CAP+SBR	94,5	5,5	-	400	180	120
CAP+SBR+PPA	96,0	3,5	0,5	300	180	120, PPA aos 90

3.2. PROCEDIMENTOS

Com o propósito de caracterizar o comportamento dos ligantes asfálticos à fadiga, foram realizados dois ensaios: o ensaio de varredura de tempo ou *time sweep* e o ensaio de varredura de amplitude linear (LAS). Segundo a especificação Superpave os ensaios de fadiga são conduzidos na temperatura intermediária (HINTZ, 2012). Neste estudo os ensaios foram realizados nas temperaturas consideradas intermediarias (25 e 35°C) com o propósito de avaliar os efeitos da temperatura na vida de fadiga. No intuito de avaliar o efeito do envelhecimento os materiais foram avaliados em duas condições de envelhecimento RTFOT e PAV. Todos os ensaios foram feitos no reômetro de cisalhamento dinâmico TA AR2000ex usando a geometria de placas paralelas de 8 mm com 2 mm de separação entre elas.

O envelhecimento dos ligantes asfálticos a curto prazo foi realizado na estufa de filme fino rotativo (RTFO), conforme método ASTM D 2872-12. Paralelamente ao envelhecimento, foi realizado o ensaio de balanço de massa, sob prescrição da referida norma, empregando balança analítica com precisão de décimo de milésimo de grama. A estufa RTFO é uma estufa de convecção com aquecimento elétrico, dotada de um termostato capaz de manter a temperatura de 163 ± 0,5°C e de um carrossel com aberturas para conter firmemente presos 8 frascos de vidro na posição horizontal. A velocidade de rotação do carrossel deve ser de 15 ± 0,2 rotações/min. Um bico de ar é posicionado na parte inferior da estufa para injetar ar aquecido dentro dos frascos, a uma vazão de 4.000 ± 200 ml/min.

O envelhecimento a longo prazo, do resíduo envelhecido no RTFOT, conforme especificação ASTM 6521-03a, foi efetuado em estufa de vaso pressurizado (PAV). A estufa de vaso pressurizado é um equipamento composto basicamente de uma câmara pressurizada, dotada de controladores, medidores e registradores de pressão e de temperatura. A câmara do PAV deve ter volume suficiente para conter um raque com capacidade para dez pratos de aço inoxidável do tipo TFOT na posição horizontal, de forma que a espessura do filme asfáltico seja aproximadamente uniforme. Uma estufa de vácuo é necessária para a retirada de bolhas da amostra após condicionamento.

3.2.1. Ensaio de varredura de tempo (*time sweep*)

O ensaio de varredura de tempo consiste na aplicação de carregamento cíciclo reverso a deformação controlada ou deformação controlada numa frequência fixa. Neste ensaio foi adotado modo de carregamento de deformação controlada em razão ao observado pela equipe de pesquisadores do SHRP A-002 onde é indicado o modo de deformação controlada como o modo de carregamento considerado crítico no campo. O motivo da consideração do SHRP é a hipótese de que a fadiga se daria principalmente por deformação controlada porque a maioria dos pavimentos nos Estados Unidos seria esbelta (camadas pouco espessas). Neste tipo de pavimento, as deformações são grandes e a deformação da camada asfáltica acompanha a deformação das camadas inferiores. A deformação da camada asfáltica seria então “controlada” pela deformação das camadas inferiores. Como aqui no Brasil não se tem pavimentos com camadas espessas, é válido adotar os pressupostos do SHRP.

Quanto à frequência e à deformação a serem adotadas neste ensaio o procedimento padrão de ensaio proposto por Bahia et al. (2001a) recomenda usar a frequência de 10 rad/s e

10% de deformação ou 100 rad/s e 5% de deformação. Experimentos feitos no DSR por Shenoy (2002), incrementando a frequencia de 0,1 a 100 rad/s e mantendo a temperatura e a deformação constantes indicam que incrementar a freqüência pode diminuir a adesão entre o material e as placas. Por outro lado Bodin et al. (2004), em ensaios de varredura de deformação a 1 Hz, mostra que aparentemente não existem efeitos de temperatura observados ainda dentro da região não-linear. Isto significa que os efeitos da temperatura somente interferem na combinação de altas frequências e altas deformações.

Quanto à deformação considerada nos ensaios foram feitas várias considerações. Deformações demasiado altas neste ensaio podem diminuir a adesão entre o material e as placas (SHENOY, 2002). De outro lado deformações demasiado baixas podem exigir tempos demasiadamente prolongados de ensaio e produzir deformações que não estejam dentro da faixa no linear onde o fenômeno de dano por fadiga no tem efeito significativo.

Ensaios preliminares realizados neste estudo, combinado freqüências altas com deformações altas (10 Hz e 20% de deformação) e freqüências baixas e deformações altas (10 rad/s e 10% de deformação) mostraram que as freqüências baixas e deformações altas poderiam distinguir mais claramente a vida de fadiga dos materiais estudados. Com base nestas informações, os ensaios de varredura de tempo foram realizados adotando-se: modo de carregamento a deformação controlada, freqüência de 10 rad/s e deformação de 10%.

Variáveis controladas:

- Ligantes asfálticos: 12 ligantes asfálticos modificados (PG 76-XX) e o ligante de base (PG 64-XX);
- Envelhecimento: curto prazo (RTFOT) e longo prazo (PAV);
- Modo de carregamento: Deformação controlada;
- Freqüências e níveis de deformação: 10 rad/s e 10% de deformação;
- Temperaturas de ensaio: 25°C e 35°C.

3.2.2. Ensaio de varredura de amplitude linear (LAS)

O ensaio LAS foi realizado de acordo com a recente norma da AASTHO TP 101-12-UL. O ensaio consiste na aplicação de carregamento cíclico reverso dividido em duas fases: 1) uma varredura de frequência de 0,2 a 30Hz, com 0,1% de deformação e 2) uma varredura de amplitude, com incremento linear na amplitude de deformação, variando de 0 a 30%, no intervalo de tempo de 300 segundos e a uma freqüência de 10Hz.

Não existem limites de variabilidade especificados por norma para estes ensaios. No intuito de controlar a variabilidade dos resultados, foi arbitrada uma variabilidade máxima de 15%. A forma de cálculo da variabilidade é a mesma adotada nas normas ASTM: a razão da diferença de dois valores pela média deles, em porcentagem. Os resultados que provocaram variabilidades superiores ao limite arbitrado foram descartados e novas réplicas foram ensaiadas, até a obtenção de dois ensaios repetíveis.

Variáveis controladas

- Ligantes asfálticos: 12 ligantes asfálticos modificados (PG 76-XX) e o ligante de base (PG 64-XX);
- Envelhecimento: curto prazo (RTFOT) e longo prazo (PAV);
- Carregamento: varredura de frequência de 0,2 a 30Hz, com aplicação de 0,1% de deformação seguida da varredura de amplitude, com incremento linear de amplitude de deformação, variando de 0 a 30%, no intervalo de tempo de 300 segundos.
- Freqüência:10 Hz;
- Temperaturas de ensaio: 25°C e 35°C.

4. APRESENTAÇÃO E DISCUSÃO DOS RESULTADOS

4.1. ENSAIO DE VARREDURA DE TEMPO

Como discutido no capítulo 2, o critério de falha adotado neste ensaio tem como base o conceito da taxa de energia dissipada. Os parâmetros da equação 21 foram obtidos por meio da ferramenta Solver do Excel, utilizando o método de ajuste de mínimos quadrados. Este modelo para previsão da vida de fadiga (N) do ligante asfáltico foi sugerido por Bahia et al. (2001a).

$$N = N_C + b_1(DER - R_C) + T(b_2 - b_1)\ln\left[1 + e^{\frac{DER-R}{T}}\right] \qquad (21)$$

onde: N_C é uma constante referente ao número de ciclos de carregamento, R_C é a constante da taxa de energia dissipada, b_1 é o coeficiente angular da assíntota inferior de N versus DER, b_2 é o coeficiente angular da assíntota superior de N versus DER e T é o parâmetro de forma da curva. Na Figura 14, é apresentado um exemplo da determinação da vida de fadiga utilizando o critério de energia dissipada.

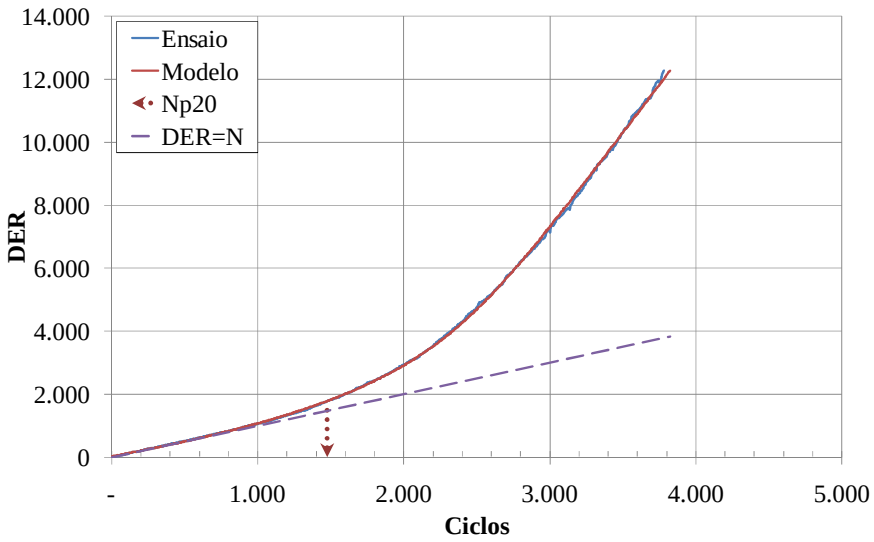


Figura 14. Exemplo de obtenção da vida de fadiga no ensaio de varredura de tempo para o CAP 50/70

Nas Tabelas de 2 a 5, são apresentados os parâmetros da equação de ajuste dos dados para todos ligantes asfálticos, o número de ciclo na falha e o ordenamento em função do

número de ciclos na falha. As Figuras de 15 a 18 apresentam as curvas da taxa de energia dissipada versus o número de ciclos dos modelos de ajuste dos dados para cada condição de envelhecimento e temperatura.

Tabela 2. Parâmetros do modelo na temperatura de 25°C e amostras envelhecidas a curto prazo

ligante asfáltico	parâmetros do ajuste					R^2
	Nc	T	b_1	b_2	Rc	
50/70	1.530	1.086	1,9	0,2	200	0,99
PPA	5.489	1.273	1,0	0,1	5.333	0,99
Elvaloy+PPA	7.552	6.417	2,0	0,3	0	0,99
Borracha	15.358	12.326	1,9	0,1	0	0,99
Borracha+PPA	3.678	5.793	1,5	0,5	0	0,99
SBS	3.008	2.820	1,3	0,5	1.485	0,99
SBS+PPA	3.315	2.984	1,9	0,3	23	0,99
EVA	24.635	7.075	1,0	0,2	23.352	0,99
EVA+PPA	8.450	3.007	1,1	0,2	7.317	0,99
PE	3.173	1.504	1,7	0,2	1.227	0,99
PE+PPA	2.516	1.935	2,1	0,2	0	0,99
SBR	10.425	4.076	1,2	0,3	8.526	0,99
SBR+PPA	6.351	3.735	1,4	0,2	4.118	0,99

Tabela 3. Parâmetros do modelo na temperatura de 35°C e amostras envelhecidas a curto prazo

ligante asfáltico	parâmetros do ajuste					R^2
	Nc	T	b_1	b_2	Rc	
50/70	1.070	857	2,0	0,2	0	0,99
PPA	4.240	1.633	1,2	0,2	3.513	0,99
Elvaloy+PPA	9.100	11.805	1,5	0,4	0	0,99
Borracha	15.358	12.326	1,9	0,1	0	0,99
Borracha+PPA	3.678	5.793	1,5	0,5	0	0,99
SBS	2.820	2.680	1,8	0,3	0	0,99
SBS+PPA	3.315	2.984	1,9	0,3	23	0,99
EVA	1.616	842	1,1	1,1	1542	0,99
EVA+PPA	5.965	4.100	2,2	0,1	0	0,99
PE	1.819	1.386	2,1	0,2	0	0,99
PE+PPA	2.782	541	1,0	0,3	2.759	0,99
SBR	10.905	5.469	1,9	0,2	4.046	0,99
SBR+PPA	2.304	1.782	2,1	0,2	0	0,99

Tabela 4. Parâmetros do modelo na temperatura de 25°C e amostras envelhecidas a longo prazo

ligante asfáltico	parâmetros do ajuste					R^2
	Nc	T	b_1	b_2	Rc	
50/70	1.810	1.354	2,1	0,2	3	0,99
PPA	9.994	7.079	2,1	0,1	0	0,99
Elvaloy+PPA	20.810	12.963	1,8	0,0	5.199	0,99
Borracha	23.142	25.403	1,7	0,4	0	0,99
Borracha+PPA	15.228	17.613	1,6	0,3	0	0,99
SBS	6.852	2.723	1,0	0,4	6.781	0,99
SBS+PPA	7.893	6.606	1,4	0,2	2.973	0,99
EVA	2.874	4.521	1,0	1,0	3.110	0,99
EVA+PPA	12.826	4.054	1,0	0,1	12.526	0,99
PE	3.114	847	1,0	0,0	2.887	0,99
PE+PPA	4.919	1.276	1,0	0,0	4.962	0,99
SBR	8.495	9.095	1,4	0,4	2.227	0,99
SBR+PPA	13.168	5.263	1,0	0,1	12.631	0,99

Tabela 5. Parâmetros do modelo na temperatura de 35°C e amostras envelhecidas a longo prazo

ligante asfáltico	parâmetros do ajuste					R^2
	Nc	T	b1	b2	Rc	
50/70	1.621	852	1,6	0,2	764	0,99
PPA	6.605	4.682	2,1	0,1	0	0,99
Elvaloy+PPA	14.766	10.626	2,1	0,1	0	0,99
Borracha	12.453	13.276	1,6	0,4	1507	0,99
Borracha+PPA	6.816	10.435	1,6	0,6	0	0,99
SBS	3.392	1.348	1,1	0,3	2.971	0,99
SBS+PPA	6.723	4.924	2,2	0,2	0	0,99
EVA	3.259	631	1,1	1,1	2.999	0,99
EVA+PPA	1.667	1.508	1,2	0,4	1.140	0,99
PE	2.400	1.679	2,3	0,2	0	0,99
PE+PPA	4.537	944	1,0	0,3	4.560	0,99
SBR	8.495	9.095	1,4	0,4	2.227	0,99
SBR+PPA	14.667	10.581	2,1	0,1	0	0,99

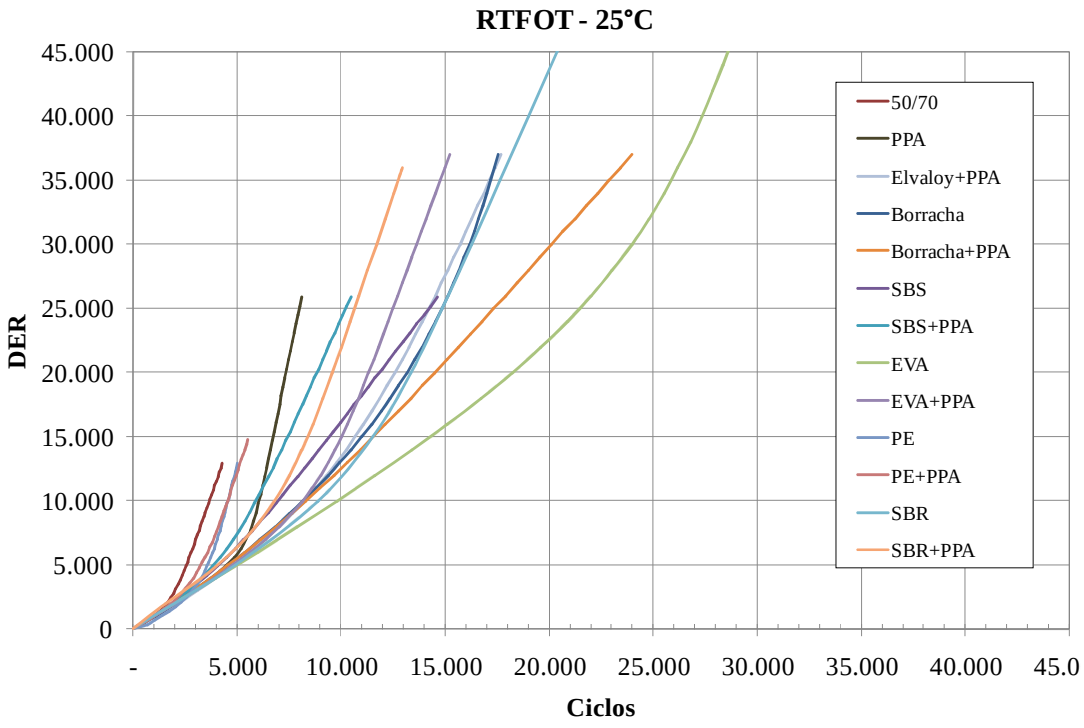


Figura 15. Taxa de energia dissipada a 25°C e amostras envelhecidas a curto prazo

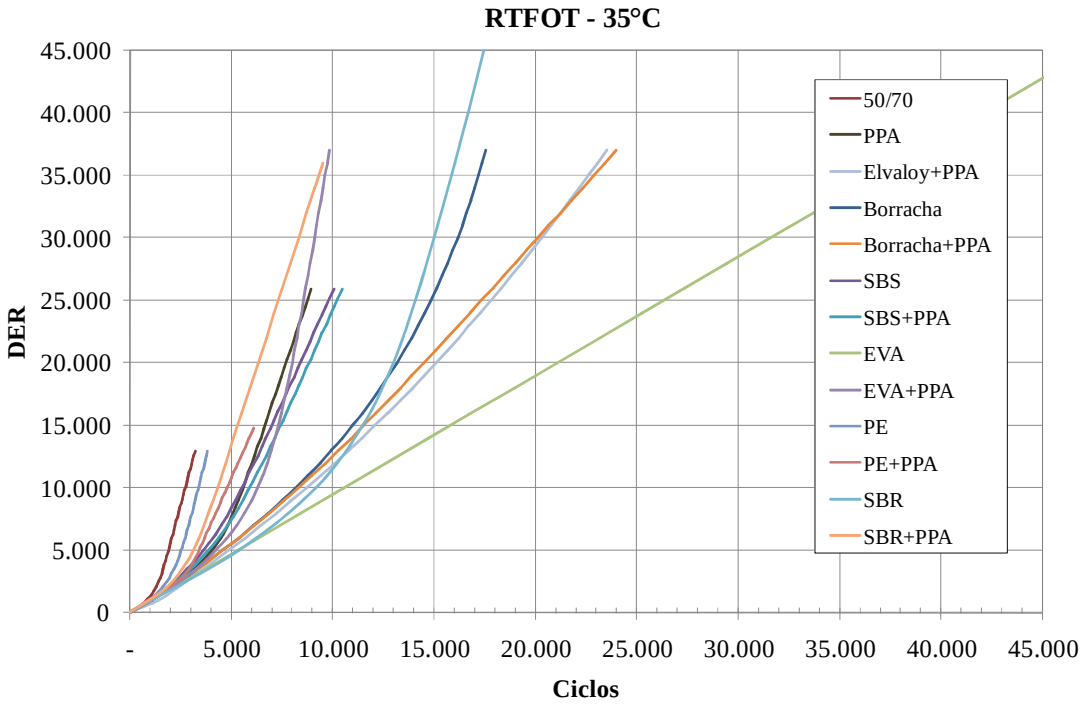


Figura 16. Taxa de energia dissipada a 35°C e amostras envelhecidas a curto prazo

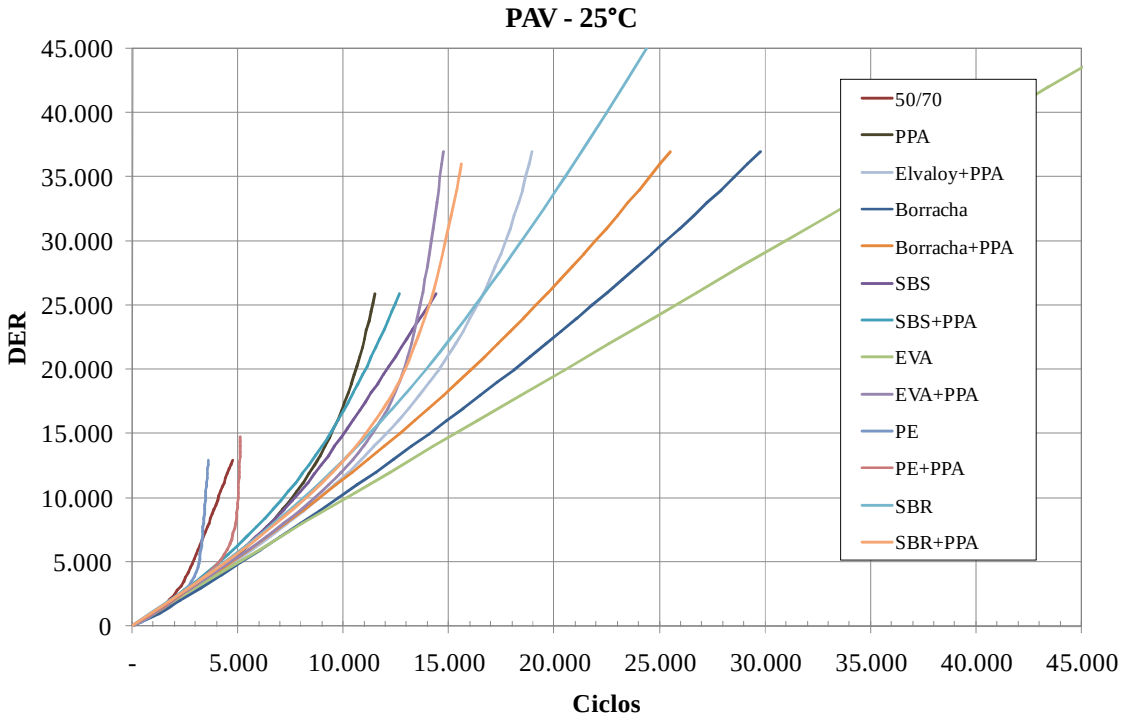


Figura 17. Taxa de energia dissipada a 25°C e amostras envelhecidas a longo prazo

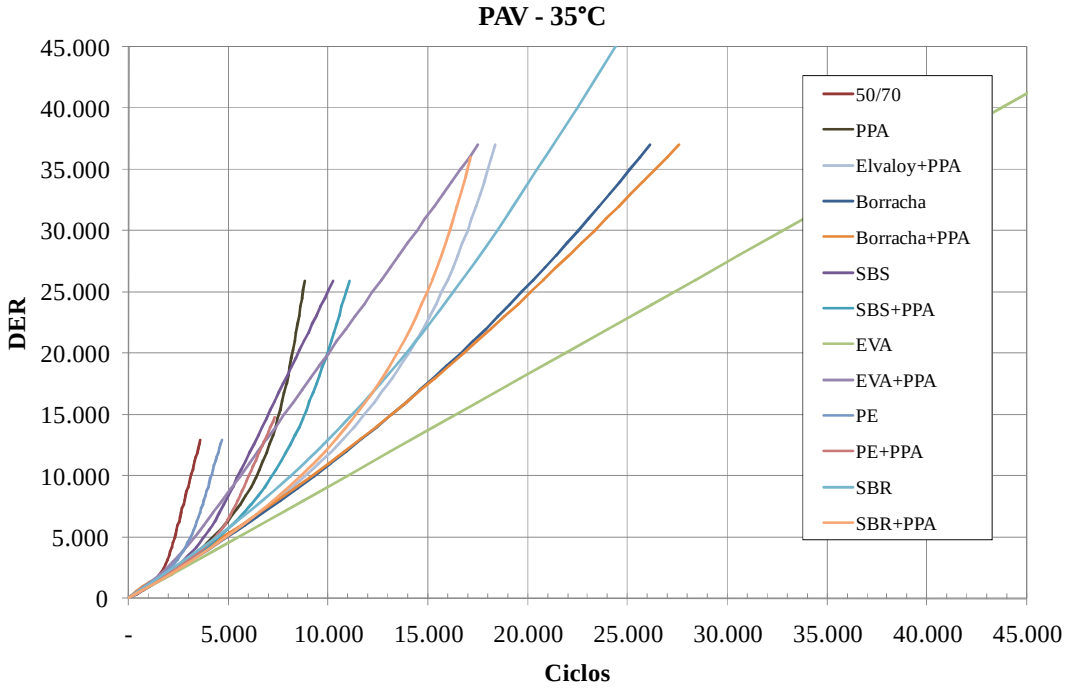


Figura 18. Taxa de energia dissipada a 35°C e amostras envelhecidas a longo prazo

Na Tabela 6, são apresentados os resultados do N_f (número de ciclos na falha) do ensaio de varredura de tempo nas temperaturas de 25° e 35°C e nas duas condições de envelhecimento (a curto prazo, no RTFOT, e a longo prazo, no PAV). De acordo com o explicado no item 2.8.1, o critério de falha é o N_{p20}. Os resultados que aparecem com "n.d". indicam que não foi possível determinar o número de ciclos à falha com este critério. Os ligantes asfálticos que apresentaram esta característica foram o CAP modificado com EVA na condição RTFOT e temperatura de 35°C e na condição PAV nas temperaturas de 25 e 35°C.

Tabela 6. Número de ciclos na falha (N_f) no ensaio de varredura de tempo a 10 rad/s e 10% de deformação

Ligante asfáltico	RTFOT		PAV	
	25°C N_f (ciclos)	35°C N_f (ciclos)	25°C N_f (ciclos)	35°C N_f (ciclos)
50/70	1.372	783	1.841	1.424
PPA	5.088	3.807	6.213	4.360
Elvaloy+PPA	7.929	11.934	10.901	10.466
Borracha	7.082	5.698	22.193	16.503
Borracha+PPA	8.086	10.176	13.422	18.900
SBS	3.618	2.418	6.065	3.557
SBS+PPA	3.537	2.954	4.020	5.556
EVA	22.522	n.d	n.d	n.d
EVA+PPA	7.786	4.386	13.634	2.685
PE	2.506	1.558	2.632	2.177
PE+PPA	2.233	2.874	3.945	4.529
SBR	9.532	9.891	64.012	6.823
SBR+PPA	2.915	2.007	7.768	9.340

Os resultados da Tabela 6 mostram que todos os ligantes asfálticos modificados testados apresentaram uma resistência à fadiga maior em relação ao ligante asfáltico puro. Na condição envelhecida a curto prazo e temperatura de 25°C, o CAP+EVA apresentou o melhor desempenho, com número de ciclos até a falha cerca de 17 vezes maior que o CAP puro, e na temperatura de 35°C, o CAP+Elvaloy+PPA apresentou o melhor desempenho, com número de ciclos 15 vezes maior que o CAP puro. Na condição envelhecida a longo prazo e temperatura de 25°C, o CAP+SBR apresentou o melhor desempenho, com número de ciclos até à falha cerca de 35 vezes maior que o CAP puro, e na temperatura de 35°C, o CAP+Borracha+PPA apresentou o melhor desempenho, com número de ciclos 13 vezes maior que o CAP puro.

Ainda que nas outras condições de envelhecimento e temperatura o CAP+EVA não tenha seu N_f definido, é observado que houve aumento no valor de G* e diminuição na taxa de

energia dissipada com o número de ciclos, comportamento que é contrario à tendência observada nos outros ensaios (Figura 16 a 18). Esses resultados poderiam indicar ser possível a existência de um limiar de deformação para o qual o material não apresenta dano com o número de ciclos, apresentando, em seu lugar, endurecimento por deformação. Esta hipótese poderia estar em concordância com os critérios de fadiga adotados em estudos com outros materiais, nos quais o critério para fadiga dos materiais é baseado no limiar de deformação/tensão. O conceito de limite de tolerância à fadiga tem sido amplamente incorporado em projetos de estruturas de aço e em particular para determinar a tensão máxima de soldas submetidas a carregamento cíclico. Da mesma forma, procedimentos de projeto de espessura de pavimento de concreto adotados na Austrália (AUSTROADS, 2008), e com base no procedimento da *Portland Cement Association* (PCA) dos EUA (PACKARD, 1984), incluem uma relação de tensão limite, abaixo da qual as repetições de carga admissível são infinitas ou ilimitadas. Esta relação de limite de tensão é equivalente ao conceito de limite de tolerância à fadiga (AUSTROADS, 2009).

Ao observar em conjunto o comportamento dos materiais nas temperaturas de 25 e 35°C no ensaio de varredura de tempo (Figuras de 14 a 17 e Tabela 6), nota-se a diminuição do N_f com o incremento da temperatura para a maioria dos materiais. São exceções o CAP+borracha+PPA, o PE+PPA, o CAP+SBR e o CAP+Elvaloy+PPA na condição de envelhecimento a curto prazo, sendo observado aumento do N_f ao passar da temperatura de 25 para 35°C. Na condição de envelhecimento a longo prazo, nota-se também uma diminuição do N_f com o incremento da temperatura para a maioria dos materiais, a exceção do CAP+SBS+PPA, CAP+borracha+PPA, do CAP+PE+PPA e do CAP+SBR+PPA, que apresentaram aumento de N_f ao passar de 25 para 35°C.

Os resultados deste ensaio para essas condições de carregamento, frequência e temperatura parecem indicar que o aumento da rigidez, em linhas gerais, pode tornar o ligante asfáltico mais resistente à fadiga. Porém, o fato de alguns materiais não seguirem esta regra poderia ser interpretado como a existência de uma temperatura onde se apresentaria o ponto máximo de vida de fadiga, a partir do qual na medida em que se aumenta a temperatura a vida de fadiga começa a diminuir. Esta hipótese explicaria o fato que, em alguns materiais, aumentar a temperatura de 25 para 35°C produz um aumento da vida de fadiga e em outros uma redução.

Na Figura 19, é apresentado o ordenamento dos ligantes asfálticos de acordo como o número de ciclos na falha N_f com base no critério N_{p20} nas duas condições de envelhecimento

e nas duas temperaturas avaliadas. Destacam se nas primeiras cinco posições os ligantes asfálticos modificados por EVA, Borracha, Borracha+PPA, SBR, e Elvaloy+PPA. Nas últimas posições estão o ligante asfáltico puro e os ligantes asfalticos modificados por PE como os de pior comportamento à fadiga.

Vale a pena mencionar que os ensaios de varredura de tempo normalmente são bastante demorados, especialmente aqueles conduzidos com os ligantes asfálticos modificados. A varredura de tempo feita com o CAP+EVA, que apresentou a maior resistência à fadiga na condição RTFOT e na temperatura de 25°C, demorou aproximadamente 6 horas. O ensaio de menor duração foi o realizado com o CAP puro, com uma duração total do ensaio de 40 minutos. Embora seja reconhecido como um ensaio verdadeiro de fadiga, os longos tempos de ensaio necessários para alcançar a falha do material representam o principal obstáculo à incorporação do ensaio de varredura de tempo a especificações de ligantes asfálticos.

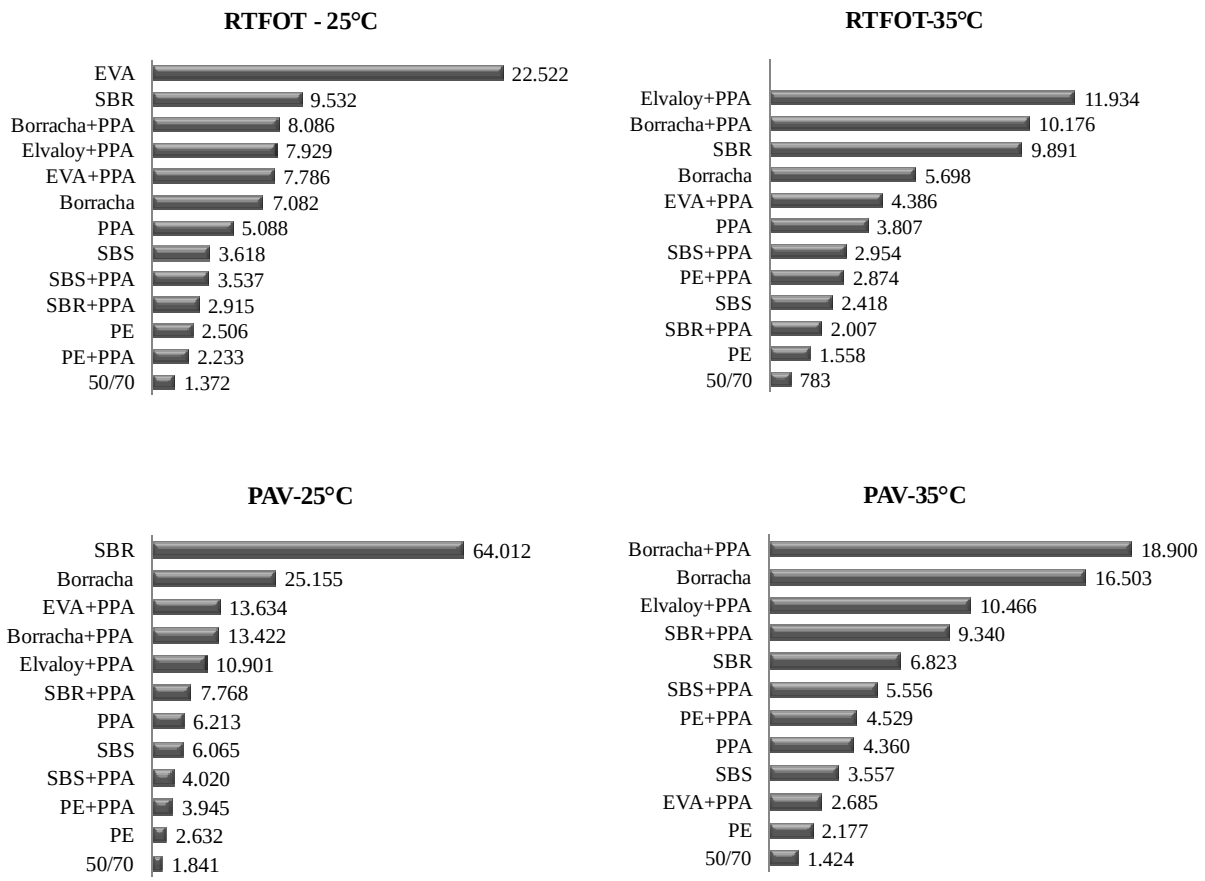


Figura 19. Ordenamentos dos materiais no ensaio de varredura de tempo

4.2. ENSAIO DE VARREDURA DE AMPLITUDE LINEAR (LAS)

No item 2.8.2, foram apresentadas as análises que podem ser feitas com base nos resultados do ensaio de varredura de amplitude linear. Neste capítulo, são apresentados os resultados destas duas análises: 1) a análise baseada na teoria de dano contínuo viscoelástico (VECD) e 2) a análise de fratura e do índice de tolerância ao dano pelo parâmetro a_f.

4.2.1. Análise do dano contínuo viscoelástico (VECD)

Esta análise provê informações completas acerca do comportamento à fadiga dos materiais em termos da resposta a diferentes níveis de deformação aplicada. Nesta análise, é obtido um modelo de potência da forma $N_f=A_{35}.\gamma^B$, sendo N_f o número de ciclos à falha, γ a tensão cisalhante aplicada e A_{35} e B parâmetros determinados experimentalmente. O índice 35 do parâmetro A_{35} corresponde ao critério de ruptura adotado por Johnson (2010), definido pela redução de 35% do valor do módulo inicial das amostras.

Na análise do dano contínuo viscoelástico, o parâmetro A_{35} representa a variação da integridade do material em função do dano acumulado. É desejável que o material preserve sua integridade ao longo do número de ciclos medida por meio do parâmetro G*senδ. Se isto ocorrer, o valor do parâmetro A_{35} será elevado. No entanto, se o ligante asfáltico sofrer uma queda rápida dos valores de G*senδ, o parâmetro A_{35} será baixo.

O parâmetro B representa a sensibilidade ao nível de deformação. Maiores declividades (altos valores absolutos de B) indicam que a vida de fadiga do ligante asfáltico decresce a uma taxa maior quando a amplitude de deformação aumenta. Neste mesmo sentido, menores declividades (baixos valores absolutos de B) indicam que a vida de fadiga do ligante asfáltico decresce a uma taxa menor.

Nas Tabela 7 a 10, são apresentados os coeficientes do modelo de fadiga nas duas temperaturas de ensaio e nas duas condições de envelhecimento, e também uma estimativa do $N_{f,}$ com base nos modelos de fadiga de cada material. As estimativas do N_f foram feitas em dois níveis de deformação: um nível baixo (3%), que indicaria uma estrutura de pavimento espessa (com comportamento deflectométrico semelhante a um pavimento rígido), e um nível alto de deformação (30%), que indicaria uma estrutura esbelta (com comportamento deflectométrico semelhante a um pavimento flexível).

Tabela 7. Resultados do LAS na análise do VECD na condição RTFOT e na temperatura de 25°C

Ligante asfáltico	A_{35}	B	N_f (3%)	N_f (30%)
50/70	100.853	-2,81	4.624	7
PPA	545.802	-3,60	10.433	3
Elvaloy+PPA	226.811	-3,02	8.184	8
Borracha	521.934	-3,36	13.082	6
Borracha+PPA	698.004	-3,42	16.226	6
SBS	264.062	-3,22	7.672	5
SBS+PPA	315.613	-3,33	8.127	4
EVA	4.179.057	-3,96	54.104	6
EVA+PPA	1.125.304	-3,81	17.072	3
PE	314.606	-3,26	8.711	5
PE+PPA	351.764	-3,45	7.962	3
SBR	177.585	-3,31	4.685	2
SBR+PPA	129.041	-3,17	3.980	3

Tabela 8. Resultados do LAS na análise do VECD na condição RTFOT e na temperatura de 35°C

Ligante asfáltico	A_{35}	B	N_f (3%)	N_f (30%)
50/70	159.715	-2,34	12.221	56
PPA	877.003	-3,23	25.342	15
Elvaloy+PPA	901.983	-2,72	45.284	86
Borracha	3501.941	-3,25	99.054	56
Borracha+PPA	3406.547	-3,31	89.918	44
SBS	464.616	-2,79	21.694	35
SBS+PPA	635.945	-2,94	25.231	29
EVA	23.855.836	-3,86	344.468	48
EVA+PPA	1.604.637	-3,31	42.442	21
PE	444.345	-2,91	18.254	23
PE+PPA	476.767	-2,99	17.806	18
SBR	1.426.599	-3,36	35.624	16
SBR+PPA	289.331	-2,75	14.157	25

Tabela 9. Resultados do LAS na análise do VECD na condição PAV e na temperatura de 25°C

Ligante asfáltico	A_{35}	B	Nf (3%)	Nf (30%)
50/70	213.831	-3,28	5.852	3
PPA	2.534.063	-4,28	22.887	1
Elvaloy+PPA	585.940	-3,60	11.283	3
Borracha	776.670	-3,59	15.048	4
Borracha+PPA	1.277.314	-3,91	17.352	2
SBS	572.959	-3,70	9.788	2
SBS+PPA	1.253.486	-4,18	12.742	1
EVA	10.532.290	-4,20	104.551	7
EVA+PPA	3.177.270	-4,14	33.625	2
PE	1.395.468	-4,06	16.203	1
PE+PPA	1.363.456	-4,10	15.059	1
SBR	408.682	-3,84	6.018	1
SBR+PPA	1.005.090	-4,08	11.373	1

Tabela 10 Resultados do LAS na análise do VECD na condição PAV e na temperatura de 35°C

Ligante asfáltico	A_{35}	B	Nf (3%)	Nf (30%)
50/70	256.299	-2,69	13.329	27
PPA	2.247.696	-3,79	35.121	6
Elvaloy+PPA	875.669	-3,12	28.526	22
Borracha	4.760.752	-3,41	111.840	43
Borracha+PPA	3.217.846	-3,56	64.493	18
SBS	614.776	-3,07	21.013	18
SBS+PPA	1.305.915	-3,54	26.718	8
EVA	72.101.545	-4,13	774.885	58
EVA+PPA	4.862.909	-3,90	66.718	8
PE	488.067	-3,09	16.290	13
PE+PPA	1.349.549	-3,51	28.598	9
SBR	419.026	-3,12	13.560	10
SBR+PPA	923.879	-3,50	19.709	6

Nas Figuras 20 e 21, são apresentados os ordenamentos dos valores de N_f dos materiais obtidos do ensaio LAS na análise do dano contínuo viscoelástico. Os valores foram obtidos a partir dos modelos adotando um nível de deformação baixo (3%) e um nível de deformação alto (30%).

O material que se destaca com o melhor comportamento à fadiga nas duas temperaturas e condições de envelhecimento avaliadas foi o CAP+EVA. Esta análise mostra este material

como o de melhor desempenho considerando uma ampla faixa de deformações. Na Figura 20, pode-se observar que ao considerar baixos níveis de deformação (3%) o efeito da modificação melhora o comportamento à fadiga dos ligantes asfálticos em relação ao CAP puro, à exceção do ligante asfáltico modificado por SBR+PPA avaliado na condição envelhecida de curto prazo e temperatura de 25°C. Neste ordenamento podem ser destacados nas primeiras cinco colocações os ligantes asfálticos modificados por EVA, EVA+PPA, Borracha, Borracha+PPA e o PPA. Nas últimas posições estão o ligante asfáltico puro e os ligantes asfálticos modificados por PE e SBR como os de pior comportamento à fadiga.

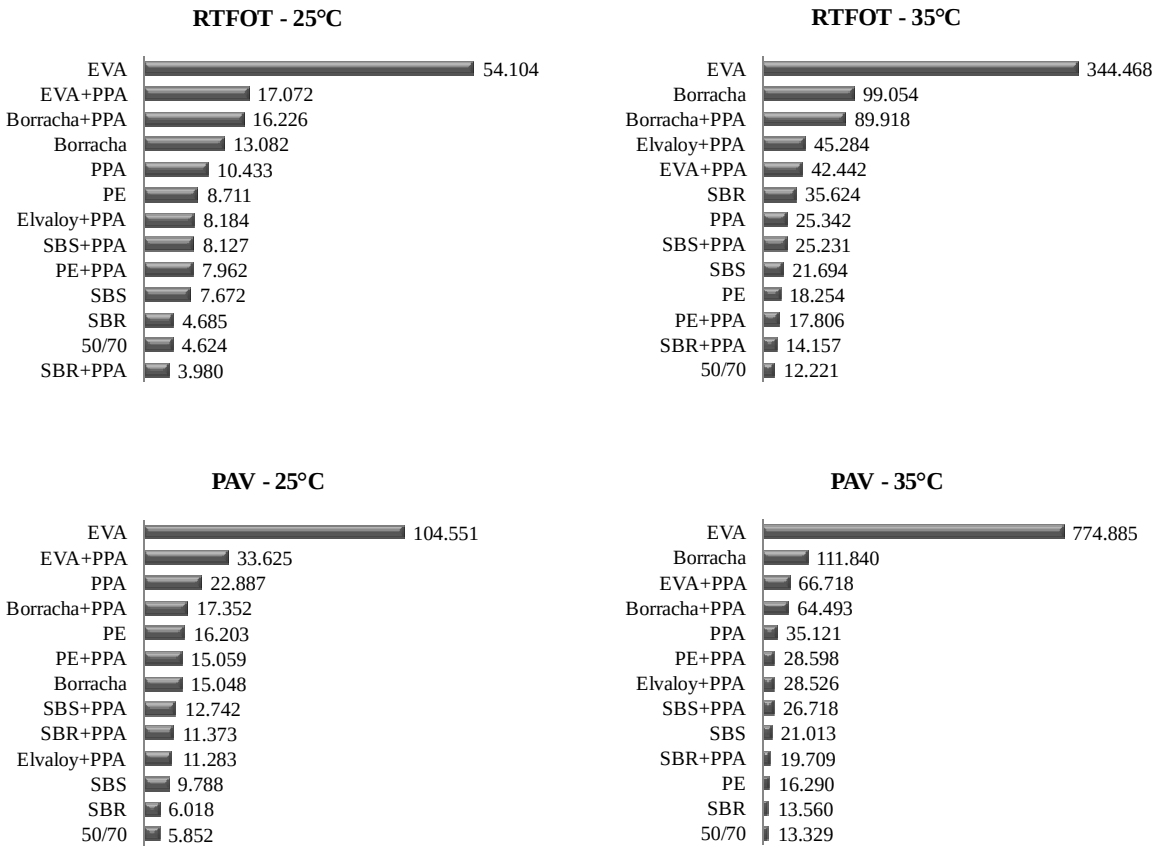


Figura 20. Ordenamento dos valores de N_f do ensaio LAS para baixos níveis de deformação (3%)

Na Figura 21, se observa que ao considerar altos níveis de deformação no material (30%), o efeito da modificação é pouco significativo e se mostra benéfico apenas para algumas formulações. Neste ordenamento, merecem destaque os ligantes asfálticos

modificados por Elvaloy+PPA, EVA e Borracha, os quais apresentaram um comportamento à fadiga superior ao do CAP puro. Os materiais que apresentaram pior comportamento à fadiga foram o CAP+SBR e o CAP+SBS+PPA a 25°C e o CAP+PPA a 35°C.

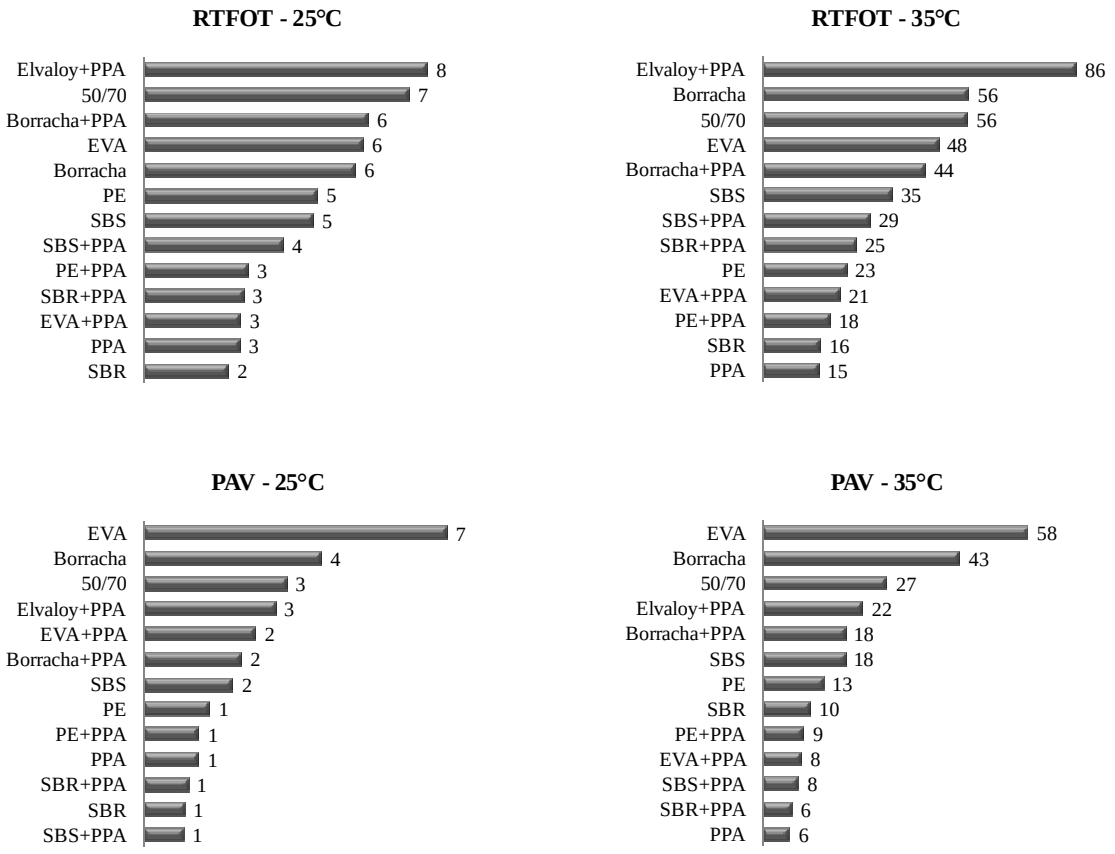


Figura 21. Ordenamento dos valores de N_f do ensaio LAS para altos níveis de deformação (30%)

As Figura 22 a 25 mostram a tendência geral dos modelos de fadiga obtidos a partir da análise do dano contínuo viscoelásticos (VECD) para todos os ligantes asfálticos em cada condição de envelhecimento e temperatura avaliadas. Ao comparar em conjunto o comportamento dos materiais na temperatura de 25 e 35°C, nota-se um incremento do N_f com o aumento da temperatura. Em um contexto geral, ao passar da temperatura de 25°C para a de 35°C, ocorre um deslocamento das curvas de fadiga para cima (os valores de A são maiores) e diminuição da declividade das linhas (os valores de B são menores). Este efeito é observado tanto para os materiais na condição RTFOT quanto para os materiais na condição envelhecida no PAV.

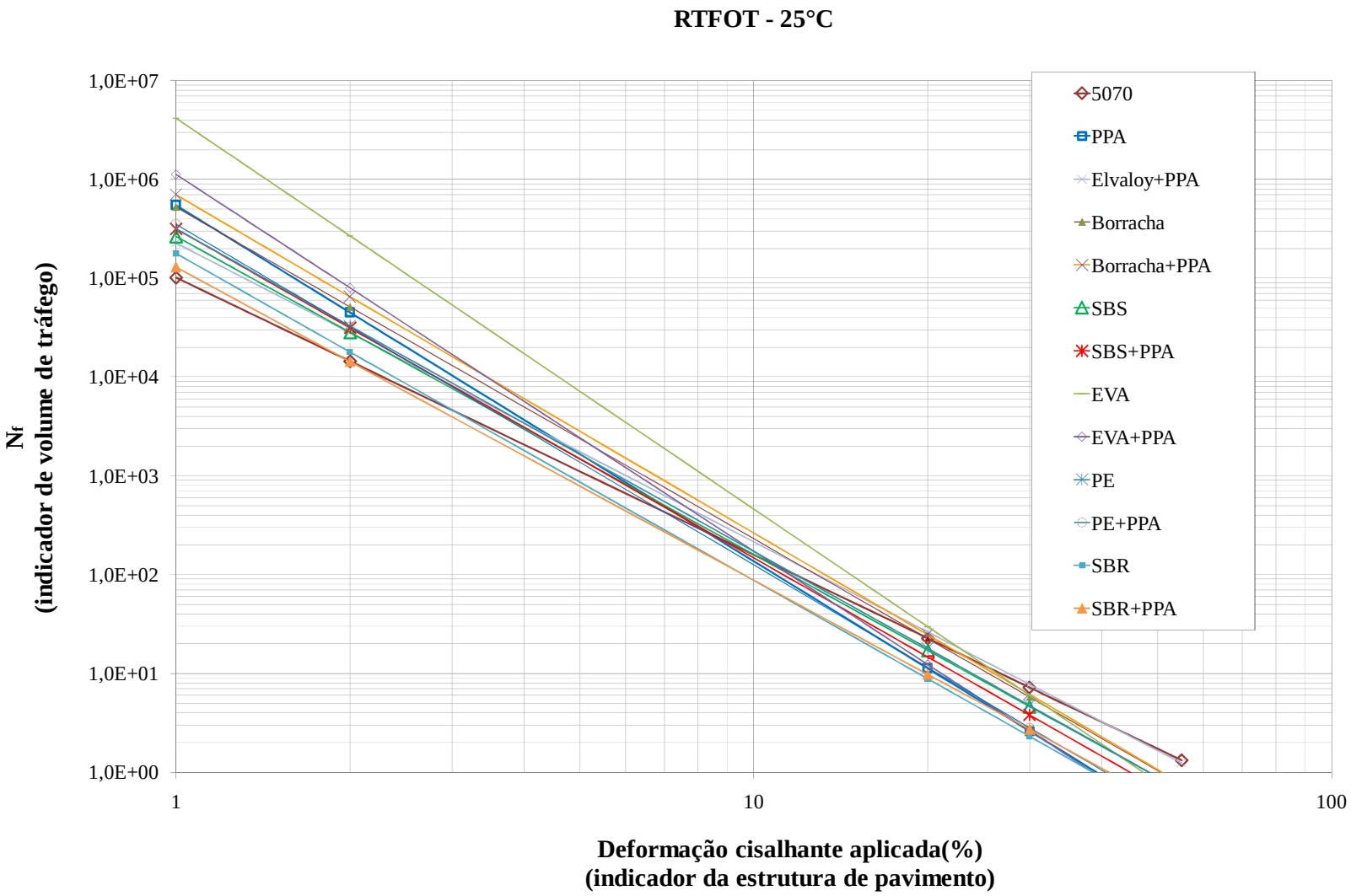


Figura 22. Estimativa da vida de fadiga em função da deformação na condição de envelhecimento a curto prazo e temperatura de 25°C

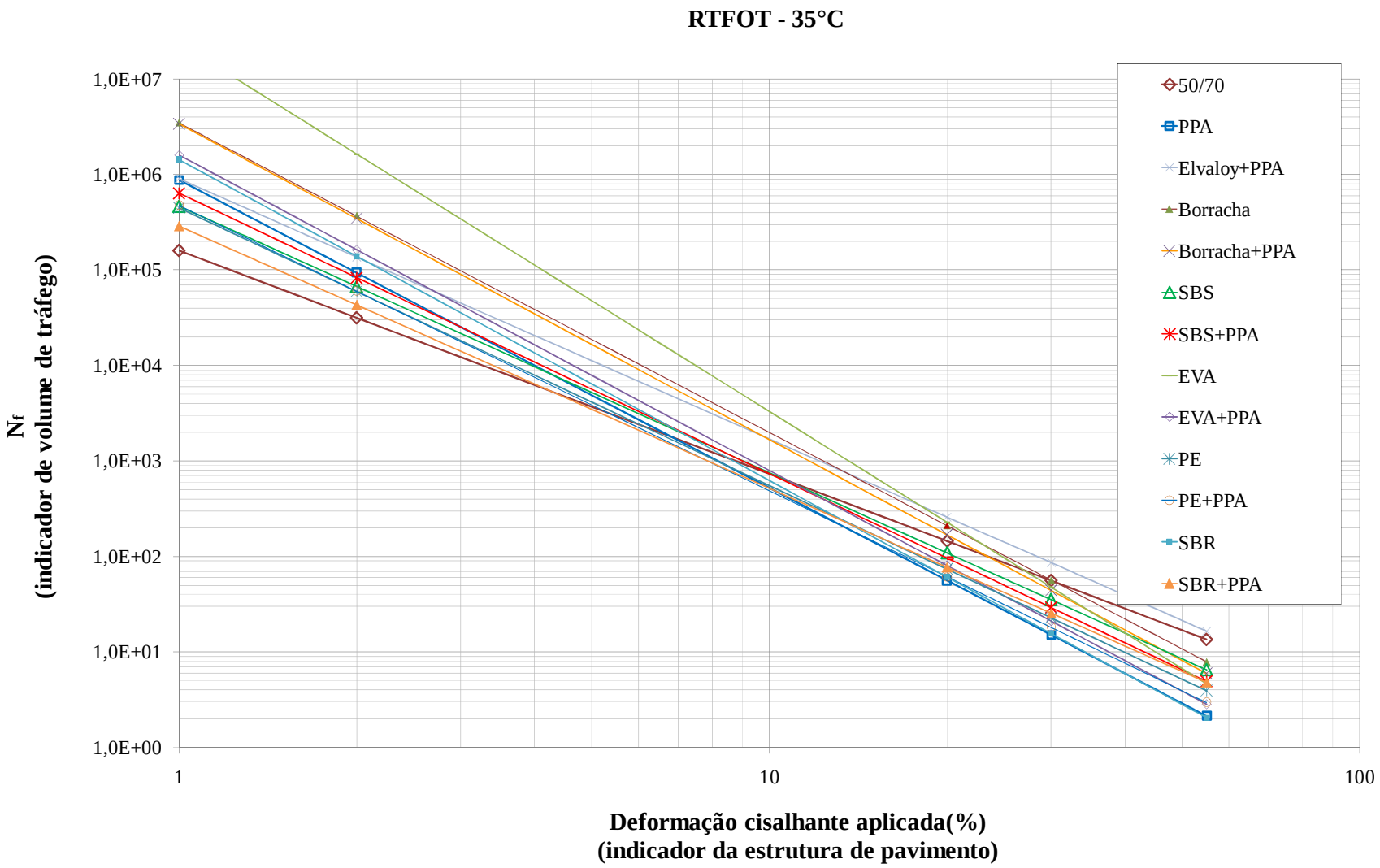


Figura 23. Estimativa da vida de fadiga em função da deformação na condição de envelhecimento a curto prazo e temperatura de 35°C

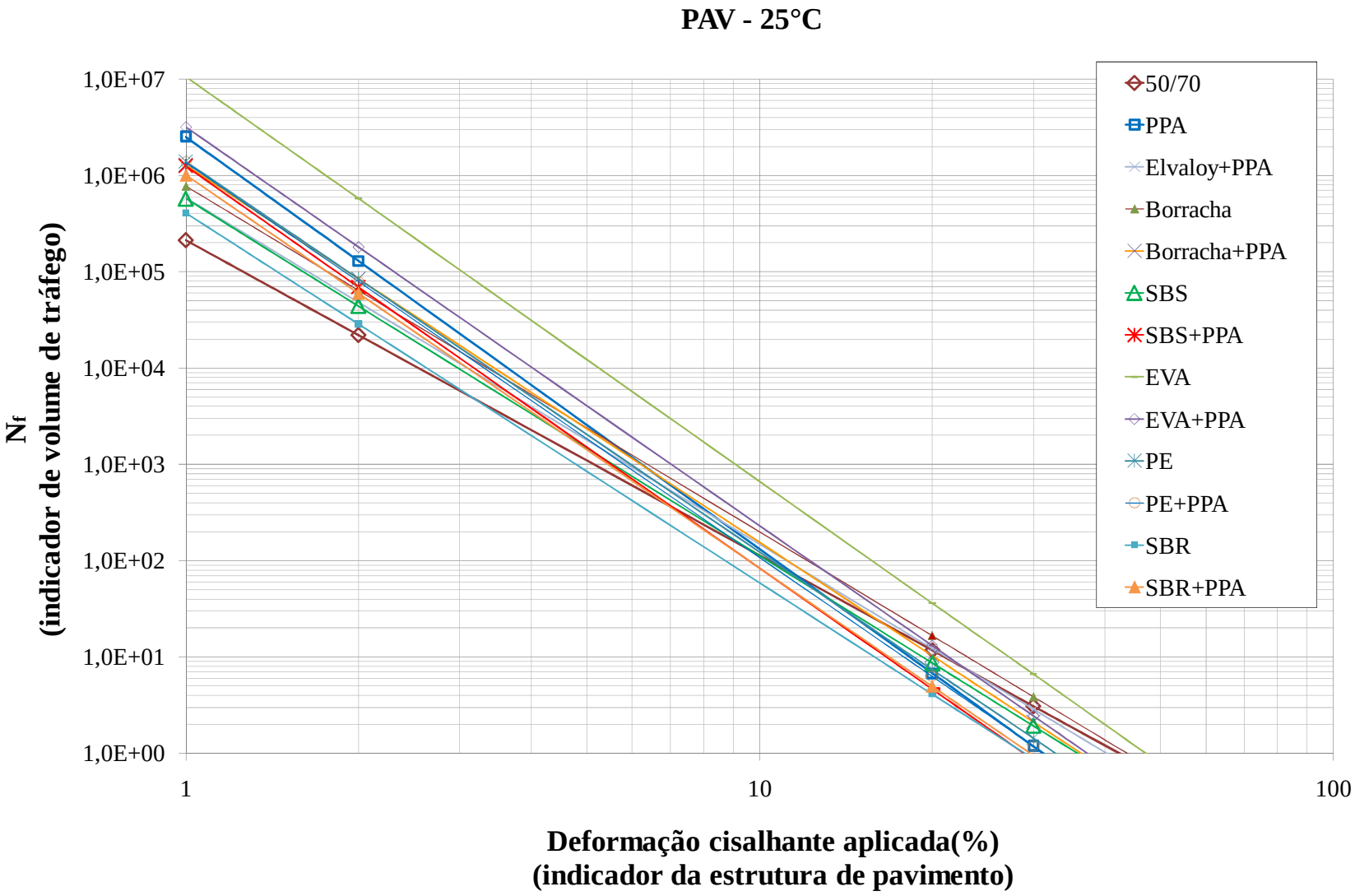


Figura 24. Estimativa da vida de fadiga em função da deformação na condição de envelhecimento a longo prazo e temperatura de 25°C

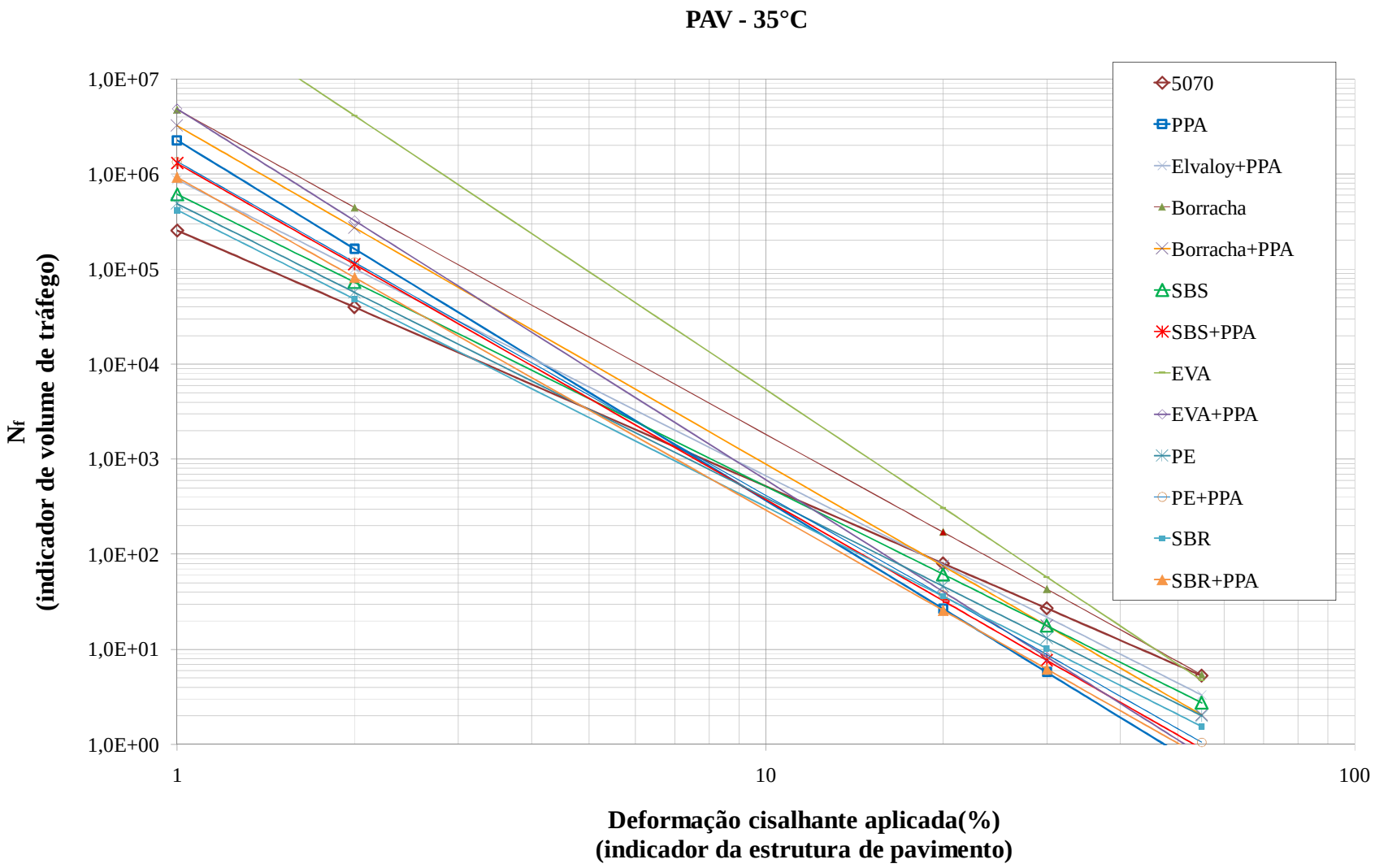


Figura 25. Estimativa da vida de fadiga em função da deformação na condição de envelhecimento a longo prazo e temperatura de 35°C

Com o propósito de observar mais claramente o comportamento à fadiga dos materiais, nos seguintes itens são apresentados os modelos de fadiga por grupo de materiais. Nestes grupos, o CAP puro e o CAP+PPA estão sempre presentes, acompanhando uma formulação com um dado modificador e a sua formulação correspondente com PPA.

Nestas figuras, observam-se o número de ciclos na falha por fadiga de cada material, o qual é um indicador do volume do tráfego que o material suportaria, em função da deformação aplicada, que a sua vez pode representar as condições nas quais o material poderia estar submetido dentro de uma determinada estrutura de pavimento.

Modelos de fadiga do CAP puro, do CAP+PPA e do CAP+Elvaloy+PPA

Na Figura 26, são comparados os modelos de fadiga do CAP puro, do CAP+PPA e do CAP+Elvaloy+PPA, na condição envelhecida a curto prazo e temperaturas de 25 e 35°C. Nesta figura, pode-se observar que, na condição envelhecida a curto prazo, o CAP+PPA foi o material que apresentou melhor comportamento à fadiga, quando submetido a baixos níveis de deformação, nos ensaios feitos a 25°C. O segundo colocado foi o CAP+Elvaloy+PPA e o de pior desempenho foi o CAP puro.

Considerando altos níveis de deformação, o ordenamento dos ligantes asfálticos se inverte, passando a ter os melhores comportamentos o CAP+Elvaloy+PPA e o CAP puro, com valores muito próximo nas deformações acima de 20%. Na condição envelhecida a curto prazo e a 35°C, o material que apresentou melhor comportamento à fadiga foi o CAP+Elvaloy+PPA, para toda a faixa de níveis de deformação considerada.

Na condição de envelhecimento a longo prazo e nas temperaturas de 25 e 35°C, o CAP+PPA continua sendo o que tem melhor comportamento à fadiga quando submetido a baixos níveis de deformação. O segundo colocado foi o CAP+Elvaloy+PPA e o de pior desempenho foi o CAP puro. No entanto, nas deformações altas, o ligantes asfáltico modificado por PPA passou a ter os piores desempenhos à fadiga, e os de melhor comportamento foram o CAP+Elvaloy+PPA e o CAP puro.

Estes resultados destacam o benefício da incorporação de Elvaloy+PPA no ligante asfáltico, predominantemente para deformações altas, tanto na condição envelhecida a curto quanto a longo prazo. Na condição envelhecida a longo prazo e na temperatura de 25°C, este benefício começa a ser evidente para deformações inferiores a 15% para os ligantes asfálticos modificados por Elvaloy+PPA e inferiores a 10% para o CAP+PPA

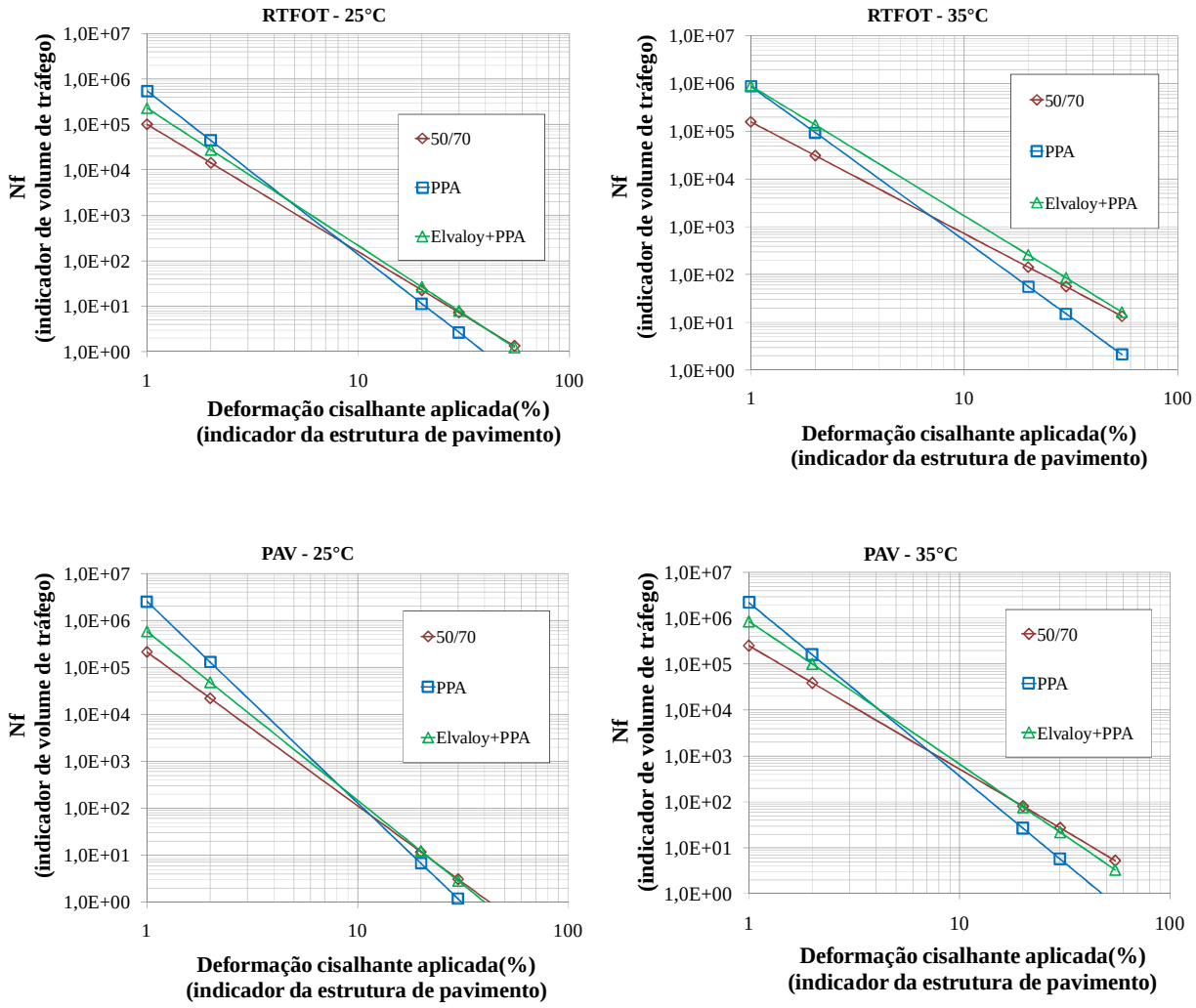


Figura 26. Comparativo das vidas de fadiga em função da deformação. CAP puro, CAP+PPA e CAP+Elvaloy+PPA

Na condição envelhecida a curto prazo e na temperatura de 35°C, o benefício da adição de Elvaloy é evidente em toda a faixa de deformações. Já na condição envelhecida a longo prazo e na temperatura de 35°C, este benefício começa a ser evidente para deformações inferiores a 12%.

Observa-se também na Figura 26 um aumento da vida de fadiga ao passar da temperatura de 25 para 35°C, nas duas condições de envelhecimento e para todos os materiais deste grupo. O envelhecimento tornou os ligantes asfálticos mais resistentes a baixas deformações, mas, para altos níveis de deformação, o envelhecimento piora o desempenho à fadiga destes materiais. Em outras palavras, o envelhecimento torna os materiais mais suscetíveis ao efeito dos níveis de deformação.

Modelos de fadiga do CAP puro, do CAP+PPA, do CAP+Borracha e do CAP+Borracha+PPA

Na Figura 27, pode observar-se que, na condição envelhecida a curto prazo (tanto a 25 quanto a 35°C), o material que apresentou melhor comportamento à fadiga, em uma ampla faixa de níveis de deformação foi o CAP+borracha+PPA, que ficou muito próximo do segundo colocado, o CAP+borracha. O CAP+borracha é o material que se destaca como o de melhor desempenho à fadiga em toda a faixa de deformações, na condição envelhecida de longo prazo e na temperatura de 35°C.

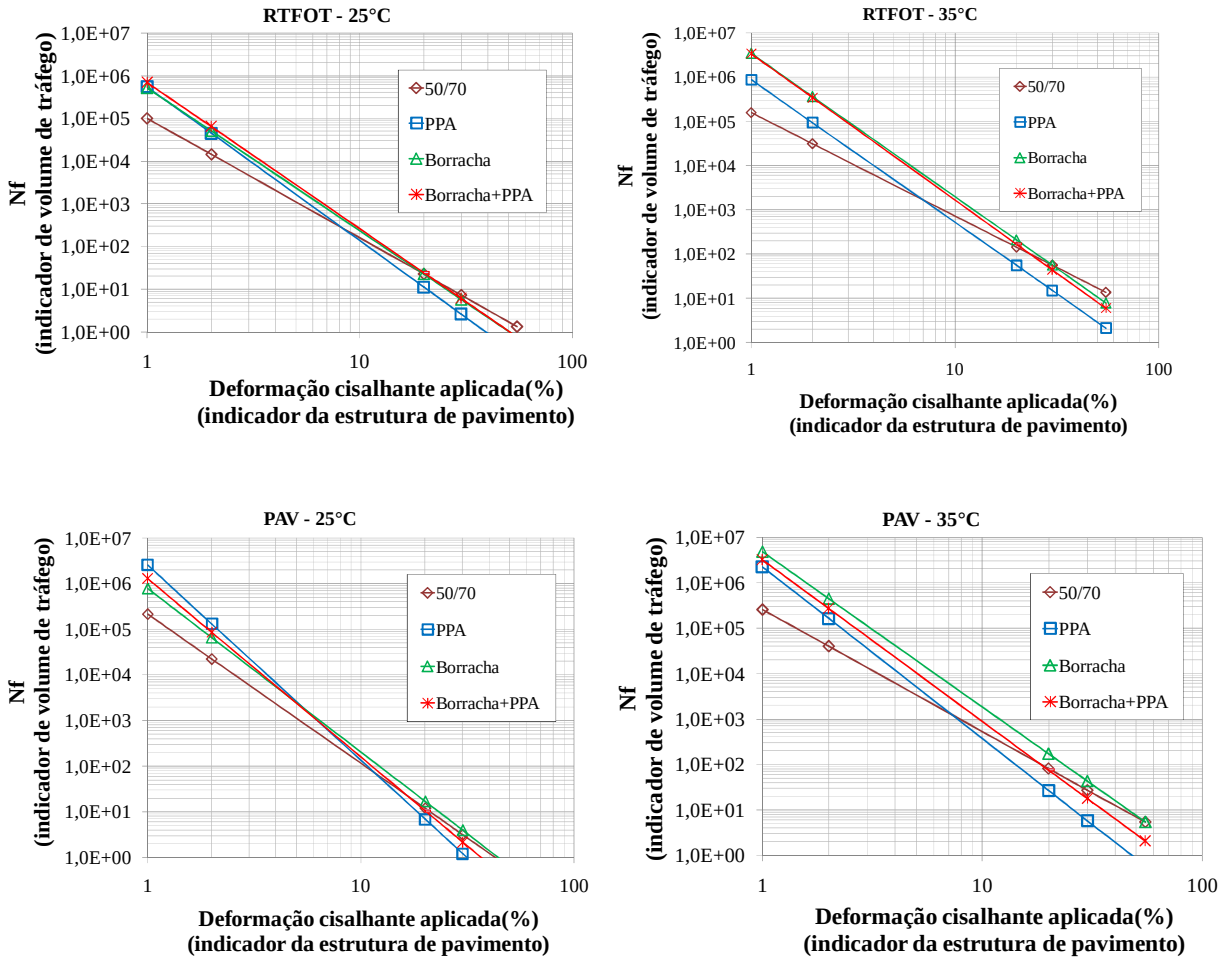


Figura 27. Comparativo das vidas de fadiga em função da deformação. CAP puro, CAP+PPA, CAP+Borracha e CAP+Borracha+PPA

Após o envelhecimento dos materiais a longo prazo e na temperatura de 25°C, o CAP+borracha+PPA e o CAP+borracha só perdem a sua posição quando se têm níveis de deformação inferiores a 4%. Para valores menores que este, o CAP+PPA foi o mais resistente.

Observou-se que, nas duas condições de envelhecimento, houve um aumento da vida de fadiga ao passar da temperatura de 25 para 35°C para todos os materiais deste grupo. O efeito do envelhecimento nas formulações com borracha não tem influência significativa na resposta ao incremento dos níveis de tensão, indicando que a adição de borracha pode tornar o material mais tolerante ao aumento dos níveis de deformação.

Modelos de fadiga do CAP puro, do CAP+PPA, do CAP+SBS e do CAP+SBS+PPA

Na Figura 28, são comparados os modelos de fadiga do CAP puro, do CAP+PPA, do CAP+SBS e do CAP+SBS+PPA.

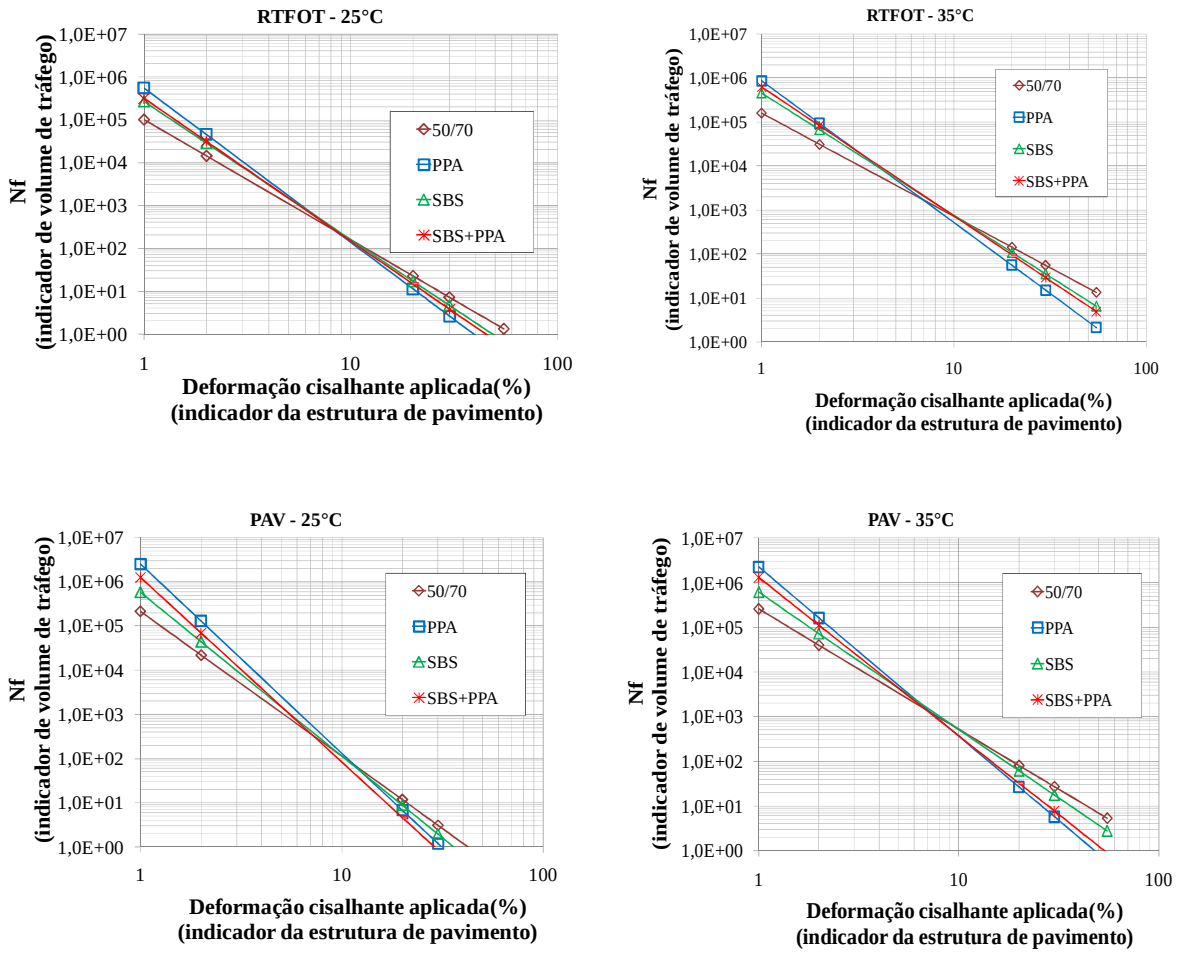


Figura 28. Comparativo das vidas de fadiga em função da deformação. CAP puro, CAP+PPA, CAP+SBS e CAP+SBS+PPA

Na Figura 28, pode observar-se que, na condição envelhecida a curto prazo e na temperatura de 25°C, o material que apresentou melhor comportamento à fadiga, quando submetido a baixos níveis de deformação, foi o CAP+PPA. O segundo colocado foi o

CAP+SBS+PPA, próximo do terceiro colocado que foi o CAP+SBS. O de pior desempenho foi o CAP puro. Considerando altos níveis de deformação o ordenamento dos ligantes asfálticos se inverte, passando o CAP puro a ter o melhor comportamento e os ligantes asfálticos modificados, o pior comportamento. Ainda para os níveis baixos de deformação este mesmo ordenamento se mantém para todos os ligantes asfálticos nas outras condições de temperatura e de envelhecimento; no entanto pode ser observado que na condição PAV os ligantes modificados com SBS e SBS+PPA passaram a ter um comportamento mais diferenciado

Após o envelhecimento dos materiais a longo prazo (tanto a 25 quanto a 35°C), o CAP+PPA continua sendo o que tem melhor comportamento à fadiga quando submetido a baixos níveis de deformação. O segundo colocado foi o CAP+SBS+PPA, muito próximo do terceiro colocado que foi o CAP+SBS. O de pior desempenho foi o CAP puro. No entanto, nas deformações altas, os ligantes asfálticos modificados passam a ter os piores desempenhos à fadiga, sendo o de melhor comportamento o CAP puro.

A análise dos resultados destaca o benefício da incorporação de modificadores no ligante asfáltico, predominantemente para baixos níveis de deformação do pavimento, tanto na condição envelhecida a curto prazo quanto na condição envelhecida a longo prazo. Na condição envelhecida a curto prazo e na temperatura de 25°C, tal benefício é evidente para deformações menores que 6%. Na condição envelhecida a longo prazo e na temperatura de 25°C, este benefício começa a ser evidente a partir de deformações inferiores a 6% para os ligantes asfálticos modificados só por SBS e inferiores a 10% para os modificados por SBS+PPA.

Na condição envelhecida a curto prazo e na temperatura de 35°C, o benefício da adição de modificadores na vida de fadiga começa a ser evidente para deformações menores que 7% para o CAP+PPA e menores que 9% para os modificados com SBS e SBS+PPA. Na condição envelhecida a longo prazo e na temperatura de 35°C, este benefício começa a ser evidente a partir de deformações inferiores a 6% para todos os ligantes asfálticos modificados.

Verificou-se, nas duas condições de envelhecimento, o aumento da vida de fadiga de todos os materiais deste grupo ao passar da temperatura de 25 para 35°C. O envelhecimento tornou os ligantes asfálticos mais resistentes à fadiga nas baixas deformações, mas para altos níveis de deformação, o envelhecimento piora o desempenho à fadiga destes materiais. Em outras palavras, o envelhecimento torna os materiais mais susceptíveis ao efeito do nível de deformação sofrido pelo pavimento.

Modelos de fadiga do CAP puro, do CAP+PPA, do CAP+EVA e do CAP+EVA+PPA

Na Figura 29, pode-se observar que na condição envelhecida a curto prazo (tanto a 25 quanto a 35°C) o material que apresentou melhor comportamento à fadiga, em uma ampla faixa de níveis de deformação, foi o CAP+EVA, seguido do CAP+EVA+PPA. Na condição de envelhecimento a longo prazo e nas temperaturas de ensaio de 25 e 35°C, o CAP+EVA se destaca por ter um comportamento excepcional à fadiga, sendo superior em todos os níveis de deformação.

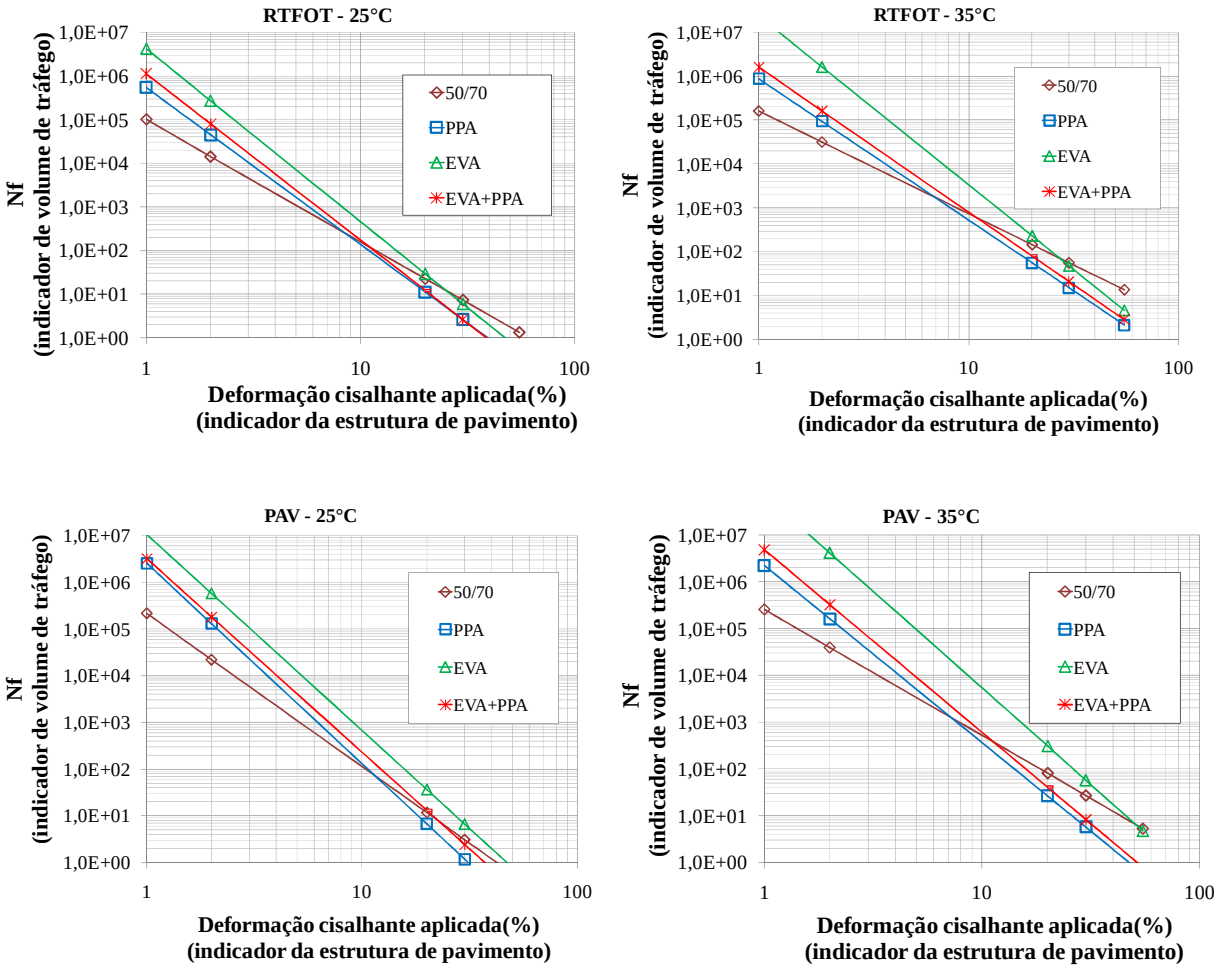


Figura 29. Comparativo das vidas de fadiga em função da deformação. CAP puro, CAP+PPA, CAP+EVA e CAP+EVA+PPA

Nas duas condições de envelhecimento, ocorreu aumento da vida de fadiga de todos os materiais deste grupo, ao passar da temperatura de 25 para 35°C. O envelhecimento tornou os ligantes asfálticos mais resistentes à fadiga tanto a baixas quanto a altas deformações. Assim, o efeito do envelhecimento nas formulações com EVA não tem influência significativa na resposta do material ao aumento dos níveis de tensão. Vale a pena destacar ainda que a

sensibilidade ao nível de deformação é similar nos ligantes asfálticos modificados com CAP+PPA, CAP+EVA, CAP+EVA+PPA.

Modelos de fadiga do CAP puro, do CAP+PPA, do CAP+PE e do CAP+PE+PPA

Na Figura 30, pode-se observar que, na condição envelhecida a curto prazo, o material que apresentou melhor comportamento à fadiga, quando submetido a baixos níveis de deformação, foi o CAP+PPA. O segundo colocado foi o CAP+PE+PPA, muito próximo do

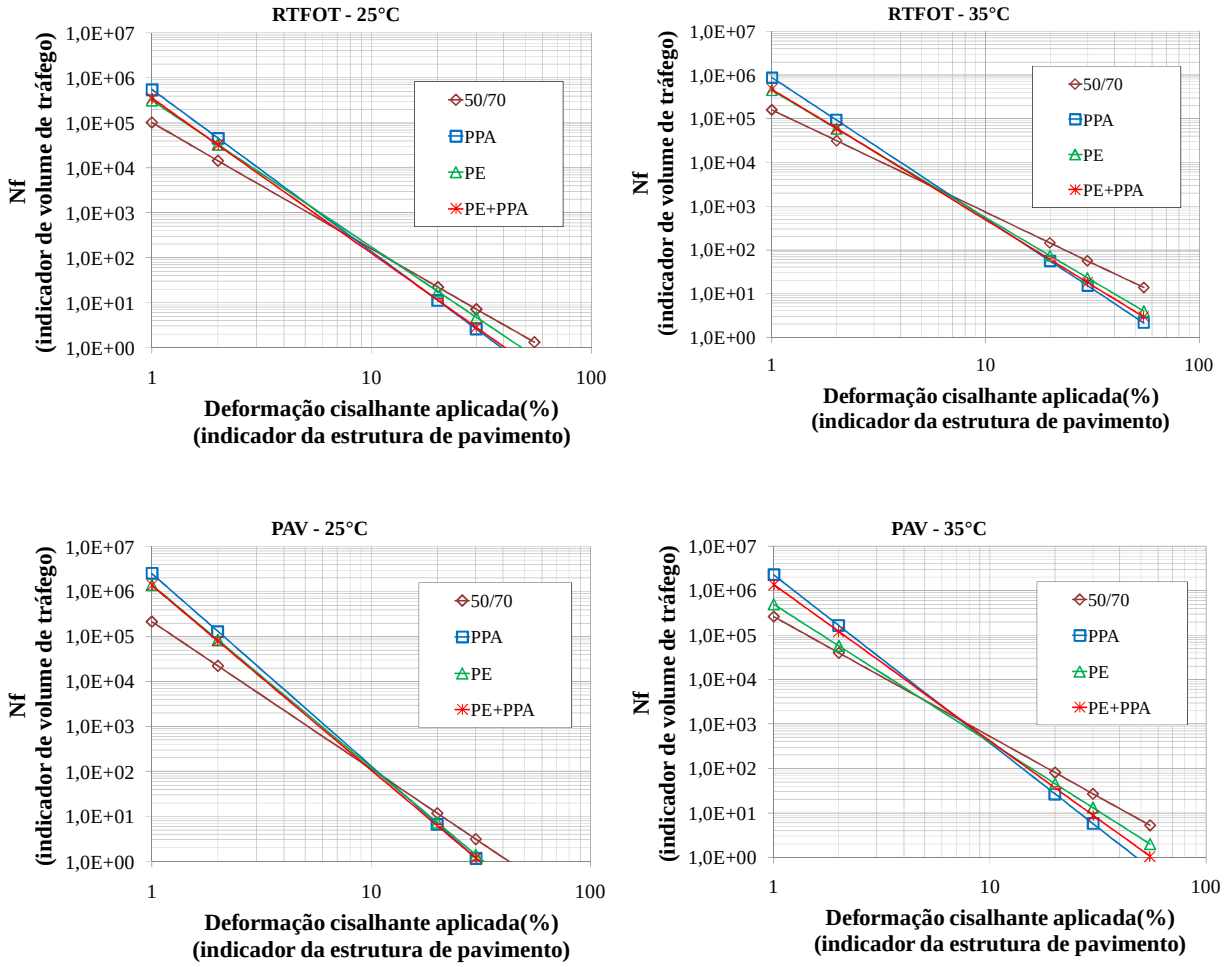


Figura 30. Comparativo das vidas de fadiga em função da deformação. CAP puro, CAP+PPA, CAP+PE e CAP+PE+PPA

terceiro colocado, que foi o CAP+PE. O de pior desempenho foi o CAP puro. Considerando altos níveis de deformação, o ordenamento dos ligantes asfálticos se inverte, passando o CAP puro a ter o melhor comportamento à fadiga e os modificados, o pior comportamento.

Na condição de envelhecimento a curto prazo, os comportamentos à fadiga dos ligantes asfálticos modificados por PE e PE+PPA nas deformações baixas são muito próximos, a ponto de não destacar um ou outro ligante asfáltico. No entanto, nas deformações altas, os ligantes modificados que não incluem PPA (CAP puro e CAP+PE) em sua formulação passam a ter um comportamento diferenciado.

Após o envelhecimento a longo prazo, o CAP+PPA (tanto a 25 quanto a 35°C) continua sendo o que tem melhor comportamento à fadiga, quando submetido a baixos níveis de deformação. O segundo colocado é o CAP+PE+PPA, muito próximo do terceiro colocado, que é o CAP+PE. O de pior desempenho é o CAP puro. No entanto, nas deformações altas, os ligantes asfálticos modificados passam a ter os piores desempenhos à fadiga e o de melhor comportamento passa a ser o CAP puro. Considerando deformações altas e nas condições de envelhecimento de curto prazo e temperatura de 25°C, os ligantes asfálticos modificados são equivalentes em termos de comportamento à fadiga. Na condição envelhecida a curto prazo e na temperatura de 25°C, o benefício da modificação na vida de fadiga dos ligantes asfálticos começa a ser evidente para deformações menores que 5%. Na condição envelhecida a longo prazo e na temperatura de 25°C, este benefício começa a ser evidente a partir de deformações inferiores a 7%.

Na condição envelhecida a curto prazo e na temperatura de 35°C, o benefício da adição de modificadores na vida de fadiga começa a ser evidente a para deformações menores que 5%. Na condição envelhecida a longo prazo e na temperatura de 35°C, este benefício começa a ser evidente a partir de deformações inferiores a 6% para todos os ligantes asfálticos modificados.

Como se observa na Figura 30, nas duas condições de envelhecimento, ocorre aumento da vida de fadiga de todos os materiais de este grupo, ao passar da temperatura de 25 para 35°C. O envelhecimento tornou os ligantes asfálticos mais resistentes a baixas deformações. Para altos níveis de deformação, o envelhecimento piora o desempenho à fadiga destes materiais. Em outras palavras, o envelhecimento torna os materiais mais suscetíveis ao efeito dos níveis de deformação.

Modelos de fadiga do CAP puro, do CAP+PPA, do CAP+SBR e do CAP+SBR+PPA

Na Figura 31, pode-se observar que, na condição envelhecida a curto prazo, o material que apresentou melhor comportamento à fadiga a 25°C quando submetido a baixos níveis de

deformação foi o CAP+PPA. O segundo colocado foi o CAP+SBR+PPA, muito próximo do terceiro e do último colocado, o CAP+SBR e o CAP puro, respectivamente. Considerando altos níveis de deformação, o ordenamento dos ligantes asfálticos se inverte, passando a ter o melhor comportamento o CAP puro e os piores comportamentos os ligantes asfálticos modificados.

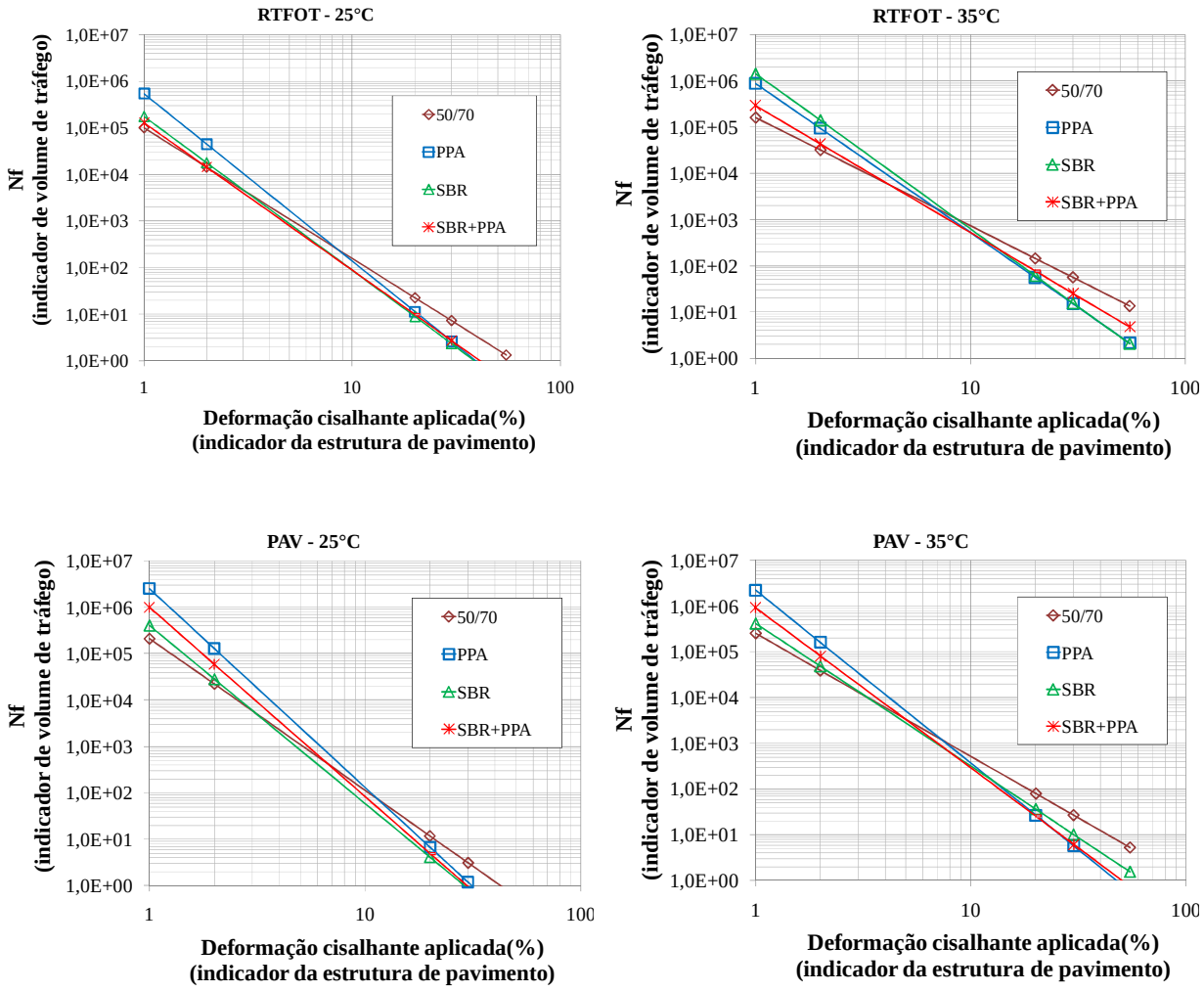


Figura 31 Comparativo das vidas de fadiga em função da deformação. CAP puro, CAP+PPA, CAP+SBR e CAP+SBR+PPA

Ainda na condição de envelhecimento a curto prazo e na temperatura de 35°C, quando submetido a baixos níveis de deformação, o material de melhor comportamento foi o CAP+SBR. O segundo colocado foi o CAP+ PPA, o terceiro o CAP+SBR+PPA e o último o CAP puro. Considerando altos níveis de deformação, o ordenamento dos ligantes asfálticos se inverte, passando a ter o melhor comportamento o CAP puro e os piores comportamentos os

modificados. Os ligantes asfálticos modificados por CAP+PPA e CAP+SBR têm comportamento equivalentes a altos níveis de deformação.

Na condição de envelhecimento dos materiais a longo prazo e nas temperaturas de 25 e 35°C o CAP+PPA é o que tem o melhor comportamento à fadiga quando submetido a baixos níveis de deformação. O segundo colocado foi o CAP+SBR+PPA e o terceiro colocado foi o CAP+SBR. O de pior desempenho foi o CAP puro. No entanto, nas deformações altas, os ligantes asfálticos modificados passam a ter os piores desempenhos à fadiga e com um comportamento similar entre eles, sendo o de melhor comportamento o CAP puro.

Os modelos de fadiga mostraram pouco benefício da incorporação de SBR no ligante asfáltico. Na condição envelhecida a curto prazo e na temperatura de 25°C, tal benefício é insignificante e começa a ser evidente apenas para deformações inferiores a 2%. Na condição envelhecida a longo prazo e na temperatura de 25°C, este benefício começa a ser evidente para deformações inferiores a 2% para os ligantes asfálticos modificados por SBR e inferiores a 5%, para os modificados por SBR+PPA.

Na condição envelhecida a curto prazo e na temperatura de 35°C, o benefício da adição de modificadores na vida de fadiga começa a ser evidente para deformações inferiores a 7%. Na condição envelhecida a longo prazo e na temperatura de 35°C, este benefício começa a ser observado para deformações inferiores a 2% para os ligante asfálticos modificados por SBR e inferiores a 4%, para os ligantes asfálticos modificados por SBR+PPA.

Nas duas condições de envelhecimento, ocorre aumento da vida de fadiga de todos os materiais deste grupo, ao passar da temperatura de 25 para 35°C. O envelhecimento tornou os ligantes asfálticos mais resistentes a baixas deformações, mas, para altos níveis de deformação, o envelhecimento piora o desempenho à fadiga destes materiais. Em outras palavras, o envelhecimento torna os materiais mais suscetíveis ao efeito dos níveis da deformação.

Em resumo, a sensibilidade da vida de fadiga ao nível de deformação pode ser observada por meio dos valores do coeficiente B dos modelos em cada condição de envelhecimento e temperatura avaliados apresentados na Tabela 11. Nesta tabela, pode ser observado que em ambas as condições de envelhecimento e temperatura, o ligante asfáltico puro foi o menos sensível ao nível de deformação. Na condição de envelhecimento a curto prazo e temperaturas de 25°C e 35°, os menos sensíveis dentre os ligantes asfálticos modificados foram o CAP+Elvaloy+PPA, o CAP+SBR+PPA e o CAP+SBS. Na condição de

envelhecimento a longo prazo e temperatura de 25°C, os ligantes asfálticos modificados menos sensíveis foram o CAP+Borracha, o CAP+Elvaloy+PPA e o CAP+SBS. Na condição de envelhecimento e temperatura de 35°C a longo prazo, os ligantes asfálticos modificados menos sensíveis foram o CAP+SBS, o CAP+PE e o CAP+Elvaloy+PPA.

Tabela 11. Valores do coeficiente B dos modelos de fadiga

Ligante asfáltico	RTFOT		PAV	
	25°C	35°C	25°C	35°C
50/70	-2,81	-2,34	-3,28	-2,69
PPA	-3,60	-3,23	-4,28	-3,79
Elvaloy+PPA	-3,02	-2,72	-3,60	-3,12
Borracha	-3,36	-3,25	-3,59	-3,41
Borracha+PPA	-3,42	-3,31	-3,91	-3,56
SBS	-3,22	-2,79	-3,70	-3,07
SBS+PPA	-3,33	-2,94	-4,18	-3,54
EVA	-3,96	-3,86	-4,20	-4,13
EVA+PPA	-3,81	-3,31	-4,14	-3,90
PE	-3,26	-2,91	-4,06	-3,09
PE+PPA	-3,45	-2,99	-4,10	-3,51
SBR	-3,31	-3,36	-3,84	-3,12
SBR+PPA	-3,17	-2,75	-4,08	-3,50

Em linhas gerais, se observa também como o aumento da temperatura de 25 para 35°C acarretou a diminuição dos valores de B em ambas as condições de envelhecimento, indicando que o aumento da temperatura poderia ter um efeito favorável a esta sensibilidade. O efeito contrário parece acontecer com o envelhecimento, já que, após a condição PAV, os valores de B apresentaram aumento. Assim, o enrijecimento do material, seja por conta da diminuição da temperatura ou por conta do envelhecimento, produz aumento na sensibilidade aos níveis de deformação.

4.2.2. Análise do índice de tolerância ao dano pelo parâmetro a_f

Nesta análise, o valor obtido como parâmetro para determinação da tolerância ao dano é o a_f, que é o valor do comprimento da trinca onde se apresenta o mínimo local da curva a_f versus da/dN. Na Figura 32, é indicada a maneira de exemplo a determinação do parâmetro a_f para os ligantes asfálticos CAP puro, CAP+PE e CAP+PE+PPA. Este valor do a_f corresponde

ao ponto anterior ao rápido incremento na taxa de crescimento da fissura. Ele é calculado com base nos dados da fase de varredura de amplitude linear do ensaio LAS.

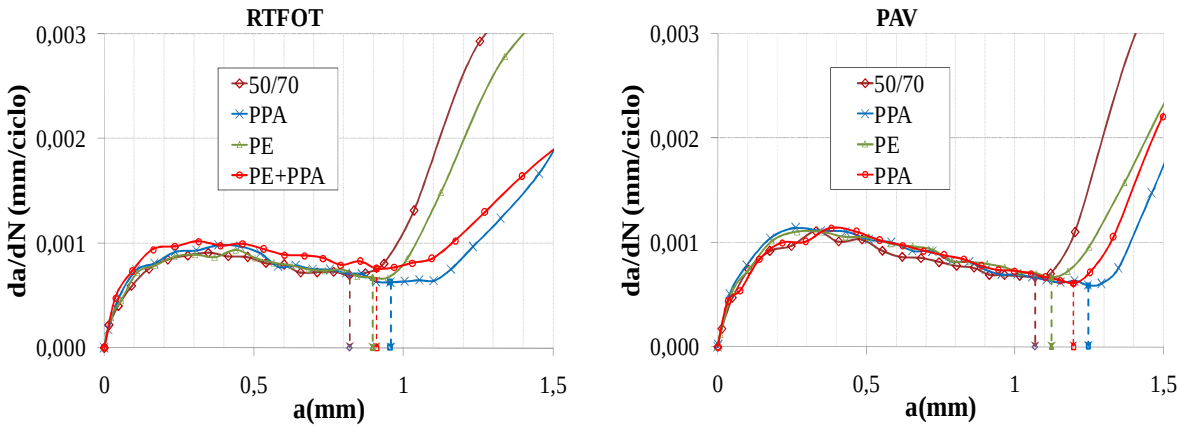


Figura 32. Determinação do valor do a_f na temperatura de 25°C envelhecimento a curto e longo prazos

Na Tabela 12, são apresentados os valores do a_f nas condições de envelhecimento de curto e longo prazo nas temperaturas de ensaio de 25 e 35°C. Estes resultados mostram que todos os asfaltos modificados testados apresentaram uma maior tolerância ao dano em relação ao ligante asfáltico puro. Na Figura 33, é apresentado o ordenamento de todos os materiais à luz deste parâmetro. Quanto maior o valor do a_f, mais tolerante ao dano o material é. Um comprimento da fissura na falha maior é desejável por indicar que o ligante asfáltico pode resistir a um fissuramento maior antes da rápida propagação da fissura.

Tabela 12. Parâmetro de tolerância ao dano a_f (mm) no ensaio LAS

Ligante asfáltico	RTFOT		PAV	
	25°C	35°C	25°C	35°C
50/70	0,711	0,313	1,080	0,507
PPA	0,971	0,696	1,225	1,005
Elvaloy+PPA	0,921	0,414	1,171	0,825
Borracha	1,041	0,299	1,051	n.d
Borracha+PPA	0,929	0,452	1,171	n.d
SBS	0,888	0,449	1,130	0,673
SBS+PPA	0,955	0,513	1,276	0,513
EVA	n.d	n.d	n.d	n.d
EVA+PPA	1,185	0,759	1,377	1,070
PE	0,923	0,549	1,114	0,613
PE+PPA	0,930	0,665	1,203	0,901
SBR	1,545	0,883	1,714	1,281
SBR+PPA	1,374	1,014	1,497	1,285

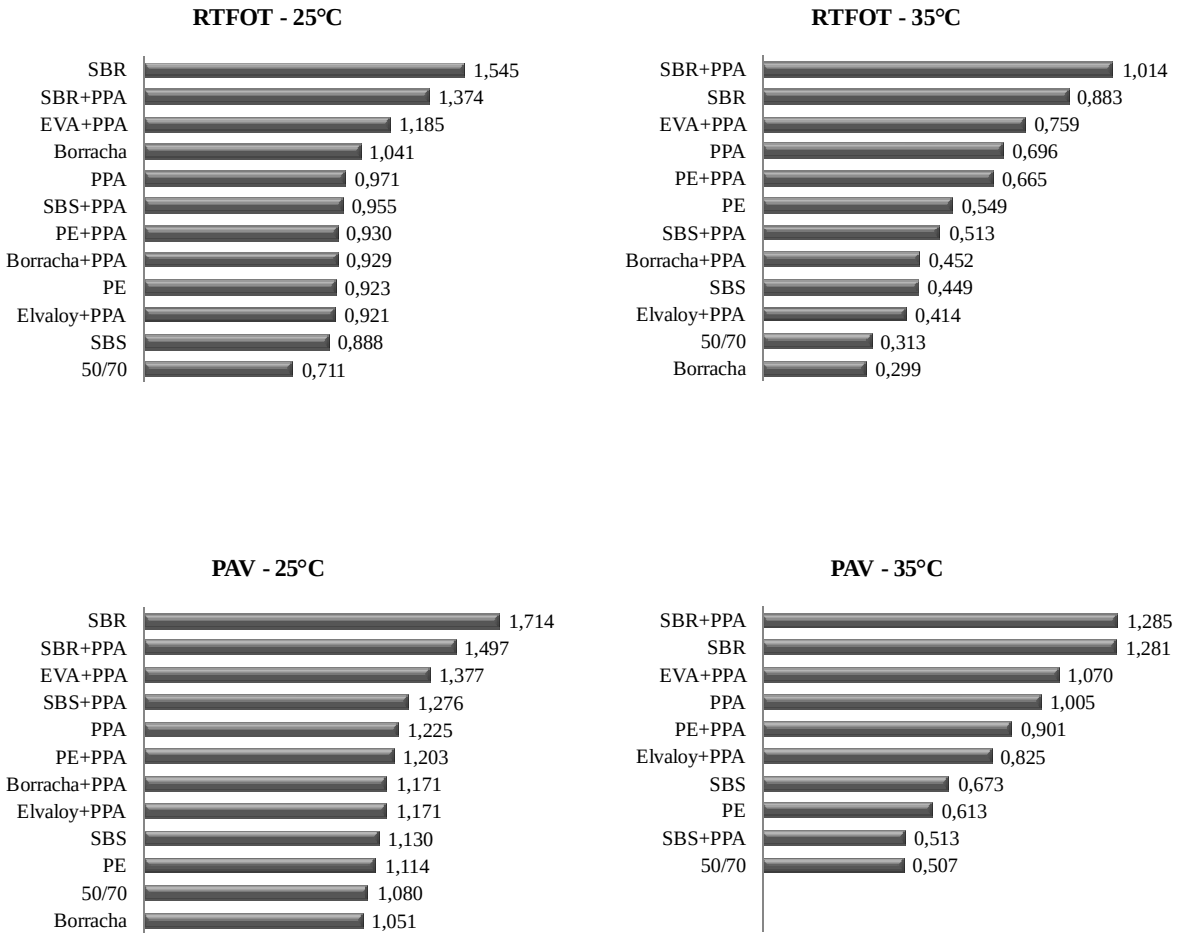


Figura 33. Ordenamento dos valores do parâmetro a_f

Na condição envelhecida a curto prazo e temperatura de 25°C, destacam-se nas primeiras cinco posições o CAP+SBR, o CAP+SBR+PPA, o CAP+EVA+PPA, o CAP+Borracha e o CAP+PPA. Na condição envelhecida a curto prazo e temperatura de 35°C, destacam-se nas primeiras cinco posições os ligantes asfálticos modificados com SBR+PPA, SBR, EVA+PPA, PPA, e PE+PPA. Na condição envelhecida de longo prazo e temperatura de 25°C, destacam-se nas primeiras cinco posições os ligantes asfálticos modificados com SBR, SBR+PPA, EVA+PPA, SBS+PPA e PPA. Na condição envelhecida de longo prazo e temperatura de 35°C, destacam-se nas primeiras cinco posições os ligantes asfálticos modificados com SBR+PPA,SBR, EVA+PPA, PPA e PE+PPA.

Uma das dificuldades enfrentadas ao longo do trabalho foi a impossibilidade da determinação do mínimo local na curva da taxa de crescimento da fissura para alguns ligantes

asfálticos (Figura 34). Este foi o caso do CAP+EVA, o qual não apresentou o mínimo local em nenhuma das condições de temperatura e envelhecimento avaliadas. Uma situação similar foi encontrada para o CAP+borracha e o CAP+borracha+PPA a 35°C na condição envelhecida no PAV.

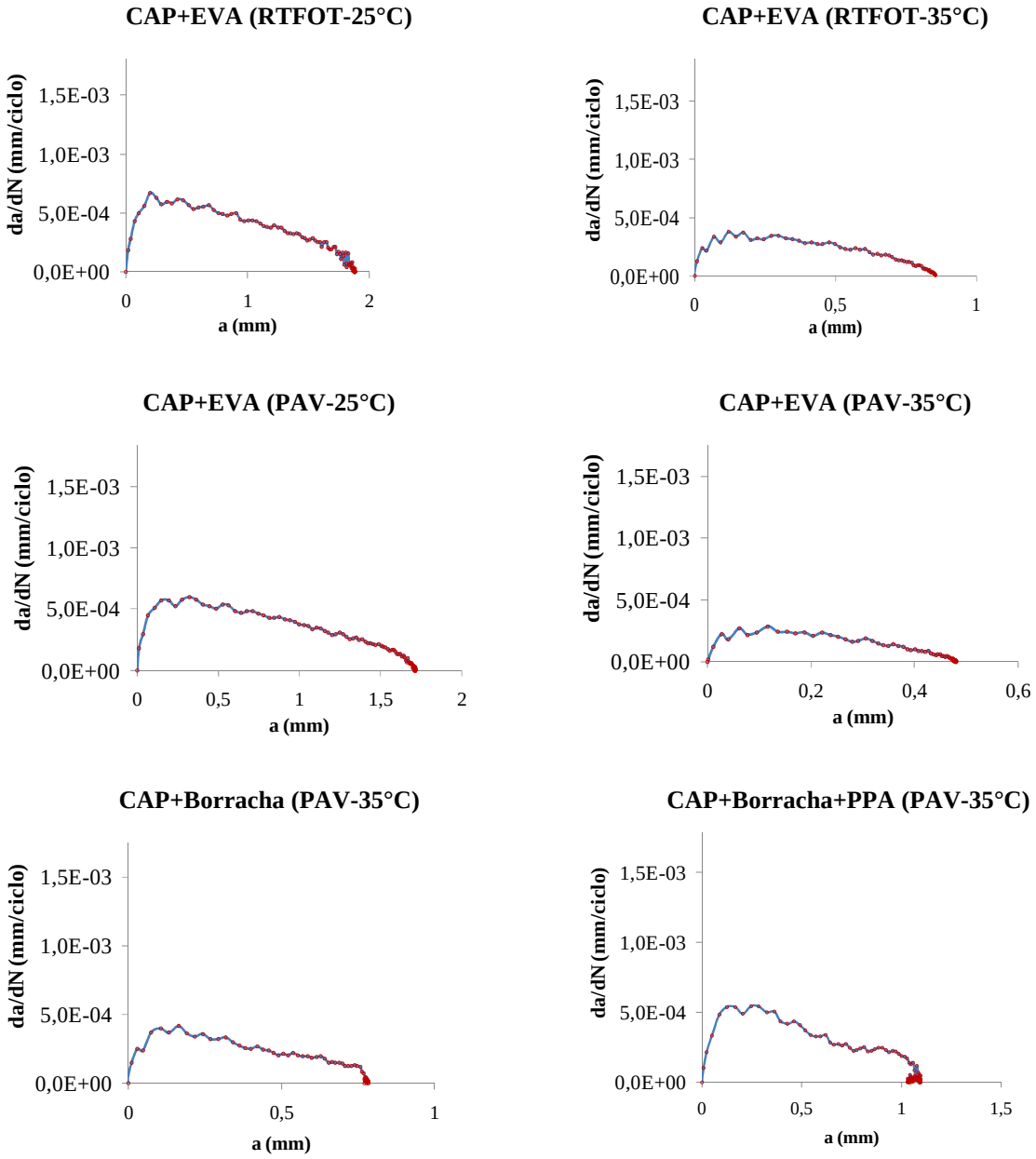


Figura 34. Taxa de crescimento da fissura (da/dN) x a de alguns materiais que não apresentaram o mínimo local na determinação do a_f

Para alguns materiais, foi preciso aumentar a amplitude de deformação, já que não foi possível obter a curva completa de da/dN x a quando se executou o ensaio de acordo com

carregamento do protocolo da norma AASHTO TP 101-12-UL (o qual vai até o máximo de 30% em 300 segundos). No caso do CAP+EVA, foi preciso aumentar a deformação do ensaio até 80% em 800 segundos, conservando a mesma taxa de incremento de deformação linear do protocolo da AASTHO.

4.3. EFEITO DA TEMPERATURA NA VIDA DE FADIGA DOS LIGANTES ASFÁLTICOS

Como é conhecido, as mudanças de temperatura têm influência nas propriedades viscoelásticas do ligante asfáltico, e por correspondência, na reposta que ele tem ante o carregamento cíclico. Embora o comportamento à fadiga seja avaliado na temperatura intermediária do pavimento, as variações sazonais de temperatura podem alterar a resposta do mesmo ante o carregamento cíclico.

4.3.1. Efeito da temperatura com base no parâmetro a_f de tolerância ao dano obtido no ensaio LAS

Na Tabela 13, mostra-se a sensibilidade ou taxa de variação do parâmetro a_f com a variação da temperatura dos ligantes asfálticos nas duas condições de envelhecimento avaliadas (RTFOT e PAV). Observa-se uma diminuição do valor do a_f (comprimento da fissura na falha) com o aumento da temperatura, tanto a curto quanto a longo prazo. Isto indica uma redução da vida de fadiga do material com o aumento da temperatura.

Tabela 13. Sensibilidade do parâmetro a_f ao aumento da temperatura

Ligante asfáltico	RTFOT			PAV		
	25°C a_f (mm)	35°C a_f (mm)	Sensibilidade* %	25°C a_f (mm)	35°C a_f (mm)	Sensibilidade* %
50/70	0,71	0,31	-56%	1,08	0,51	-53%
PPA	0,97	0,70	-28%	1,22	1,01	-18%
Elvaloy+PPA	0,92	0,41	-55%	1,17	0,83	-30%
Borracha	1,04	0,30	-71%	1,05	n.d	n.d
Borracha+PPA	0,93	0,45	-51%	1,17	n.d	n.d
SBS	0,89	0,45	-49%	1,13	0,67	-40%
SBS+PPA	0,95	0,51	-46%	1,28	0,51	-60%
EVA	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
EVA+PPA	1,18	0,76	-36%	1,38	1,07	-22%
PE	0,92	0,55	-41%	1,11	0,61	-45%
PE+PPA	0,93	0,66	-28%	1,20	0,90	-25%
SBR	1,54	0,88	-43%	1,71	1,28	-25%
SBR+PPA	1,37	1,01	-26%	1,50	1,28	-14%

*A sensibilidade foi calculada como a relação entre a diferença entre os dois valores e o valor a 25°C.

Na condição de envelhecimento a curto prazo, os ligantes asfálticos modificados por SBR+PPA, PE+PPA e PPA foram os que apresentaram menor sensibilidade ao aumento da temperatura, evidenciado pela baixa taxa de variação do a_f com o aumento da temperatura. Os mais sensíveis ao aumento da temperatura nesta condição de envelhecimento foram os ligantes asfálticos CAP+Borracha, CAP puro e o CAP+Borracha+PPA.

Na condição envelhecida no PAV, pode ser observado que os ligantes asfálticos modificado com SBR+PPA, PPA e EVA+PPA apresentaram as menores sensibilidades ao aumento da temperatura. Ainda em relação ao envelhecimento a longo prazo, pode ser observada uma variação mais acentuada do a_f com o aumento da temperatura para os ligantes CAP+SBS+PPA, CAP puro e o CAP+PE.

Estes resultados divergem da lógica da especificação Superpave, a qual limita o valor máximo da rigidez do material para controlar a fadiga. Segundo esta lógica, o aumento da rigidez por conta da diminuição da temperatura poderia ser prejudicial à fadiga. Adotando a lógica da especificação, poderia se pensar na existência de uma temperatura a partir da qual este efeito começa a produzir diminuições nos valores do a_f.

4.3.2. Efeito da temperatura no ensaio de varredura de tempo

Ao observar em conjunto os resultados do comportamento à fadiga dos materiais na temperatura de 25 e 35°C no ensaio de varredura de tempo, nota-se a diminuição do N_f com o incremento da temperatura para a maioria dos materiais. Para visualizar claramente este efeito, na Tabela 14 é apresentada a variação do N_f com a temperatura em cada condição de envelhecimento.

Na condição de envelhecimento a curto prazo, alguns materiais apresentaram incremento do N_f com aumento da temperatura. Os ligantes asfálticos que apresentaram esta característica foram o CAP+SBR, CAP+Borracha+PPA, CAP+PE+PPA e CAP+Elvaloy+PPA. Ainda na condição de envelhecimento a curto prazo, os ligantes asfálticos modificados por EVA+PPA, SBS+PPA e Borracha foram os que apresentara menor sensibilidade ao aumento da temperatura, evidenciado pela baixa taxa de variação do N_f com o aumento da temperatura. Os mais sensíveis ao aumento da temperatura nesta condição de envelhecimento foram os ligantes asfálticos CAP+Borracha, CAP puro e o CAP+Borracha+PPA.

Tabela 14. Sensibilidade do N_f ao aumento da temperatura no ensaio de varredura de tempo

Ligante asfáltico	RTFOT			PAV		
	25°C N_f (ciclos)	35°C N_f (ciclos)	Sensibilidade* %	25°C N_f (ciclos)	35°C N_f (ciclos)	Sensibilidade* %
50/70	1.372	783	-43%	1.841	1.424	-23%
PPA	5.088	3.807	-25%	6.213	4.360	-30%
Elvaloy+PPA	7.929	11.934	51%	10.901	10.466	-4%
Borracha	7.082	5.698	-20%	25.155	16.503	-34%
Borracha+PPA	8.086	10.176	26%	13.422	18.900	41%
SBS	3.618	2.418	-33%	6.065	3.557	-41%
SBS+PPA	3.537	2.954	-16%	4.020	5.556	38%
EVA	22.522	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
EVA+PPA	7.786	4.386	-44%	13.634	2.685	-80%
PE	2.506	1.558	-38%	2.632	2.177	-17%
PE+PPA	2.233	2.874	29%	3.945	4.529	15%
SBR	9.532	9.891	4%	64.012	6.823	-89%
SBR+PPA	2.915	2.007	-31%	7.768	9.340	20%

*A sensibilidade foi calculada como a relação entre a diferença entre os dois valores e o valor a 25°C.

Na condição envelhecida no PAV, pode ser observado que os ligantes asfálticos modificados com SBR+PPA, PPA e EVA+PPA apresentaram as menores sensibilidades ao aumento da temperatura. Ainda em relação ao envelhecimento a longo prazo, pode ser observada uma variação mais acentuada do N_f com o aumento da temperatura para os ligantes CAP+Elvaloy+PPA, CAP+EVA+PPA e o CAP puro.

4.3.3. Efeitos da temperatura com base nos modelos de fadiga da análise do dano contínuo viscoelástico VECD

As Figura 22 a 26 do item 4.2.1 mostram que, com o aumento da temperatura de 25 para 35°C, ocorreu um deslocamento para cima e para a direita das curvas de fadiga para todos os materiais. Esse deslocamento indica que houve um incremento na vida de fadiga dos materiais por causa deste aumento na temperatura. Para visualizar claramente este efeito, é apresentada a variação do N_f com a temperatura em cada condição de envelhecimento, considerando um nível de deformação baixo (3%) (Tabela 15) e um nível de deformação alto (30%) (Tabela 16).

Considerando um nível baixo de deformação (3%) e na condição de envelhecimento a curto prazo, os ligantes asfálticos modificados por PE, PE+PPA e PPA foram os que

apresentaram menor sensibilidade ao aumento da temperatura, evidenciado pela baixa taxa de variação do N_f com o aumento da temperatura.

Tabela 15. Sensibilidade do N_f ao aumento da temperatura para o nível de deformação de 3%

Ligante asfáltico	RTFOT			PAV		
	25°C N_f (ciclos)	35°C N_f (ciclos)	Sensibilidade* %	25°C N_f (ciclos)	35°C N_f (ciclos)	Sensibilidade* %
50/70	4.624	12.221	164%	5.852	13.329	128%
PPA	10.433	25.342	143%	22.887	35.121	53%
Elvaloy+PPA	8.184	45.284	453%	11.283	28.526	153%
Borracha	13.082	99.054	657%	15.048	111.840	643%
Borracha+PPA	16.226	89.918	454%	17.352	64.493	272%
SBS	7.672	21.694	183%	9.788	21.013	115%
SBS+PPA	8.127	25.231	210%	12.742	26.718	110%
EVA	54.104	344.468	537%	104.551	774.885	641%
EVA+PPA	17.072	42.442	149%	33.625	66.718	98%
PE	8.711	18.254	110%	16.203	16.290	1%
PE+PPA	7.962	17.806	124%	15.059	28.598	90%
SBR	4.685	35.624	660%	6.018	13.560	125%
SBR+PPA	3.980	14.157	256%	11.373	19.709	73%

*A sensibilidade foi calculada como a relação entre a diferença entre os dois valores e o valor a 25°C.

Tabela 16. Sensibilidade do N_f ao aumento da temperatura para o nível de deformação de 30%

Ligante asfáltico	RTFOT			PAV		
	25°C N_f (ciclos)	35°C N_f (ciclos)	Sensibilidade* %	25°C N_f (ciclos)	35°C N_f (ciclos)	Sensibilidade* %
50/70	7	56	673%	3	27	775%
PPA	3	15	477%	1	6	384%
Elvaloy+PPA	8	86	1006%	3	22	661%
Borracha	6	56	875%	4	43	1013%
Borracha+PPA	6	44	623%	2	18	740%
SBS	5	35	664%	2	18	818%
SBS+PPA	4	29	668%	1	8	808%
EVA	6	48	700%	7	58	775%
EVA+PPA	3	21	697%	2	8	242%
PE	5	23	379%	1	13	819%
PE+PPA	3	18	539%	1	9	644%
SBR	2	16	578%	1	10	1074%
SBR+PPA	3	25	836%	1	6	555%

*A sensibilidade foi calculada como a relação entre a diferença entre os dois valores e o valor a 25°C.

Os mais sensíveis ao aumento da temperatura nesta condição de envelhecimento foram o CAP+SBR, o CAP+Borracha e o CAP+EVA. Na condição envelhecida no PAV, os ligantes

asfálticos modificados com PE, PPA e SBR+PPA apresentaram as menores sensibilidades ao aumento da temperatura. Ainda em relação ao envelhecimento a longo prazo, pode ser observada uma variação mais acentuada do N_f com o aumento da temperatura para o CAP+Borracha, CAP+EVA e o CAP+Borracha+PPA.

Considerando um nível alto de deformação (30%) e na condição de envelhecimento a curto prazo, os ligantes asfálticos modificados por PE, PPA e PE+PPA e o CAP puro foram os que apresentaram menor sensibilidade ao aumento da temperatura, evidenciado pela baixa taxa de variação do N_f com o aumento da temperatura. Os mais sensíveis ao aumento da temperatura nesta condição de envelhecimento foram os ligantes asfálticos CAP+Elvaloy+PPA, o CAP+Borracha, e o CAP+SBR+PPA. Na condição envelhecida no PAV, pode ser observado que os ligantes asfálticos modificados com PE+PPA, PPA e PE+PPA apresentaram as menores sensibilidades ao aumento da temperatura. Ainda em relação ao envelhecimento a longo prazo, pode ser observada uma variação mais acentuada do N_f com o aumento da temperatura para os ligantes asfálticos CAP+EVA+PPA, CAP+PPA e o CAP+SBR+PPA.

Quanto à variação da vida de fadiga com o aumento da temperatura, as duas análises do ensaio LAS apresentaram conclusões contraditórias. Os resultados das análises de dano contínuo viscoelástico (VECD) mostraram que o aumento da temperatura produz, em todos os casos, incremento na vida de fadiga, ao passo que a análise de tolerância ao dano por meio do parâmetro a_f indica que o aumento da temperatura provoca diminuição da vida de fadiga dos materiais.

4.4. EFEITO DO ENVELHECIMENTO NA VIDA DE FADIGA DOS LIGANTES ASFÁLTICOS

4.4.1. Efeito do envelhecimento com base no parâmetro a_f

Na Tabela 17, mostra-se a sensibilidade ou taxa de variação do parâmetro a_f com o envelhecimento dos ligantes asfálticos nas duas condições de temperatura avaliadas (25 e 35°C). Na temperatura de 25°C, os ligantes asfálticos modificados por Borracha, SBR+PPA e SBR foram os que apresentaram menor sensibilidade ao envelhecimento, evidenciado pela baixa taxa de variação do a_f com envelhecimento. Os mais sensíveis ao envelhecimento nesta temperatura foram os ligantes asfálticos CAP puro, CAP+SBS+PPA e o CAP+PE+PPA.

Na temperatura de 35°C, pode ser observado que o ligante asfáltico modificado por SBS+PPA não apresentou variação do a_f com o envelhecimento. O CAP+PE e o CAP+SBR+PPA apresentaram as menores sensibilidades ao envelhecimento. Ainda em relação ao envelhecimento a longo prazo, pode ser observada uma variação mais acentuada do a_f com o envelhecimento para o CAP+Elvaloy+PPA, o CAP puro e o CAP+SBS.

Tabela 17. Sensibilidade do a_f ao envelhecimento

Ligante asfáltico	25°C			35°C		
	RTFOT a_f (mm)	PAV a_f (mm)	Sensibilidade* %	RTFOT a_f (mm)	PAV a_f (mm)	Sensibilidade* %
50/70	0,71	1,08	52%	0,31	0,51	62%
PPA	0,97	1,22	26%	0,70	1,01	45%
Elvaloy+PPA	0,92	1,17	27%	0,41	0,83	99%
Borracha	1,04	1,05	1%	0,30	n.d	n.d
Borracha+PPA	0,93	1,17	26%	0,45	n.d	n.d
SBS	0,89	1,13	27%	0,45	0,67	50%
SBS+PPA	0,95	1,28	34%	0,51	0,51	0%
EVA	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
EVA+PPA	1,18	1,38	16%	0,76	1,07	41%
PE	0,92	1,11	21%	0,55	0,61	12%
PE+PPA	0,93	1,20	29%	0,66	0,90	35%
SBR	1,54	1,71	11%	0,88	1,28	45%
SBR+PPA	1,37	1,50	9%	1,01	1,28	27%

*A sensibilidade foi calculada como a relação entre a diferença entre os dois valores e o valor no RTFOT.

Observa-se, em linhas gerais, um incremento do valor do a_f (comprimento da fissura na falha) com o envelhecimento, tanto a 25°C quanto a 35°C. Isto indica aumento da vida de fadiga do material com o envelhecimento. Estes resultados divergem da lógica da especificação Superpave, a qual limita o valor da rigidez do material para controlar a fadiga. Adotando a lógica da especificação, poderia se pensar na existência de um nível de envelhecimento a partir do qual este efeito começa a produzir diminuições nos valores do a_f.

4.4.2. Efeito do envelhecimento no ensaio de varredura de tempo

Ao observar em conjunto os resultados do comportamento dos materiais nas temperaturas de 25 e 35°C no ensaio de varredura de tempo, nota-se o incremento do N_f com

o envelhecimento para a maioria dos ligantes asfálticos à exceção das formulações CAP+Elvaloy+PPA, CAP+SBR e CAP+EVA+PPA ensaiadas na temperatura de 35°C. Esses ligantes asfálticos apresentaram diminuição do N_f com o envelhecimento. Para visualizar claramente o efeito do envelhecimento, é apresentada na Tabela 18 a taxa de variação do N_f com o envelhecimento em cada condição de temperatura.

Tabela 18. Sensibilidade do N_f ao envelhecimento no ensaio de varredura de tempo

Ligante asfáltico	25°C			35°C		
	RTFOT N_f (ciclos)	PAV N_f (ciclos)	Sensibilidade* %	RTFOT N_f (ciclos)	PAV N_f (ciclos)	Sensibilidade* %
50/70	1.372	1.841	34%	783	1.424	82%
PPA	5.088	6.213	22%	3.807	4.360	15%
Elvaloy+PPA	7.929	10.901	37%	11.934	10.466	-12%
Borracha	7.082	25.155	255%	5.698	16.503	190%
Borracha+PPA	8.086	13.422	66%	10.176	18.900	86%
SBS	3.618	6.065	68%	2.418	3.557	47%
SBS+PPA	3.537	4.020	14%	2.954	5.556	88%
EVA	22.522	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
EVA+PPA	7.786	13.634	75%	4.386	2.685	-39%
PE	2.506	2.632	5%	1.558	2.177	40%
PE+PPA	2.233	3.945	77%	2.874	4.529	58%
SBR	9.532	64.012	572%	9.891	6.823	-31%
SBR+PPA	2.915	7.768	166%	2.007	9.340	365%

*A sensibilidade foi calculada como a relação entre a diferença entre os dois valores e o valor no RTFOT.

Na temperatura de 25°C, todos os materiais apresentaram incremento do N_f com o envelhecimento. Nessa temperatura, os ligantes asfálticos modificados por PE, SBS+PPA e PPA foram os que apresentaram menor sensibilidade ao envelhecimento, evidenciado pela baixa taxa de variação do N_f ao passar da condição RTFOT para a condição PAV. Os mais sensíveis ao envelhecimento nesta temperatura foram os ligantes asfálticos CAP+SBR, CAP+Borracha e o CAP+SBR+PPA.

Na temperatura de 35°C, pode ser observado que os ligantes asfálticos modificados com Elvaloy+PPA, PPA e SBR apresentaram as menores sensibilidades ao envelhecimento. Ainda na temperatura de 25°C, pode ser observada uma variação mais acentuada do N_f com o envelhecimento para os ligantes CAP+SBR+PPA, CAP+Borracha e o CAP+SBS+PPA.

4.4.3. Efeitos do envelhecimento com base nos modelos de fadiga da análise do dano contínuo viscoelástico VECD

De acordo com as Figura 26 a 31 correspondentes aos modelos de fadiga obtidos da análise do VECD apresentadas no item 4.2.1, observa-se que com o envelhecimento ocorreu um aumento da vida de fadiga para baixos níveis de deformação e diminuição da vida de fadiga quando são considerados altos níveis de deformação. Para visualizar claramente este efeito, é apresentada a variação do N_f com o envelhecimento em cada temperatura (25 e 35°C), considerando um nível de deformação baixo (3%) (Tabela 19), e um nível de deformação alto (30%) (Tabela 20).

Tabela 19. Sensibilidade do N_f ao envelhecimento para o nível de deformação de 3%

Ligante asfáltico	25°C			35°C		
	RTFOT N_f (ciclos)	PAV N_f (ciclos)	Sensibilidade* %	RTFOT N_f (ciclos)	PAV N_f (ciclos)	Sensibilidade* %
50/70	4.624	5.852	27%	12.221	13.329	9%
PPA	10.433	22.887	119%	25.342	35.121	39%
Elvaloy+PPA	8.184	11.283	38%	45.284	28.526	-37%
Borracha	13.082	15.048	15%	99.054	111.840	13%
Borracha+PPA	16.226	17.352	7%	89.918	64.493	-28%
SBS	7.672	9.788	28%	21.694	21.013	-3%
SBS+PPA	8.127	12.742	57%	25.231	26.718	6%
EVA	54.104	104.551	93%	344.468	774.885	125%
EVA+PPA	17.072	33.625	97%	42.442	66.718	57%
PE	8.711	16.203	86%	18.254	16.290	-11%
PE+PPA	7.962	15.059	89%	17.806	28.598	61%
SBR	4.685	6.018	28%	35.624	13.560	-62%
SBR+PPA	3.980	11.373	186%	14.157	19.709	39%

*A sensibilidade foi calculada como a relação entre a diferença entre os dois valores e o valor no RTFOT.

Considerando um nível baixo de deformação (3%), na temperatura de 25°C, todos os ligantes asfálticos modificados apresentaram aumento da vida de fadiga com o envelhecimento. Os ligantes asfálticos modificados por Borracha+PPA, Borracha e o CAP puro foram os que apresentaram menor sensibilidade ao envelhecimento, evidenciado pela baixa taxa de variação do N_f ao passar da condição RTFOT para a condição PAV. Os mais sensíveis ao envelhecimento nesta temperatura foram o CAP+SBR+PPA, o CAP+PPA e o CAP+EVA+PPA. Na temperatura de 35°C, pode ser observado que os ligantes asfálticos

modificados com SBS, SBS+PPA e o CAP puro apresentaram as menores sensibilidades ao envelhecimento. Ainda em relação a essa temperatura, pode ser observada uma variação mais acentuada do N_f com o envelhecimento para os ligantes asfálticos CAP+EVA, CAP+SBR e CAP+PE+PPA.

Considerando um nível alto de deformação (30%) e na temperatura de 25°C, a maioria dos ligantes asfálticos apresentaram diminuição da vida de fadiga com o envelhecimento, à exceção do CAP+EVA, o qual apresentou aumento. Os ligantes asfálticos modificados por EVA+PPA, EVA e Borracha foram os que apresentaram as menores sensibilidades ao envelhecimento, evidenciado pela baixa taxa de variação do N_f com este efeito. Os mais sensíveis ao envelhecimento nesta temperatura foram os ligantes asfálticos CAP+SBS+PPA, o CAP+PE e CAP+Borracha+PPA. Na temperatura de 35°C, pode ser observado que os ligantes asfálticos modificados com EVA, Borracha e SBR apresentaram as menores sensibilidades ao envelhecimento. Ainda nesta temperatura, pode ser observada uma variação mais acentuada do N_f com o envelhecimento para os ligantes CAP+SBR+PPA, CAP+Elvaloy+PPA e CAP+SBS+PPA.

Tabela 20. Sensibilidade do N_f ao envelhecimento para o nível de deformação de 30%

Ligante asfáltico	25°C			35°C		
	RTFOT N_f (ciclos)	PAV N_f (ciclos)	Sensibilidade* %	RTFOT N_f (ciclos)	PAV N_f (ciclos)	Sensibilidade* %
50/70	7	3	-57%	56	27	-51%
PPA	3	1	-54%	15	6	-62%
Elvaloy+PPA	8	3	-63%	86	22	-75%
Borracha	6	4	-33%	56	43	-23%
Borracha+PPA	6	2	-65%	44	18	-60%
SBS	5	2	-58%	35	18	-50%
SBS+PPA	4	1	-78%	29	8	-74%
EVA	6	7	11%	48	58	21%
EVA+PPA	3	2	-7%	21	8	-60%
PE	5	1	-70%	23	13	-42%
PE+PPA	3	1	-58%	18	9	-51%
SBR	2	1	-62%	16	10	-34%
SBR+PPA	3	1	-65%	25	6	-76%

*A sensibilidade foi calculada como a relação entre a diferença entre os dois valores e o valor no RTFOT.

4.5. COMPARAÇÃO DOS PARÂMETROS DE FADIGA COM O PARÂMETRO DE FADIGA (G*senδ) DA ESPECIFICAÇÃO SUPERPAVE

Embora o parâmetro de fadiga (G*senδ) da especificação Superpave tenha suas deficiências e limitações para caracterizar os ligantes asfálticos puros e modificados à fadiga, como já discutido nos itens 2.5.1 e 2.5.2, ele continua na especificação, por não haver ainda um candidato que do ponto de vista prático o substitua.

Com o propósito de entender melhor o comportamento à fadiga dos materiais avaliados aqui e de proporcionar uma transição para um parâmetro que permita caracterizar o comportamento à fadiga dos materiais, é preciso observar a relação entre o parâmetro atual da especificação Superpave e os parâmetros de fadiga medidos por meio dos ensaios realizados nesta pesquisa.

Na Tabela 21, são apresentados os valores do parâmetro da especificação G*senδ para cada um dos materiais, na condição PAV e temperaturas de ensaio aqui estudadas. Cabe destacar que o único material que não atendeu o limite de 5.000 kPa na condição PAV foi CAP+PE na temperatura de 25°C.

Tabela 21. Valores do parâmetro G*senδ (kPa)

Ligante asfáltico	PAV	
	25°C	35°C
50/70	4.393	923
PPA	4.442	1.256
Elvaloy+PPA	3.647	832
Borracha	1.966	447
Borracha+PPA	2.652	661
SBS	4.249	1.046
SBS+PPA	4.730	1.316
EVA	2.765	787
EVA+PPA	4.150	1.214
PE	5.325	1.410
PE+PPA	4.762	1.336
SBR	4.417	1.137
SBR+PPA	3.240	887

Nas Figura 35 a Figura 43, são apresentadas as correlações entre o parâmetro G*senδ e o índice de tolerância ao dano (a_f). Pode ser observado que não existe uma relação clara entre

os parâmetros G*senδ e a_f. Na temperatura de 25°C, na condição envelhecida no PAV, se observa uma maior dispersão dos valores de G*senδ, enquanto na temperatura de 35°C, os resultados parecem estar concentrados em torno de um único valor. Apesar dos valores de G*senδ de todos estes materiais serem próximos ou menos dispersos que os valores obtidos a 25°C, os valores de a_f e N_f continuam sendo bem diferentes, descartando a possibilidade de atribuir a diferença de comportamento da fadiga unicamente à diferença de rigidez dos materiais.

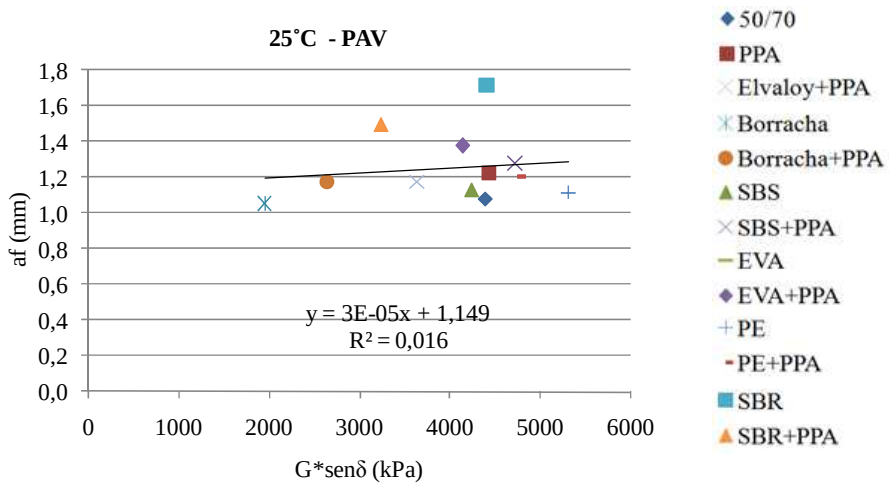


Figura 35. Correlação entre G*senδ e a_f do ensaio LAS a 25˚C na condição envelhecida no PAV

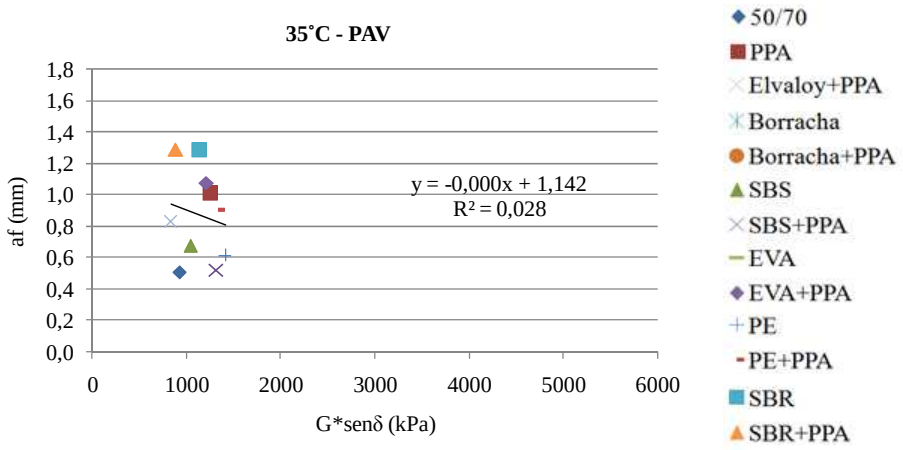


Figura 36. Correlação entre G*senδ e a_f do ensaio LAS a 35˚C na condição envelhecida no PAV

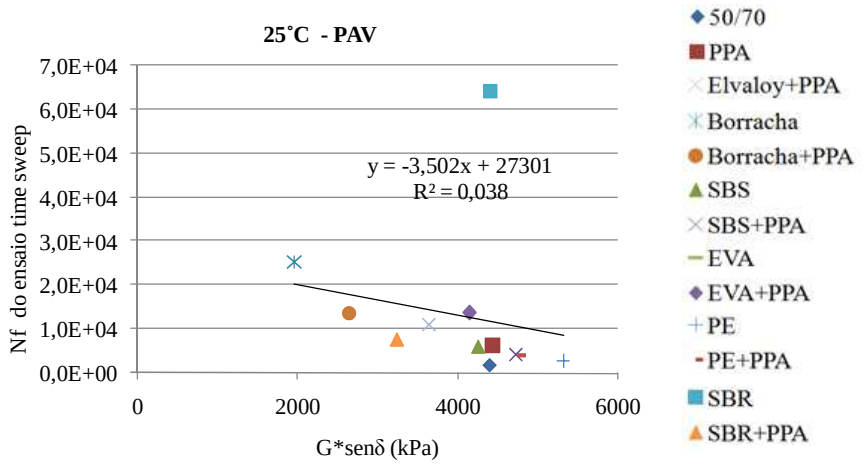


Figura 37. Correlação entre G*senδ e N_f do ensaio de varredura de tempo a 25˚C na condição PAV

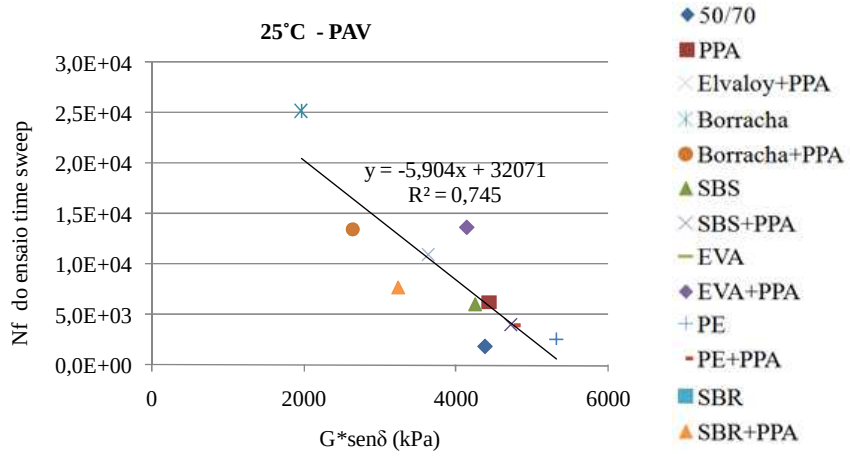


Figura 38. Correlação entre G*senδ e N_f do ensaio de varredura de tempo a 25˚C na condição PAV (descartando o dado do SBR)

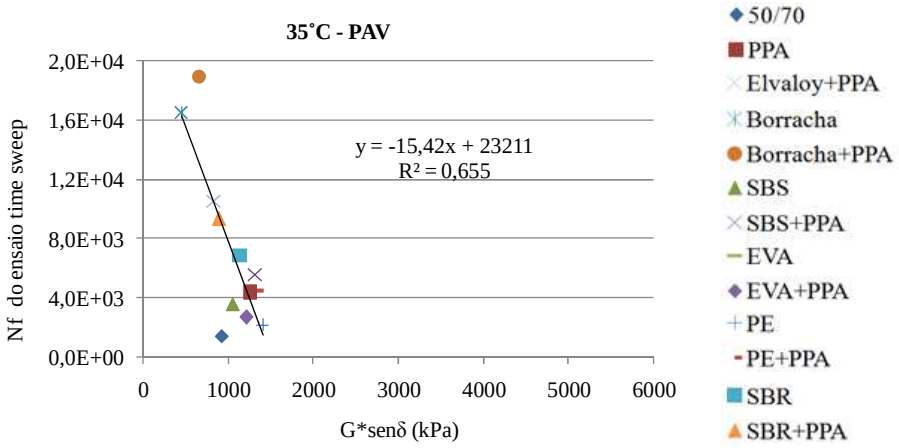


Figura 39. Correlação entre G*senδ e N_f do ensaio de varredura de tempo a 35˚C na condição PAV

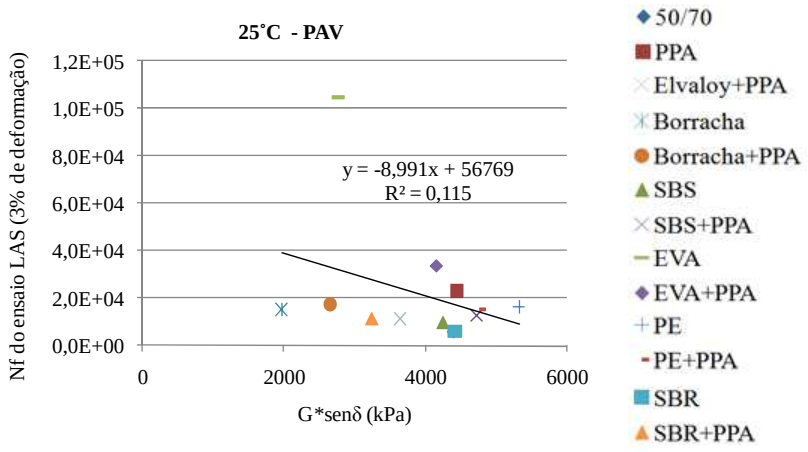


Figura 40. Correlação entre G*senδ e N_f do ensaio LAS a 25˚C na condição PAV a 3% de deformação

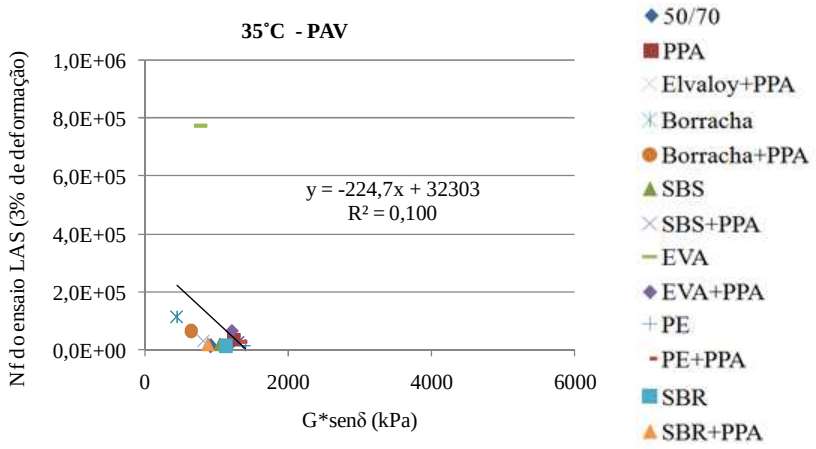


Figura 41. Correlação entre G*senδ e N_f do ensaio LAS a 35˚C na condição PAV a 3% de deformação

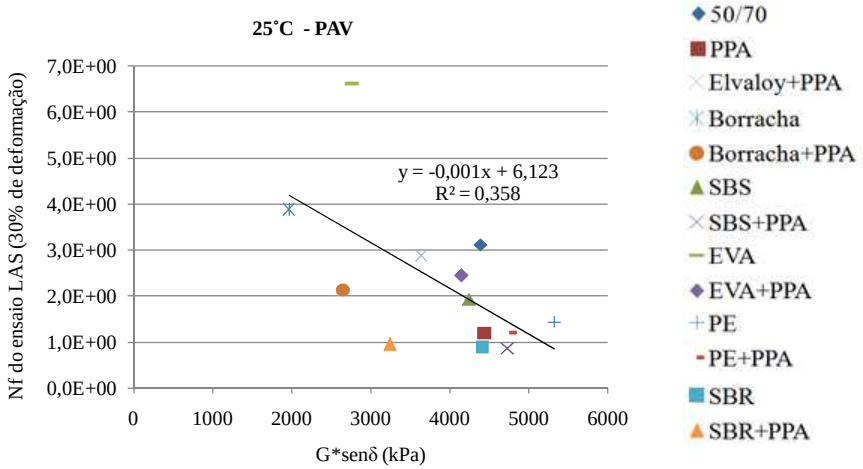


Figura 42. Correlação entre G*senδ e N_f do ensaio LAS a 25˚C na condição PAV a 30% de deformação

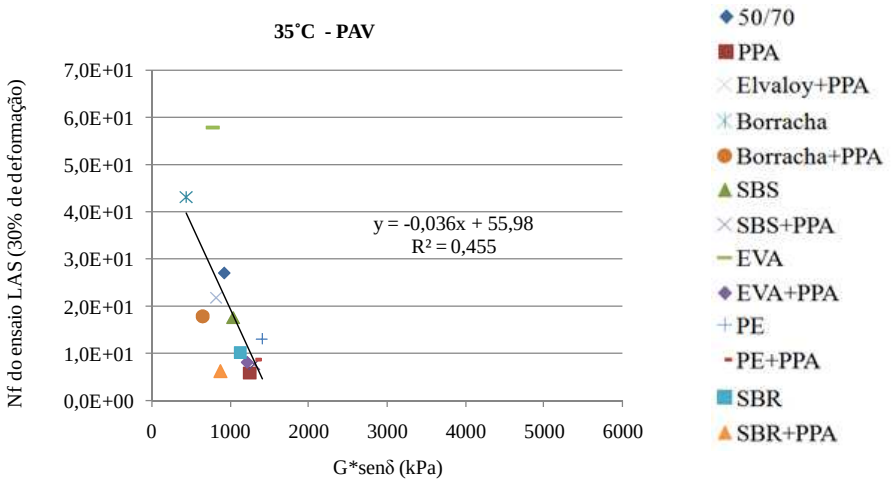


Figura 43. Correlação entre G*senδ e N_f do ensaio LAS a 35˚C na condição PAV a 30% de deformação

As correlações anteriores mostram que o parâmetro que melhor se ajusta ao parâmetro G*senδ da especificação Superpave foi o do ensaio de varredura de tempo na temperatura de 25°C com R^2 igual a 0,75 (descartando o valor do ligante asfáltico modificado por SBR). Em segundo lugar, figura o parâmetro do ensaio de varredura de tempo na temperatura de 35°C com R^2 igual a 0,65. As piores correlações com o parâmetro G*senδ foram as do parâmetro a_f do ensaio LAS com R^2 inferiores a 0,03.

4.6. RELAÇÕES ENTRE OS PARÂMETROS DE FADIGA DOS LIGANTES ASFÁLTICOS

Como o intuito de estabelecer relações entre os parâmetros de fadiga e tentar indicar quanto a variação de um parâmetro pode explicar a variação do outro, foram obtidos os valores dos coeficientes de determinação entre os parâmetros de fadiga dos ligantes asfálticos (Tabela 22). Estes parâmetros foram comparados para cada material nas mesmas condições de envelhecimento e temperatura. As melhores correlações foram obtidas para os parâmetros N_f do ensaio de varredura de tempo e o parâmetro N_f da análise do dano contínuo viscoelástico considerando 3% de deformação na temperatura de 25°C (R^2 = 0,82).

Tabela 22. Matriz dos coeficientes R^2 dos parâmetros de fadiga dos ligantes asfálticos

	Time sweep RTFOT 25°C	*Time sweep RTFOT 35°C*	*Time sweep PAV 25°C*	*Time sweep PAV 35°C*	*LAS (af) RTFOT 25°C*	*LAS (af) RTFOT 35°C*	*LAS (af) PAV 25°C*	*LAS (af) PAV 35°C*	*LAS (Nf-3%) RTFOT 25°C*	*LAS (Nf-3%) RTFOT 35°C*	*LAS (Nf-3%) PAV 25°C*	*LAS (Nf-3%) PAV 35°C*	*LAS (Nf-30%) RTFOT 25°C*	*LAS (Nf-30%) RTFOT 35°C*	*LAS (Nf-30%) PAV 25°C*	*LAS (Nf-30%) PAV 35°C*
Time sweep RTFOT 25°C	1,00															
Time sweep RTFOT 35°C		1,00														
Time sweep PAV 25°C			1,00													
Time sweep PAV 35°C				1,00												
LAS (af) RTFOT 25°C	0,24				1,00											
LAS (af) RTFOT 35°C		0,00				1,00										
LAS (af) PAV 25°C			0,45				1,00									
LAS (af) PAV 35°C				0,24				1,00								
LAS (Nf-3%) RTFOT 25°C	0,82				0,02				1,00							
LAS (Nf-3%) RTFOT 35°C		0,37				0,16				1,00						
LAS (Nf-3%) PAV 25°C			0,05				0,00				1,00					
LAS (Nf-3%) PAV 35°C				0,41				0,05				1,00				
LAS (Nf-30%) RTFOT 25°C	0,04				0,41				0,05				1,00			
LAS (Nf-30%) RTFOT 35°C		0,19				0,48				0,08				1,00		
LAS (Nf-30%) PAV 25°C			0,00				0,35				0,62				1,00	
LAS (Nf-30%) PAV 35°C				0,21				0,31				0,63				1,00

5. ORDENAMENTO DOS MATERIAIS EM TERMOS DOS PARÂMETROS DE FADIGA

Com o propósito de classificar o comportamento à fadiga dos ligantes asfálticos estudados, foi realizado um ordenamento dos ligantes asfálticos com base nos parâmetros obtidos de cada ensaio realizado. Os ordenamentos da vida de fadiga obtidos nos ligantes asfálticos consistem na atribuição de um valor inteiro de 1 a 13, sendo 1 o valor correspondente à maior vida de fadiga e 13 o valor correspondente à menor vida de fadiga. Diferentemente do critério anterior, no ordenamento das sensibilidades à temperatura e ao envelhecimento, aos materiais mais sensíveis foi atribuída a posição 13 e aos materiais menos sensíveis foi atribuída a posição 1, segundo a lógica de que materiais mais sensíveis à temperatura e ao envelhecimento sofreriam maiores variações da suas vidas de fadiga. Também no ordenamento com base no parâmetro de fadiga da especificação Superpave, aos materiais com menores valores de G*senδ foi atribuída a posição 1 e aos materiais com maiores valores foi atribuída a posição 13.

Os seguintes parâmetros compõem este ordenamento, segundo os seguintes critérios de classificação:

- vida de fadiga no ensaio de varredura de tempo e parâmetro N_{p20} - quanto maior melhor;
- vida de fadiga no ensaio LAS e parâmetro a_f - quanto maior melhor;
- vida de fadiga no ensaio LAS e parâmetro N_f a 3% de deformação - quanto maior melhor;
- vida de fadiga no ensaio LAS e parâmetro N_f a 30% de deformação - quanto maior melhor;
- sensibilidade ao nível deformação no ensaio LAS e parâmetro B (inclinação da curva de fadiga) - quanto menor melhor;
- sensibilidade à temperatura no ensaio de varredura de tempo e parâmetro N_{p20} - quanto menor melhor;
- sensibilidade à temperatura no ensaio LAS e parâmetro a_f - quanto menor melhor;

- sensibilidade à temperatura no ensaio LAS e parâmetro N_f a 3% de deformação - quanto menor melhor;
- sensibilidade à temperatura no ensaio LAS e parâmetro N_f a 30% de deformação - quanto menor melhor;
- sensibilidade ao envelhecimento no ensaio de varredura de tempo e parâmetro N_{p20} - quanto menor melhor;
- sensibilidade ao envelhecimento no ensaio LAS e parâmetro a_f - quanto menor melhor;
- sensibilidade ao envelhecimento no ensaio LAS e parâmetro N_f a 3% de deformação - quanto menor melhor;
- sensibilidade ao envelhecimento no ensaio LAS e parâmetro N_f a 30% de deformação - quanto menor melhor;
- parâmetro de fadiga da especificação Superpave G*senδ - quanto menor melhor.

Na Tabela 23, é apresentado o ordenamento global dos materiais à fadiga considerando todos os parâmetros de análise. Como se observa nesta tabela, cada material apresentou um ordenamento diferente em cada aspecto analisado. Esta diferença poderia estar associada aos métodos de ensaio, já que cada um apresenta condições particulares em seus procedimentos que podem alterar a resposta do material ao carregamento cíclico. Uma das hipóteses considerada no ordenamento é que os parâmetros apresentam pesos iguais.

Esta suposição pode não ser a mais adequada em todos os casos, já que podem existir condicionantes que podem ter pesos diferentes de outras. A título de exemplo, poderia se pensar que as sensibilidades à temperatura teriam um peso maior que a sensibilidade ao envelhecimento já que esta variação é mais frequente ao longo da vida útil dos pavimentos, enquanto que o envelhecimento é progressivo sem flutuação significativa ao longo da vida útil.

Tabela 23. Ordenamento final dos ligantes asfálticos quanto às suas características à fadiga

Ensaio e parâmetro	Condição de envelhecimento	Temperatura (°C)	50/70	PPA	SBS	SBS PPA	Borracha	Borracha PPA	PE	PE PPA	EVA	EVA PPA	SBR	SBR PPA	Elvaloy PPA
Vida de fadiga no ensaio de varredura de tempo e parâmetro N_{p20}	RTFOT	25	13	7	8	9	6	3	11	12	1	5	2	10	4
	RTFOT	35	12	6	9	7	4	2	11	8		5	3	10	1
	PAV	25	12	7	8	9	2	4	11	10		3	1	6	5
	PAV	35	12	8	9	6	2	1	11	7		10	5	4	3
Vida de fadiga no ensaio LAS e parâmetro a_f	RTFOT	25	12	5	11	6	4	8	9	7		3	1	2	10
	RTFOT	35	11	4	9	7	12	8	6	5		3	2	1	10
	PAV	25	11	5	9	4	12	7	10	6		3	1	2	8
	PAV	35	10	4	7	9			8	5		3	2	1	6
Vida de fadiga no ensaio LAS e parâmetro N_f a 3% de deformação	RTFOT	25	12	5	10	8	4	3	6	9	1	2	11	13	7
	RTFOT	35	13	7	9	8	2	3	10	11	1	5	6	12	4
	PAV	25	13	3	11	8	7	4	5	6	1	2	12	9	10
	PAV	35	13	5	9	8	2	4	11	6	1	3	12	10	7
Vida de fadiga no ensaio LAS e parâmetro N_f a 30% de deformação	RTFOT	25	2	12	7	8	5	3	6	9	4	11	13	10	1
	RTFOT	35	3	13	6	7	2	5	9	11	4	10	12	8	1
	PAV	25	3	10	7	13	2	6	8	9	1	5	12	11	4
	PAV	35	3	13	6	11	2	5	7	9	1	10	8	12	4
Sensibilidade à deformação no LAS e parâmetro B	RTFOT	25	1	11	4	7	8	9	5	10	13	12	6	3	2
	RTFOT	35	1	8	4	6	9	11	5	7	13	10	12	3	2
	PAV	25	1	13	4	11	2	6	7	9	12	10	5	8	3
	PAV	35	1	11	2	9	6	10	3	8	13	12	5	7	4
Sensibilidade à temperatura no ensaio time sweep e parâmetro N_{p20}	RTFOT		10	4	8	2	3	5	9	6		11	1	7	12
	PAV		5	6	10	8	7	9	3	2		11	12	4	1
Sensibilidade à temperatura no ensaio LAS e parâmetro a_f	RTFOT		11	2	8	7	12	9	5	3		4	6	1	10
	PAV		9	2	7	10			8	4		3	5	1	6

continua

Tabela 23. Ordenamento final dos ligantes asfálticos quanto às suas características à fadiga (continuação)

Ensaio e parâmetro	Condição de envelhecimento	Temperatura (°C)	50/70	PPA	SBS	SBS PPA	Borracha	Borracha PPA	PE	PE PPA	EVA	EVA PPA	SBR	SBR PPA	Elvaloy PPA
Sensibilidade à temperatura no ensaio LAS e parâmetro N_f (3%)	RTFOT		5	3	6	7	12	10	1	2	11	4	13	8	9
	PAV		9	2	7	6	13	11	1	4	12	5	8	3	10
Sensibilidade à temperatura no ensaio LAS e parâmetro N_f (30%)	RTFOT		8	2	6	7	12	5	1	3	10	9	4	11	13
	PAV		7	2	10	9	12	6	11	4	8	1	13	3	5
Sensibilidade ao envelhecimento no ensaio time sweep e parâmetro N_{p20}		25	4	3	7	2	11	6	1	9		8	12	10	5
		35	8	2	6	10	11	9	5	7		4	3	12	1
Sensibilidade ao envelhecimento no ensaio LAS e parâmetro a_f		25	12	7	9	11	1	6	5	10		4	3	2	8
		35	9	6	8	1			2	4		5	7	3	10
Sensibilidade ao envelhecimento no ensaio LAS e parâmetro N_f (3%)		25	3	12	4	7	2	1	8	9	10	11	5	13	6
		35	3	8	1	2	5	6	4	11	13	10	12	9	7
Sensibilidade ao envelhecimento no ensaio LAS e parâmetro N_f (30%)		25	5	4	7	13	3	11	12	6	2	1	8	10	9
		35	7	10	5	11	2	8	4	6	1	9	3	13	12
Parâmetro da especificação Superpave G* senδ	PAV	25	8	10	7	11	1	2	13	12	3	6	9	4	5
Ordenamento médio			7,6	6,5	7,2	7,7	5,9	6,1	6,8	7,2	6,2	6,3	6,9	6,9	6,1

conclusão

Na Figura 44, são apresentados os valores médios dos ordenamentos finais da vida de fadiga e da sensibilidade dos parâmetros de fadiga aos efeitos da temperatura e do envelhecimento. Destacam-se, nas primeiras posições, o CAP+Borracha (5,9), o CAP+Borracha+PPA (6,1), o CAP+Elvaloy+PPA (6,1), o CAP+EVA (6,2) e o CAP+EVA+PPA (6,3). Os materiais que apresentaram os piores comportamentos à fadiga foram o CAP+SBS+PPA (7,7) e o CAP puro (7,6). Embora se esperasse que o CAP puro obtivesse a pior classificação, o CAP+SBS+PPA apresentou média muito próxima, porem, maior que o CAP puro.

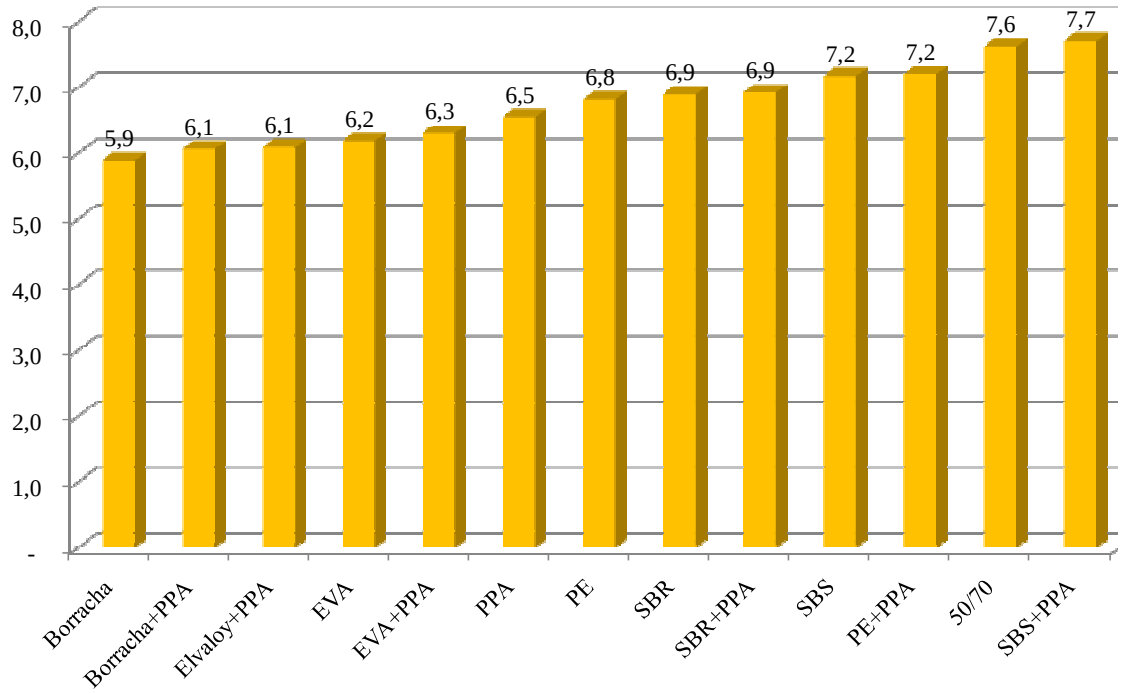


Figura 44. Ordenamentos finais da vida de fadiga e da sensibilidade dos parâmetros de fadiga aos efeitos da temperatura e do envelhecimento

Embora esta adoção de pesos iguais não seja completamente adequada, é preciso reconhecer também que a adoção objetiva destes pesos pode envolver outras complexidades que talvez a tornem inviável do ponto de vista prático, parecendo razoável assumi-los como iguais em primeira instância.

Porém, ao observar as posições médias dos ordenamentos da Figura 44, nota-se que as colocações são muito próximas (entre 6 e 8) com diferença absoluta de apenas duas posições entre o primeiro colocado e o último. Assim, poder-se-ia pensar em uma

classificação que agrupasse melhor alguns itens de interesse e, com base nestes agrupamentos, torna-se possível atribuir pesos específicos e mais adequados para cada item de interesse. Com base neste raciocínio, uma maneira prática seria agrupar os efeitos nas seguintes 4 categorias:

- vida de fadiga dos ligantes asfálticos;
- sensibilidade ao nível de deformação;
- sensibilidade à temperatura;
- sensibilidade ao envelhecimento.

Estas categorias simplificadas poderiam auxiliar os projetistas a adotar critérios de escolha dos ligantes asfálticos mais racionais e que levassem em conta as condições às quais materiais possam estar submetidos no campo. Nas Figuras 45 a 48, são apresentados os valores médios das posições conforme os ordenamentos nestas quatro categorias.

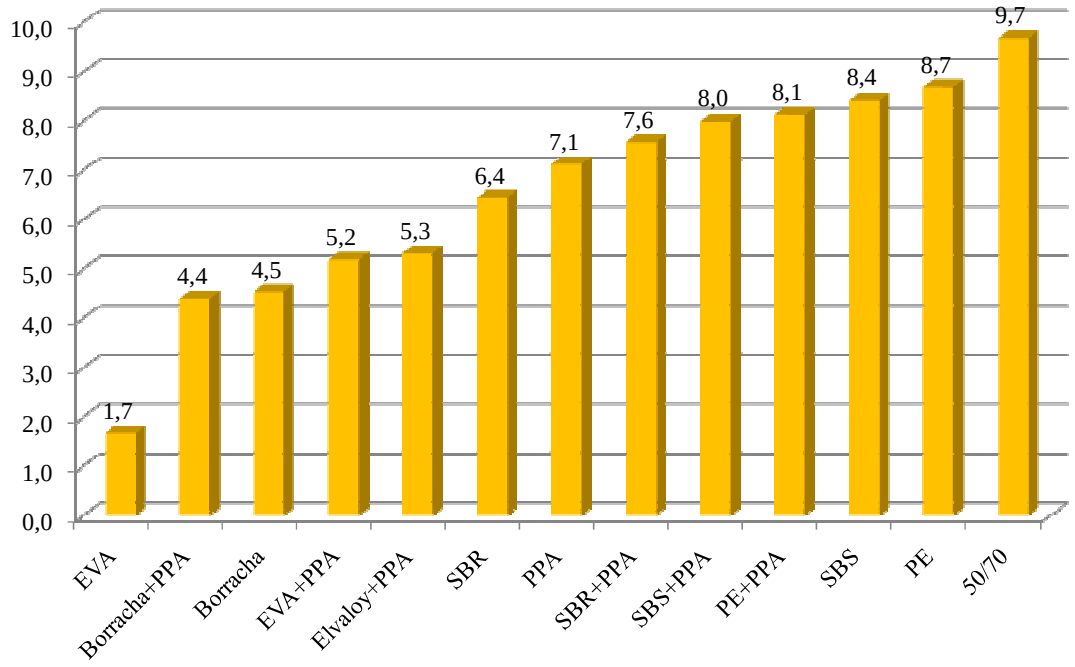


Figura 45. Posição média dos ordenamentos da vida de fadiga dos ligantes asfálticos

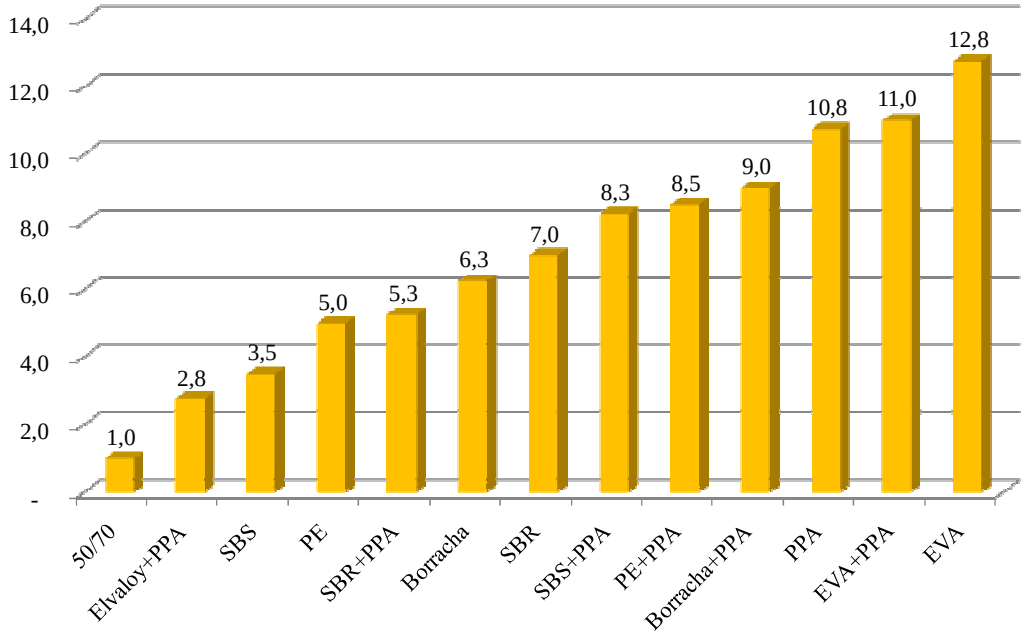


Figura 46. Posição média dos ordenamentos da sensibilidade ao nível de deformação

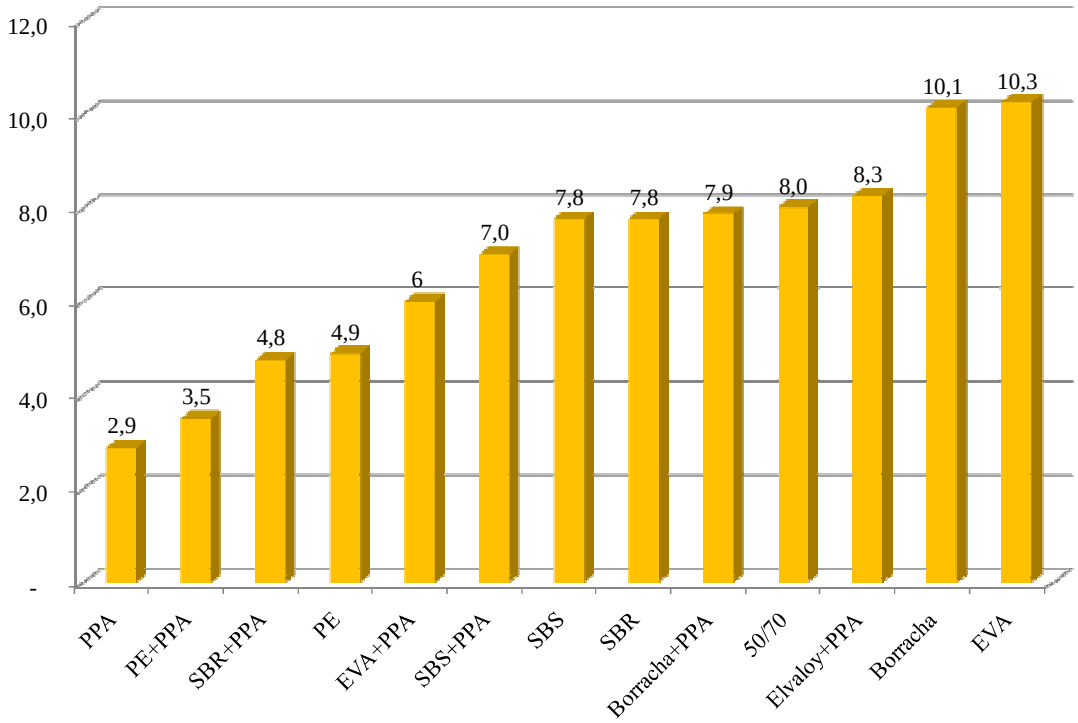


Figura 47. Posição média dos ordenamentos da sensibilidade à temperatura

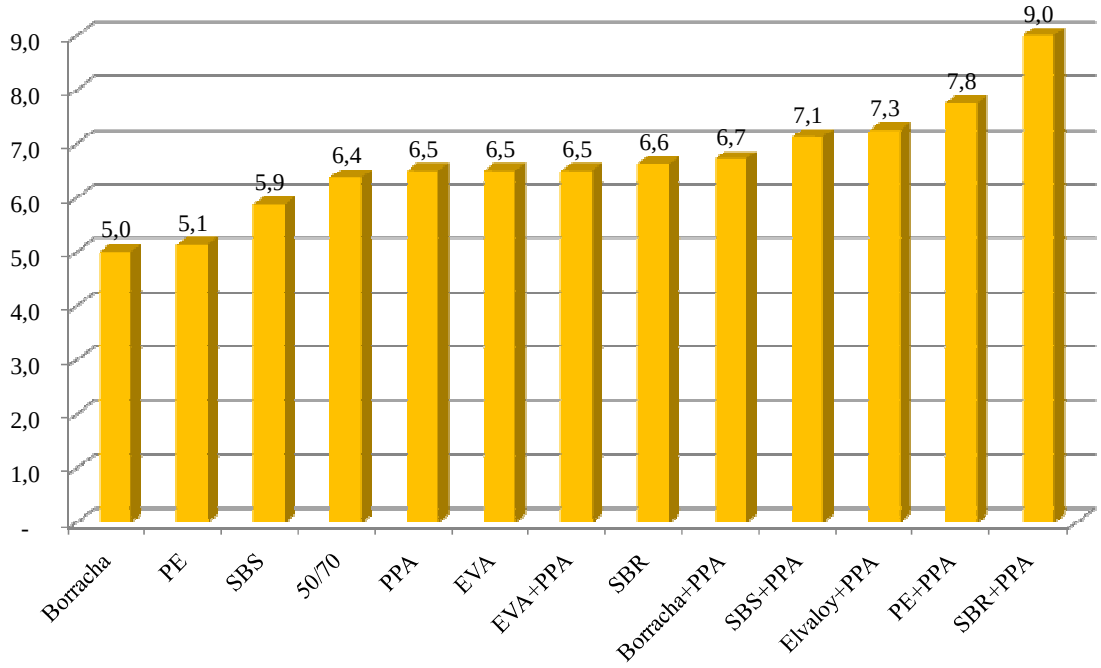


Figura 48. Posição média dos ordenamentos da sensibilidade ao envelhecimento

6. CONSIDERAÇÕES ADICIONAIS

Diante da impossibilidade da determinação do parâmetro a_f em alguns materiais discutida no capítulo 3, foram propostos outros procedimento de análise que podem contribuir com a determinação deste parâmetro e com o entendimento do processo de fadiga. Outra motivação para estas análises é que o parâmetro a_f não indica o nível de deformação no qual se produz a falha por fadiga em cada caso, podendo dar lugar a comparações em níveis de deformação diferentes. As observações aqui feitas refletem as reflexões que foram feitas ao longo do desenvolvimento desta pesquisa e não foram consideradas nas análises dos resultados.

6.1. APLICAÇÃO DO CONCEITO DA ENERGIA DISSIPADA NOS RESULTADOS DO ENSAIO LAS

Foi considerada a possibilidade de aplicar o conceito da energia dissipada aos resultados do ensaio LAS. Na Figura 49, são apresentados os gráficos da taxa de energia dissipada versus o número de ciclos para alguns materiais na condição envelhecida a curto prazo e testados na temperatura de 25°C. Nesta figura, pode ser observado um comportamento diferenciado de cada material com o número de ciclos. Nota-se que até aproximadamente os primeiros 1.000 ciclos, todos os materiais apresentaram a mesma declividade da taxa da energia dissipada com coeficiente angular de aproximadamente 0,43.

Um critério para definir o comportamento à fadiga dos materiais poderia estar baseado na observação de uma mudança na taxa de energia dissipada como aplicado no ensaio de varredura de tempo. O critério N_{p20} talvez não se mostre tão apropriado pela proximidade dos valores para diferentes materiais. Dado que as curvas depois de certo número de ciclos mostram um comportamento diferenciado, poder-se-ia pensar em um critério que indique estas mudanças. Uma possibilidade poderia ser determinar o número de ciclos no qual a curva passa a ter uma declividade maior que 1 ou seja dDER/dN=1. Este critério parece razoável ao indicar o ponto no qual a taxa de energia dissipada começa a aumentar mais rapidamente, conforme ilustrado na Figura 50 para o CAP+Borracha.

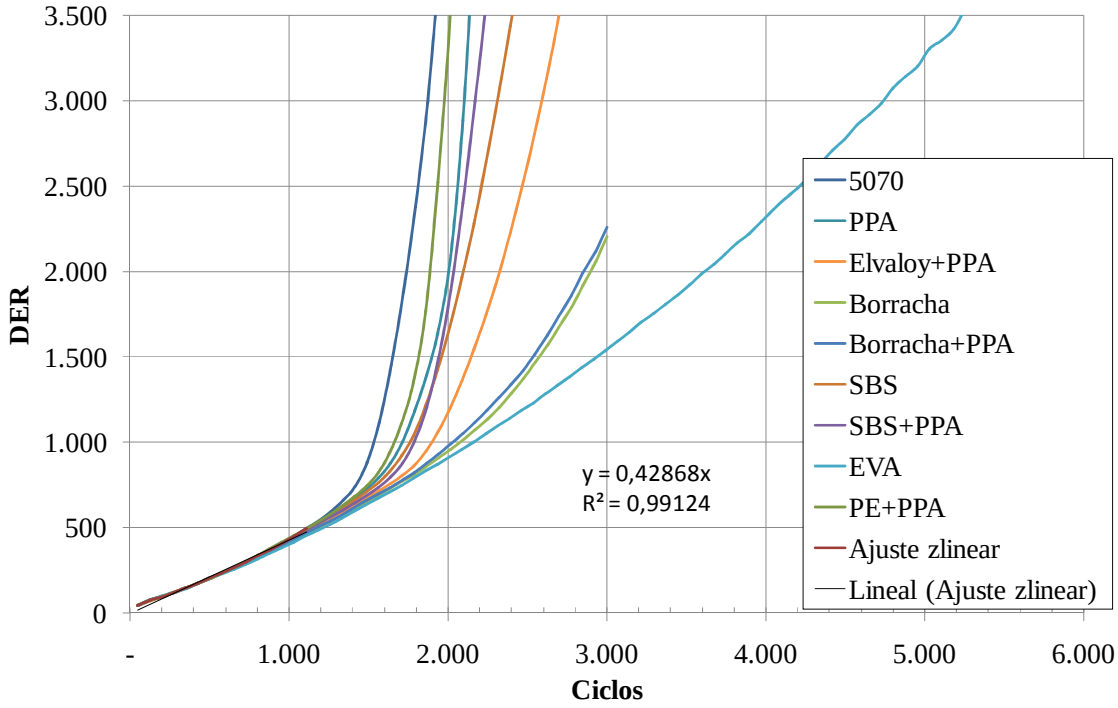


Figura 49. Taxa de energia dissipada obtida do ensaio LAS, a 25°C e amostras envelhecidas a curto prazo

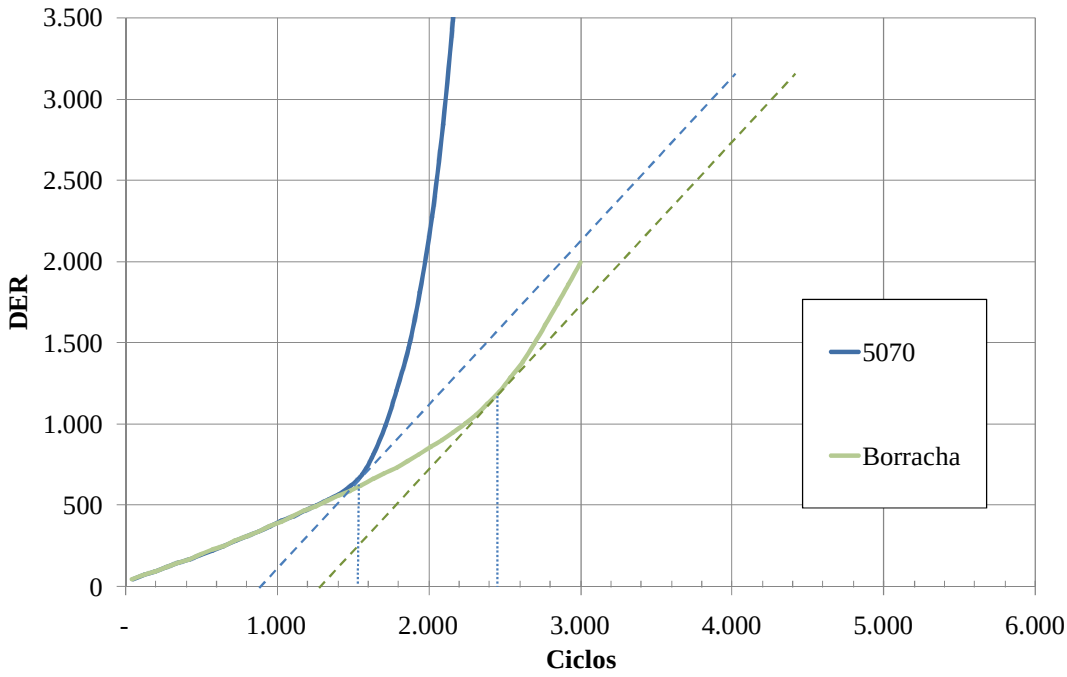


Figura 50. Determinação do número de ciclos na falha N_f para os ligantes asfálticos CAP puro e CAP+Borracha a 35°C e amostras envelhecidas a curto prazo

6.2. PARÂMETRO DE TOLERÂNCIA AO DANO DOS LIGANTES ASFÁLTICO

Outra alternativa considerada foi a observação das variáveis medidas durante a execução do ensaio LAS. Em primeira instância, foi observado o torque oscilatório por se tratar da variável utilizada nos cálculos do parâmetro a_f. Segundo Hintz (2012), esse parâmetro coincide com o ponto onde a resistência ao carregamento começa a decrescer rapidamente, conforme ilustrado na parte superior da Figura 51, para o material envelhecido no RTFOT na temperatura de 25°C. Porém, em alguns casos, como, por exemplo, o CAP+Borracha na condição PAV e na temperatura de 35°C, o torque oscilatório continua a aumentar e não reflete uma mudança clara na resposta ao carregamento. Outro exemplo é apresentado na Figura 52 para o CAP+EVA.

A este respeito, foi observado que a variável da tensão oscilatória (*osc. stress*) é coincidente com a mudança no torque oscilatório e, além disso, inclui correções por efeitos da inércia. Com base na observação desta variável, poderia ser determinado o valor do a_f correspondente à máxima tensão oscilatória nos casos em que o ponto de mínimo da curva da/dN não puder ser determinado.

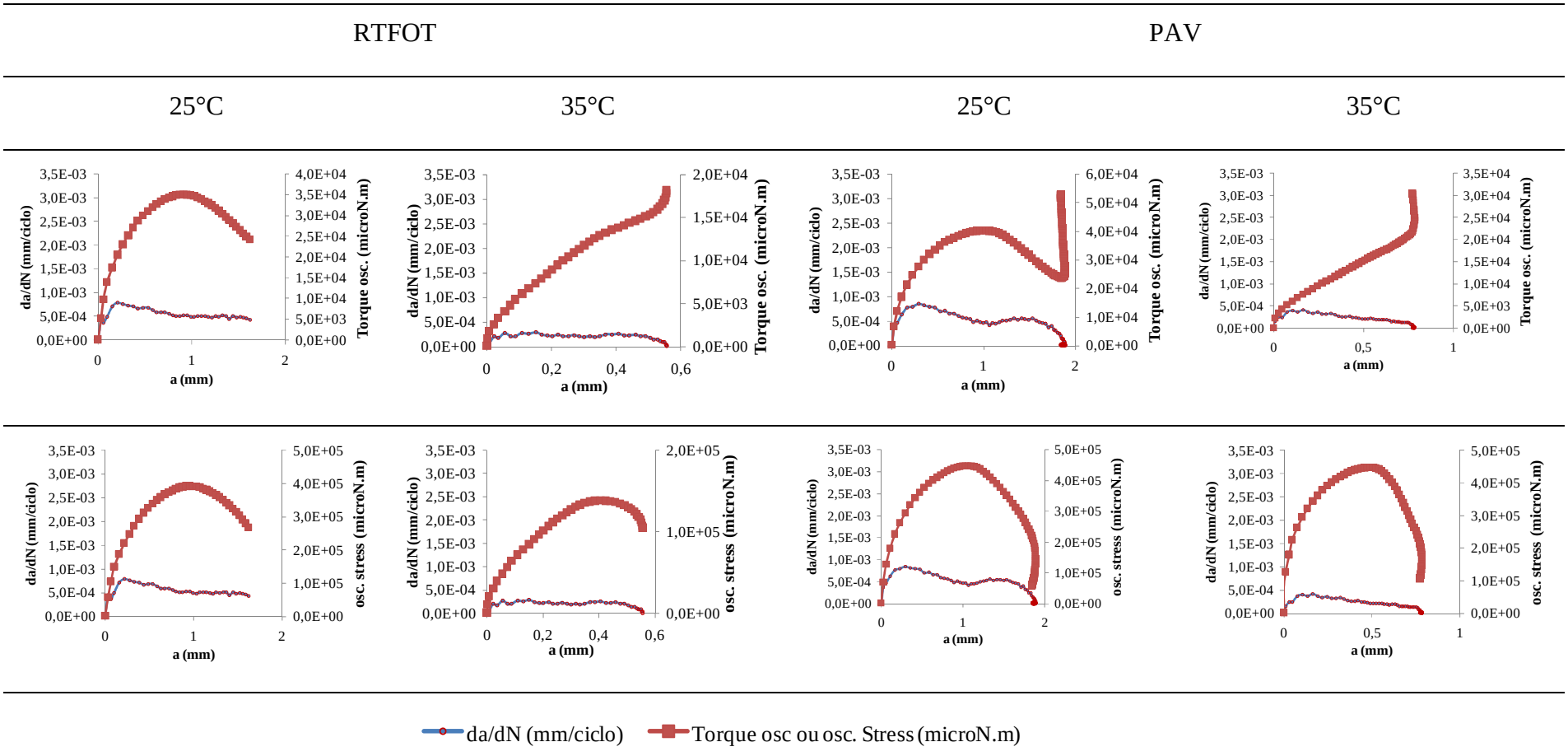


Figura 51. Curvas da/dN e de torque (fila superior) e de tensão oscilatória (fila inferior) para o CAP+Borracha

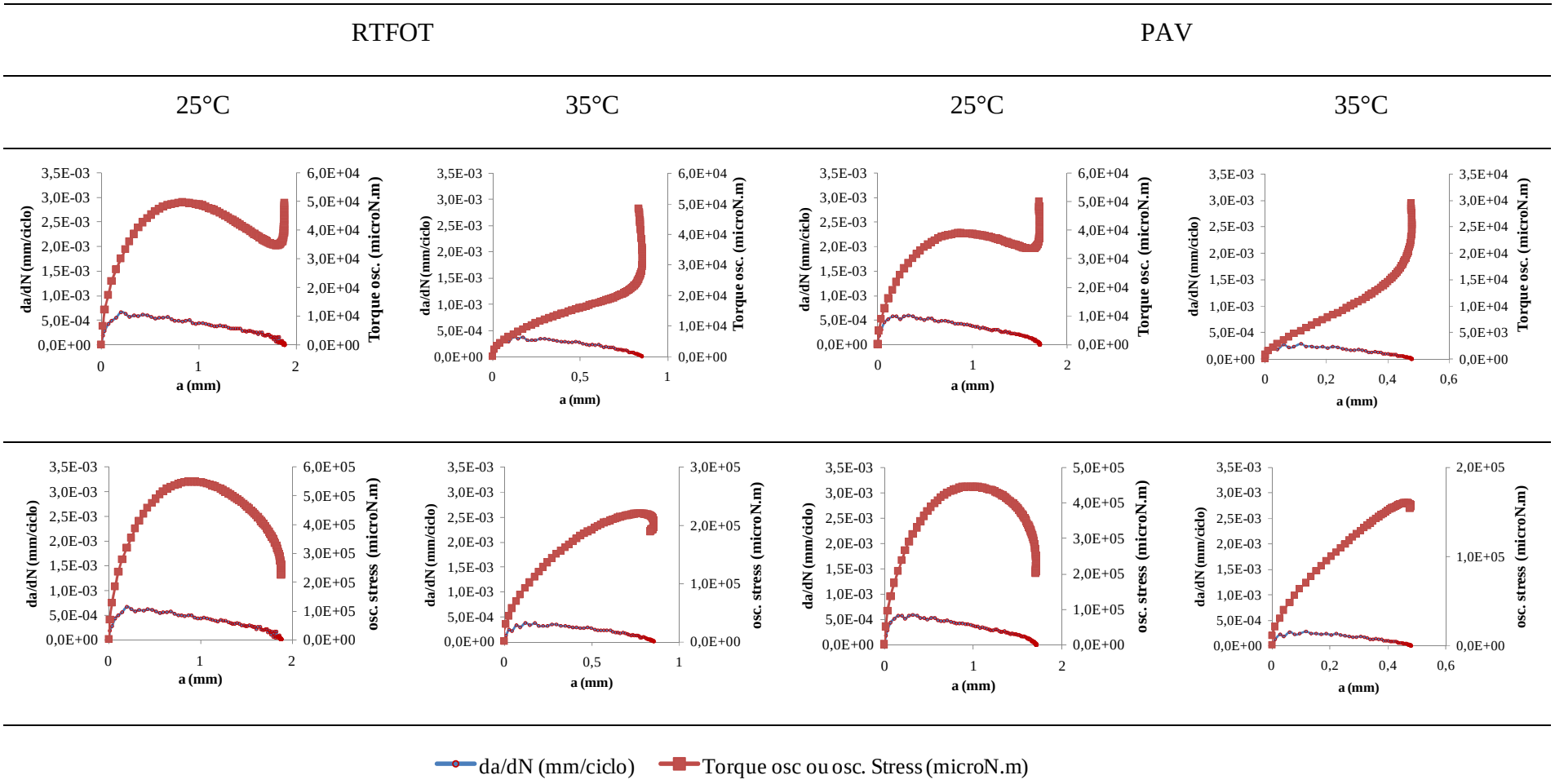


Figura 52. Curvas da/dN e de torque (fila superior) e de tensão oscilatória (fila inferior) para o CAP+EVA

7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste estudo, foram avaliados: a) o comportamento à fadiga de ligantes asfálticos modificados, utilizando os ensaios de varredura de tempo, de varredura de amplitude linear (LAS) e de cisalhamento oscilatório para determinação do parâmetro G*senδ. O plano experimental de ensaios contemplou um total de 12 ligantes asfálticos modificados de classificação PG 76-XX: CAP+PPA, CAP+SBS, CAP+SBS+PPA, CAP+Borracha, CAP+Borracha+PPA, CAP+PE, CAP+PE+PPA, CAP+EVA, CAP+EVA+PPA, CAP+SBR, CAP+SBR+PPA, CAP+Elvaloy+PPA. Foram feitos ordenamentos dos materiais em relação a diversos parâmetros de fadiga, incluindo a vida de fadiga dos ligantes asfálticos, os efeitos do nível de deformação, da temperatura e do envelhecimento sobre a vida de fadiga dos ligantes asfálticos. Também foram feitas algumas considerações sobre o critério de análise dos resultados do ensaio de varredura de amplitude linear.

Vida de fadiga dos ligantes asfálticos. As vidas de fadiga dos ligantes asfálticos foram ordenadas em termos das médias aritméticas de cada item avaliado. O material que apresentou a maior vida de fadiga foi o CAP+EVA e o que apresentou menor vida de fadiga foi o CAP puro. Dentre os modificados, o CAP+PE foi o que apresentou o pior comportamento à fadiga. Foram observados alguns ordenamentos médios equivalentes, dando origem a grupos de ligantes asfálticos cujas vidas de fadiga são equivalentes à luz dos ensaios realizados: um grupo é o formado pelo CAP+SBR+PPA, o CAP+SBS+PPA, o CAP+PE+PPA e o CAP+SBS, cuja posição média é 8, e outro grupo formados pelo CAP+Borracha, CAP+EVA+PPA e CAP+Elvaloy+PPA, cuja posição média é 5. Tais equivalências indicam que qualquer um destes materiais dentro dos seus respectivos grupos pode ser utilizado à luz dos parâmetros de fadiga aqui analisados.

Em relação à presença do PPA nos ligantes asfálticos modificados com outros aditivos, observa-se que ocorre aumento da vida de fadiga para a maioria das formulações do tipo CAP+modificador+PPA, em relação às suas correspondentes sem PPA, e redução da vida de fadiga apenas para as formulações com CAP+EVA+PPA e CAP+SBR+PPA.

Sensibilidade ao efeito do nível de deformação. A análise do dano contínuo viscoelástico do ensaio LAS mostra que a vida de fadiga é condicionada aos níveis de deformação aos quais o material é submetido: quanto maior a deformação, menor a vida de fadiga do material. Neste aspecto, materiais pouco sensíveis à deformação são desejáveis, de maneira a garantir um ótimo comportamento dentro de uma ampla faixa de deformações. O

material que apresentou a menor sensibilidade ao nível de deformação foi o CAP puro e o que apresentou maior sensibilidade foi o CAP+EVA. Dentre os modificados, o CAP+Elvaloy+PPA foi o que apresentou menor sensibilidade ao nível de deformação.

Em relação à presença do PPA nos ligantes asfálticos modificados com outros aditivos, observa-se que ocorre aumento da sensibilidade aos níveis de deformação para todas as formulações do tipo CAP+modificador+PPA em relação às suas correspondentes sem PPA, e redução da sensibilidade apenas quando o PPA é adicionado ao CAP+SBR. Apenas no caso do CAP+EVA a adição do PPA não provocou variação significativa da sensibilidade.

Os resultados apresentados neste estudo mostraram que o benefício da modificação de ligantes asfálticos é mais expressivo quando os materiais são submetidos a baixos níveis de deformação, ao passo que quando submetidos a altos níveis de deformação a modificação de ligantes asfálticos pode até resultar prejudicial. Sob baixos níveis de deformação, o CAP+EVA foi o que apresentou maior vida de fadiga e o CAP puro foi o que apresentou menor vida de fadiga. Já sob níveis altos de deformação, o CAP+Elvaloy+PPA e CAP puro foram os que apresentaram maiores vidas de fadiga. O CAP+PPA foi o que apresentou menor vida de fadiga.

Sensibilidade ao efeito da temperatura. Neste estudo, se mostra como a vida de fadiga dos ligantes asfálticos pode aumentar ou diminuir com o incremento da temperatura. Embora a variação da vida de fadiga com a variação da temperatura nos materiais estudados não mostre uma tendência clara, são desejados materiais com resposta ao carregamento cíclico mais uniforme ante as mudanças da temperatura. Assim, um critério razoável poderia considerar como o melhor o que tiver menor variação da vida de fadiga com as variações de temperatura. O material que apresentou a menor sensibilidade à temperatura foi o CAP+PPA e o que apresentou maior sensibilidade foi o CAP+EVA.

Foram observados alguns ordenamentos médios equivalentes, dando origem a grupos de ligantes asfálticos cujas sensibilidades à temperatura são equivalentes à luz dos ensaios realizados: um grupo é o formado pelo CAP+EVA e o CAP+Borracha, cuja posição média é 10, e outro grupo formado pelo CAP+SBS, CAP+SBR, CAP+Borracha+PPA, CAP puro e CAP+Elvaloy+PPA, cuja posição média é 8. Tais equivalências indicam que qualquer um destes materiais dentro dos seus respectivos grupos pode ser utilizado à luz dos parâmetros de fadiga aqui analisados.

Em relação à presença do PPA nos ligantes asfálticos modificados com outros aditivos, observa-se que ocorre diminuição da sensibilidade à temperatura para todas as formulações do tipo CAP+modificador+PPA, em relação às suas correspondentes sem PPA. Isto indica que a incorporação de PPA, mediante a redução da proporção do outro modificador, contribui amplamente para a redução da sensibilidade do ligante asfáltico modificado a variações de temperatura no que se refere à sua vida de fadiga.

Efeito do envelhecimento. Este efeito pode ser avaliado em termos das variações da vida de fadiga ao passar da condição de envelhecimento a curto prazo à condição de envelhecimento a longo prazo. Neste aspecto, o ideal seria se ter um material que apresentasse pouca variação da sua vida de fadiga com o envelhecimento. Neste aspecto, o ligante asfáltico menos suscetível foi o CAP+Borracha. O mais sensível ao envelhecimento foi o CAP+SBR+PPA. É interessante notar ainda que as diferenças entre um modificador ou outro não são tão expressivas quando é considerado este efeito.

Em relação à presença do PPA nos ligantes asfálticos modificados com outros aditivos, observa-se que ocorre aumento da sensibilidade para a maioria das formulações do tipo CAP+modificador+PPA, em relação às suas correspondentes sem PPA. Apenas no caso do CAP+EVA e do CAP puro a adição do PPA não provocou aumento significativo da sensibilidade ao envelhecimento.

Ordenamento final dos ligantes asfálticos. O ordenamento final foi obtido como a média aritmética dos ordenamentos de cada parâmetro avaliado. Os materiais mais indicados por esta análise foram o CAP+Borracha (5,9) e o CAP+Borracha+PPA (6,1). O CAP+Borracha se mostrou melhor por ter apresentado a menor sensibilidade ao envelhecimento, uma das maiores vidas de fadiga. O pior foi o CAP+SBS+PPA. Foram observados alguns ordenamentos médios equivalentes, dando origem a grupos de ligantes asfálticos cujos ordenamentos são equivalentes à luz dos ensaios realizados: um grupo é o formado pelo CAP+Borracha, o CAP+Borracha+PPA e o CAP+Elvaloy+PPA com posição média igual a 6, e outro grupo composto pelo CAP+PE, CAP+SBR, CAP+SBR+PPA, CAP+SBS e o CAP+PE+PPA, com posição média igual a 7. Tais equivalências indicam que qualquer um destes materiais dentro dos seus respectivos grupos pode ser utilizado à luz dos parâmetros de fadiga aqui analisados.

Em relação à presença do PPA nos ligantes asfálticos modificados com outros aditivos, observa-se que ocorre piora significativa das características de fadiga para o CAP+SBS+PPA, em relação à sua correspondente sem PPA. Apenas no caso do CAP puro a adição do PPA

provocou melhora significativa das características de fadiga. No caso dos demais, a adição do PPA provocou ligeira piora das características de fadiga, não entanto tal piora não é significativa ao ponto de se dizer que o PPA não pode ser utilizado em combinação com outros polímeros.

Considerações acerca dos ensaios de varredura de tempo

Materiais que apresentam alto desempenho podem levar muitas horas para mostrar a degradação suficiente para avaliá-lo em relação a suas propriedades de fadiga. A duração dos testes de varredura de tempo em muitos casos é indefinida, uma vez que é preciso monitorar as mudanças nas propriedades dos materiais com o número de ciclos de carregamento durante o ensaio para definir o momento de seu término. Apesar destas desvantagens tornarem este ensaio pouco atrativo do ponto de vista prático, um aspecto a destacar é que o próprio procedimento do ensaio e os resultados obtidos envolvem variáveis físicas de fácil interpretação, como mudanças nas propriedades viscoélasticas e conceitos de energia ao longo do número de ciclos.

Considerações acerca do ensaio LAS

Um ensaio acelerado como o LAS se mostra interessante pelo fato de solucionar o problema da duração dos testes. Outra vantagem importante do ensaio LAS usando a análise do dano contínuo viscoelástico é a possibilidade de obter por meio de um ensaio rápido um modelo de fadiga que permite determinar a vida de fadiga para vários níveis de deformação. Este aspecto é muito importante, já que por meio de um só ensaio podem ser feitas múltiplas análises em diferentes níveis de deformação, o que permite levar em consideração a estrutura do pavimento, ou seja, como seria a vida de fadiga da capa asfáltica caso a estrutura fosse rígida ou flexivel.

Porém, é interessante mencionar como as duas análises derivadas do ensaio LAS apresentaram conclusões contraditórias quando são avaliados os efeitos da temperatura sob a vida de fadiga dos ligantes asfálticos. Por um lado, as curvas de fadiga baseadas nas análises de dano contínuo viscoelástico mostraram que o aumento da temperatura produz, em todos os casos, incremento na vida de fadiga (ver Tabelas de 7 a 10 ou Figuras de 22 a 25). Por outro lado, a análise de tolerância ao dano por meio do parâmetro a_f indica que o aumento da temperatura pode provocar diminuição da vida de fadiga dos materiais (ver Tabela 12).

As comparações dos parâmetros de fadiga no ligante asfáltico mostraram que a melhor correlação encontrada ao considerar idênticas condições de envelhecimento e temperatura foi entre o ensaio de varredura de tempo e o ensaio LAS na análise do dano contínuo viscoelástico considerando baixos níveis de deformação (3%).

Uma das limitações do ensaio LAS encontradas ao longo deste estudo foi a impossibilidade da determinação do mínimo local na curva da taxa de crescimento da fissura para alguns ligantes asfálticos. Várias considerações foram feitas com o intuito de solucionar este inconveniente. Foram apresentadas duas soluções, as quais se mostram promissoras.

Considerações e recomendações para futuras pesquisas

Embora os resultados deste estudo forneçam contribuições importantes tanto ao conhecimento do comportamento à fadiga de ligantes asfálticos modificados quanto aos métodos utilizados na caracterização à fadiga destes materiais, alguns assuntos podem ser indicados para serem considerados em futuras pesquisas:

- estudar os efeitos do *healing*: como foi mencionado na revisão da literatura, os tempos de repouso podem ter influência sobre o comportamento à fadiga dos ligantes asfálticos e este efeito pode ser diferente para cada material;
- realização de ensaios em misturas asfálticas: ensaios de fadiga como os de flexão em viga em misturas asfálticas podem fornecer melhores correlações com os ensaios realizados no ligante asfáltico. Um estudo mais detalhado pode incluir outras variáveis das misturas asfálticas, tais como características dos agregados minerais, curva granulométrica, teor de ligante asfáltico e volume de vazios;
- avaliar os ligantes asfálticos em temperaturas mais baixas (como 15 e 5°C), dado que se constatou nesta pesquisa o efeito significativo da temperatura sobre as características de fadiga;
- repetir os ensaios nas temperaturas de isomódulo;
- realizar pesquisas de campo que validem os resultados obtidos nesta pesquisa.

8. REFERÊNCIAS

A.R.E. (1975) Austin Research Engineers, Inc.. Asphalt Concrete Overlays of Flexible Pavements - Vol. 1 - Development of New Design Criteria - Report FHWA-RD-75-75 - **Federal Highway Administration** - Washington, D.C.

AASHTO (2002). American Association of State Highways and Transportation Officials. **Mechanistic Empirical Pavement Desing Guide**. NCHRP 1-37A.

ABOUTORABI, H. et al. (1998). Crack Growth in Twisted Rubber Disks. Part I: Fracture Energy Calculations. **Rubber Chemistry and Technology,** v. 71, n.1, p. 76-83.

AL-BABBISSI, A.H; LITTE, D.N. (1990). Effect of fracture healing on laboratory-to-field shift factor. **Transportation Research Board** 1286, p. 173-183.

ANDERSON, D.A. et al. (2001). Evaluation of Fatigue Criteria for Asphalt Binders. **Transportation Research Record**, Washington D.C., v. 1766, p. 48-56.

AUSTROADS (2008). Guide to pavement technology: part 2: pavement structural design, by G Jameson, AGPT02/08, Austroads, Sydney, NSW.

AUSTROADS (2009). Asphalt Fatigue Endurance Limit. Austroads Technical Report AP-T131/09.

BABURAMANI, P. (1999). Asphalt Fatigue Life Prediction Models. A Literature Review. Research Report ARR 344, Australia.

BAHIA, H.U. et al. (1999). Non-Linear viscoelastic and Fatigue Properties of Asphalt Binders. **Journal of the Association of Asphalt Technologist.**,68, 1–34.

_____.(2001a). NCHRP Report 459: Characterization of Modified Asphalt Binders in Superpave Mix Design. **Transportation Research Board**, Washington, D.C.

_____. (2001b). Development of Binder Specification Parameters Based On Characterization Of Damage Behavior (With Discussion). **Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists**, v.70, p.442-470.

_____.(2011). **Development of Test Procedures for Characterization of Asphalt Binder Fatigue and Healing**. FHWA Final Report, Washington, D.C., 2011.

BARKSDALE, R.D.; MILLER J.H. (1977). Development of Equipment and Techniques for Evaluating Fatigue and Rutting Characteristics of Asphalt Concrete Mixes. Report SCEGIT-77-147. **School of Civil Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta**.

BODIN, D.H. et al. (2004). Temperature effects in binder fatigue tests – **Eurobitume and Eurasphalt Congress** – Vienna.

BONNETTI, K.S. et al. (2002). Measuring and Defining Fatigue Behavior of Asphalt Binders. **Transportation Research Record.** Washington D.C., v. 1810, n. 02, p. 33-43.

CASTRO, M.; SANCHEZ, J.A. (2006). Fatigue and healing of asphalt mixtures: discriminate analysis of fatigue curves. **Journal of Transportation Engineering**. ASCE v132 (2), p.168-174.

CHRISTENSEN JR., D.W.; ANDERSON, D.A. (1992). Interpretation of dynamic mechanical test data for paving grade asphalt cements. **Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists**, White Bear Lake, v.61, p.67-116.

DEACON, J.A. (1965). **Fatigue of Asphalt Concrete** - University of California - Berkeley - California - PhD. Thesis.

DEACON, J.A. et al. (1997). Influence of Binder Loss Modulus on the Fatigue Performance of Asphalt Concrete Pavements. **Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists**, v.66, p.633-685.

DELGADILLO, R.; BAHIA, H. (2005). Rational fatigue limits for asphalt binders derived from pavement analysis. **Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists**, v.74, p.97–138.

DIJK, V.W.V (1975). Practical Fatigue Characterization of Bituminous Mixes, **Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists**, v. 44, pp. 38-72.

DOMINGOS, M.D.I. (2011). **Caracterização do comportamento fluência-recuperação de ligantes asfálticos modificados virgens e envelhecidos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

EL-BASYOUNY, M.M.; WITCZAK, M.W. (2005a) Verification of the Calibrated Fatigue Cracking Models for the 2002 Design Guide. **Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists**, v.74, p.635-699.

_____. (2005b). Development of the Fatigue Cracking Models for the 2002 Design Guide. Paper presented at the **Annual Meeting of the Transportation Research Board**, Washington, DC.

EXAME (2008). **Anuário Exame Infra-estrutura** 2008-2009, Editora Abril

FERNANDEZ JR, J.L. (1994). **Investigação dos efeitos das solicitações do tráfego sobre o desempenho de pavimentos.** Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

FINN, F.N. et al. (1973). Minimizing Premature Cracking in Asphalt Concrete Pavements - Final Report - NCHRP Project 9-4.

GEIPOT (1980). Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes - *Avaliação da* Regulamentação Econômica do Transporte Rodoviário de Carga - Brasília-DF.

GHUZLAN, K.A.; CARPENTER S.H. (2000). Energy-Derived, Damage-Based Failure Criterion for Fatigue Testing. **Transportation Research Record**, No. 1723, Washington, D.C., p. 141–149.

GOODRICH, J.L. (1988). Asphalt and polymer modified asphalt properties related to the performance of asphalt concrete mixes. **Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists**, v. 57, p. 116-175.

_____ (1991). Asphaltic binder rheology, asphalt concrete rheology, and asphalt concrete mix properties. **Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists**, v.60, p. 80-120.

GROENENDIJK, J. et al. (1997). Linear tracking performance test on full depth asphalt pavement. Transportation Research Record 1570. pp.39-54.

GUO, R. (2007). **Predicting in-service fatigue life of flexible pavements based on accelerated pavement testing**. PhD Dissertation - The University of Texas at Austin.

HAAS, R. et al. (1994). **Modern Pavement Management** - Krieger Publishing Co. - Malamar, Florida.

_____ (2007). Mechanistic-Empirical Pavemet Desing: Evolution and Future Challenges. **Annual conference. Transportation Association of Canada**. Saskatoon. Canada.

HEUKELOM, W. (1966). Observations on Rheology and Fracture of Bitumen and Asphalt Mixes. **Proceedings of the association of asphalt Paving Technologists**, v.36, p. 359-397.

HINTZ, C. et al. (2011). Modification and Validation of Linear Amplitude Sweep Test for Binder Fatigue Specification. **Transportation Research Board**. V.2207, Washington D.C p. 99, 2011.

HINTZ, C. (2012). **Understanding Mechanics Leading to Asphalt Binder Fatigue**. Dissertation. University of Wisconsin-Madison.

HUGO, F.; EPPS A.L. (2004). NCHRP Synthesis Practice 325: Significant Findings from Full-Scale Accelerated Pavement Testing. **Transportation Research Board,** National Research Council, Washington, D.C.

HVEEM, F.N. (1995). Pavement Deflections and Fatigue Failures. Bul. 114. **Highway Research Board.** National Research Council. Washington, D.C. p. 43-87.

JOHNSON C.M. et al. (2007). **Evaluation of Strain-Controlled Asphalt Binder Fatigue Testing in the Dynamic Shear Rheometer**. 4th International SIIV Congress – Palermo (Italy), 12-14.

JOHNSON, C.M. (2010). **Estimating Asphalt Binder Fatigue Resistance Using an Accelerated Test Method**, Dissertation, University of Wisconsin-Madison.

KALLAS, B.F.; PUZINAUSKAS V.P. (1972). Flexural Fatigue Tests on Asphalt Paving Mixtures. Fatigue of Compacted Bituminous Aggregate Mixtures, Special Technical Publications 508, **American Society for Testing and Materials**.

KALLAS, B.F. (1970). Dynamic modulus of asphalt concrete in tension and compression. **Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists**. v.39, p.1-23.

KANG, M.; ADAMS, T.M (2007). Local Calibration for Fatigue Cracking Models Used in the Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide. Proceedings of the 2007 Mid-Continent **Transportation Research Symposium**, Ames, Iowa, Iowa State University.

KEENTOK, M.; XUE S. (1999). Edge fracture in cone-plate and parallel plate flows. **Rheologica Acta 38,** n. 4, p. 321-348.

KIM, Y. et al. (2002). Use of Dynamic Mechanical Analysis (DMA) to evaluate the fatigue and Healing Potential of Asphalt Binders in Sand Asphalt Mixtures. **Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists**, v.71, p. 176-206.

_____ (2003). Fatigue and Healing Characterization of Asphalt Mixtures. **Jounal of Materials in Civil Engineering**, American Society of Civil Egineers. v.15, p. 75-83.

KONG KAM WA, N. et al. (1997) Stiffness and fatigue characteristics of some asphalts wearing course used in South Africa. Proceeding Eighth International Conference of Asphalt Pavements, Washington, Volume II, pp.951-68.

MCLEAN, D.B. (1974). **Permanent Deformation Characteristics of Asphalt Concrete**. PhD. Thesis - University of California Berkeley.

MAJIDZADEH, K. et al. (1971). Application of Fracture Mechanics in the Analysis of Pavement Fatigue. **Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists**. v.40, p. 227-46.

MARTONO, W.; BAHIA. H.U. (2003). Defining Asphalt Binder Fatigue as a Function of Pavement Temperature and Pavement Structure. **Transportation Research Board**. Washington, D.C.

MARTONO, W. et al. (2004). “Comparison of Asphalt Binders’ Fatigue Measured using Parallel Plate Geometry with Torsion Cylinder Geometry”. **41st Petersen Asphalt Research Conference.**

MARTONO, W. (2008). **Fatigue of asphalt binders**: Investigation of edge effect phenomenon and development of surrogate test. PhD Dissertation - University of Wisconsin – Madison.

METCALF, J.B. (2005). NCHRP Active Project 10-66: Predicting In-Service Performance of Flexible Pavements from Accelerated Pavement Testing. **Transportation Research Board**, National Research Council, Washington, D.C.

MILLER, J.S.; BELLINGER, W.Y. (2003). Distress Identification Manual for the Long-Term Pavement Performance Program (Fourth Revised Edition). **Federal Highway Administration** FHWA.

MOAVENZADEH, F. (1971). Damage and Distress in Highway Pavements. **Highway Research Board**. Workshop on Structural Design of Asphalt Pavement Systems - SR 126 - The University of Texas - Austin - p. 114-133

MONISMITH, C.L.; SALAM Y.M. (1973). Distress Characteristics of Asphalt Concrete Mixes. **Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists**, v.42, p. 320-350.

MONISMITH, C.L.; WITCZAC, M.W. (1982). Moderator's Report Session I - **Proc. Fifth Int. Conf. on the Structural Design of Asphalt Pavement** - Vol. II - pp. 2-37 - The University of Michigan - Ann Arbor - Michigan – USA.

NCHRP (2004). Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures, Project 37-1A. Washington DC: **National Cooperative Highway Research Program**, Transportation Research Board, National Research Council.

NIJBOER, L.W.; VAN DER POEL, C. (1953). A Study of Vibration Phenomena in Asphalt Road Constructions. **Assoc Asphalt Paving Technol Proc**. American Association of Pavement Technologists. v. 22, p. 197-231.

PACKARD, R.G. (1984). Thickness design for concrete highway and street pavements, Portland Cement Association, Illinois, USA.

PELL, P. S. (1962). Fatigue characteristics of bitumen and bituminous mixes. **International conference on the structural design of asphalt pavements**, Ann Arbor, Michigan.

PELL, P. S.; BROWN, S.F. (1972). The characteristics of materials for the design of flexible pavement structures. Proceedings, **Third International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements**, London.

PELL, P.S.; COOPER, K.B (1975). The effect of testing and mix variables on the fatigue performance of bituminous materials. **Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists**, v. 44, p. 1-37.

PEREIRA, A.M.; PEREIRA, D.R.M. (1989). Um Estudo sobre Alguns Fatores de Equivalência de Cargas de Eixo Empíricos e Mecanísticos. **Estudo Técnico para a Humberto Santana Engenheiros Consultores.**

PEREZ, F.E. et al. (2005). Desarrollo de un nuevo procedimiento para la evaluación del comportamiento a fatiga de las mezclas bituminosas a partir de su caracterización en un ensayo a tracción. **Premio Internacional a la Innovación en Carreteras**. Universidad Politécnica de Cataluña.

PINTO, S.; PREUSSLER, E.S. (1980). Módulos Resilientes de Concretos Asfálticos. Departamento Nacional de Estradas de Rodagens – Instituto Pesquisas Rodoviárias DNER - IPR, Rio de Janeiro

PORTER, O.J. (1942). Foundations for Flexible Pavements. **Highway Research Board.** v.22.

PORTER, B.P.; KENNEDY T.W. (1975). Comparison of Fatigue Test Methods for Asphaltic Materials. Research Report 183-4. **Center for Highway Research -** The University of Texas at Austin.

PRONK, A.C.; HOPMAN E.P.C. (1990) Energy Dissipation: The Leading Factor of Fatigue. **Highway Research: Sharing the Benefits**. In: Conference of U.S. SHRP, London, Telford, London, p. 225–267.

PRONK, A.C. (1995) Evaluation of the Dissipated Energy Concept for the Interpretation of Fatigue Measurements in the Crack Initiation Phase. **Road and Hydraulic Engineering Division, the Netherlands**.

QUEDEVILLE, A. (1971). Enrobés Bitumineux Fatigue du Film Liant. **Revue Générale dês Routes et dês Aérodromes**. No. 41.

QUEIROZ, C.A.V. (1981). **Performance Prediction Models for Pavement Management in Brazil**. PhD. Dissertation - The University of Texas at Austin.

RAITHBY, K.D.; RAMSHAW, J.T. (1972). Effects of secondary compaction on the fatigue performance of a hot-rolled asphalt. **Transport and Road Research Lab. TRRL-LR 471**, Crowthorne, England.

SALAM, Y.M. (1971). **Characteristics of Deformation and Fracture of Asphalt Concrete**. Ph.D. Dissertation, University of California, Berkeley.

SCHAPERY, R.A. (1975) A theory of crack initiation and growth in viscoelastic media. III-Analysis of continuous growth. **International Journal of Fracture**, v.11, p. 549-562.

SHELL (1978) Pavement Desing Manual – **Asphalt pavements and overlays for road traffic**, Shell International Petroleum Company Ltd., London U.K.

SHENOY, A. (2002) Fatigue testing and evaluation of asphalt binders using the dynamic shear rheometer. **Journal of Testing and Evaluation**, v.30, No.4, p. 303-312.

SMITH, B.J.; HESP, S. (2000). Crack pinning in asphalt mastic and concrete: regular fatigue studies. Transportation Research Record 1728, **Transportation Research Board**, Washington, D. C., p. 72-81.

SOUSA, J.B. (1986). **Dynamic Properties of Pavement Materials**. Ph.D. Thesis - University of California - Berkeley.

SOENEN, H.; ECKMANN, B. (2000). **Fatigue Testing of Bituminous Binders with a Dynamic Shear Rheometer**. Nynas. Eurasphalt & Eurobitume Congres, Barcelona, book 1, p. 827.

SOENEN, H et al. (2004). **Predict Mix Fatigue Test From Binder Fatigue Proprieties, Measured with a DSR**. Nynas. Eurasphalt & Eurobitume Congres, book 1, p. 827.

TAYEBALI A. A. et al. (1993). “Modeling fatigue response of asphalt-aggregate mixtures.” **Proc., Associations of Asphalt Paving Technologists**, Vol. 62, Association of Asphalt Paving Technologists, Lino Lakes, Minn, p. 385–421

TAN, Y. et al. (2007). Fatigue Characteristic of Asphalt. **Symposium on Pavement Mechanics and Materials**, p. 98-107, 2007.

TSAI, B.W.; MONISMITH, C. (2005). Influence of Asphalt Binder Properties on the Fatigue Performance of Asphalt Concrete Pavements. Asphalt Paving Technology: **Association of Asphalt Paving Technologists-Proceedings of the Technical Sessions**, Vol. 74, pp. 733-789.

TSENG, K,H; LYTTON R.L. (1990). Fatigue damage on proprieties of asphaltic concrete pavements. **Transportation Research Record** 1286 pp 51-63

WEN, H.; BAHIA, H. (2009). Characterizing Fatigue of Asphalt Binders with Viscoelastic Continuum Damage Mechanics. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, 2126(-1), p. 55–62. doi:10.3141/2126-07.

YOUTCHEFF, J. et al. (2004). **Understanding the performance of polymer modified**. Proceedings of the 3rd Eurasphalt & Eurobitume Congress (EEC), Vienna, Austria, May 12-14, 2004, p.1–11.

ZUBE, E.; FORSYTH, R. (1966). Flexible Pavement Maintenance Requirements as Determined by Deflection Measurements. **Highway Research Board**. HRR 129.