

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

Pedro Orlando Borges de Almeida Júnior

**RECICLAGEM DE MISTURAS 100%RAP: INVESTIGAÇÃO DE
PARÂMETROS PARA AVALIAÇÃO E DOSAGEM DE AGENTES
REJUVENESCEDORES COM FOCO NA FADIGA**

TESE DE DOUTORADO

**Santa Maria, RS, Brasil
2022**

Pedro Orlando Borges de Almeida Júnior

**RECICLAGEM DE MISTURAS 100%RAP: INVESTIGAÇÃO DE PARÂMETROS
PARA AVALIAÇÃO E DOSAGEM DE AGENTES REJUVENESCEDORES COM
FOCO NA FADIGA**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração em Construção Civil e Preservação Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), como requisito para obtenção do título de **Doutor em Engenharia Civil**.

Orientador: Prof. Dr. Luciano Pivoto Specht
Coorientador: Dr. Gustavo Menegusso Pires

Santa Maria, RS, Brasil
2022

Almeida Júnior, Pedro Orlando Borges de
RECICLAGEM DE MISTURAS 100%RAP: INVESTIGAÇÃO DE
PARÂMETROS PARA AVALIAÇÃO E DOSAGEM DE AGENTES
REJUVENESCEDORES COM FOCO NA FADIGA / Pedro Orlando
Borges de Almeida Júnior.- 2022.
401 p.; 30 cm

Orientador: Luciano Pivoto Specht
Coorientador: Gustavo Menegusso Pires
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil, RS, 2022

1. Reclaimed Asphalt Pavement 2. Agente
Rejuvenecedor 3. Mistura asfáltica 100%RAP 4.
Envelhecimento 5. S-VECD I. Specht, Luciano Pivoto II.
Pires, Gustavo Menegusso III. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

Declaro, PEDRO ORLANDO BORGES DE ALMEIDA JÚNIOR, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Tese) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.

Pedro Orlando Borges de Almeida Júnior

**RECICLAGEM DE MISTURAS 100%RAP: INVESTIGAÇÃO DE PARÂMETROS
PARA AVALIAÇÃO E DOSAGEM DE AGENTES REJUVENESCEDORES COM
FOCO NA FADIGA**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração em Construção Civil e Preservação Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), como requisito parcial para obtenção do título de **Doutor em Engenharia Civil**.

Aprovado em 24 de agosto de 2022

Luciano Pivoto Specht, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Gustavo Menegusso Pires, Dr.
(Coorientador)

Silvia Caro, Dra. (Universidad de los Andes - UNIANDES).
(Banca)

Leni Figueiredo Mathias Leite, Dra. (COPPE/UFRJ)
(Banca)

Deividi da Silva Pereira, Dr. (UFSM)
(Banca)

Lucas Dotto Bueno, Dr. (UFSM)
(Banca)

**Santa Maria, RS, Brasil
2022**

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por mais esta etapa profissional concluída, em meio aos desafios e incertezas de uma pandemia.

A UFSM pela minha trajetória acadêmica de graduação, mestrado, doutorado e profissional em exercer a Engenharia Civil.

Ao meu orientador, Professor Luciano Specht, pela oportunidade de desenvolver a pesquisa, por todo suporte e conhecimento fornecido ao longo do mestrado e doutorado. És uma inspiração profissional. Ao coorientador Gustavo Menegusso por toda contribuição e auxílio no planejamento e desenvolvimento da pesquisa. Também agradeço aos demais professores Deividi Pereira, Magnos Baroni e Tatiana Cervo pela dedicação ao grupo GEPPASV.

À professora Silvia Caro e a professora Leni Leite por aceitarem compor a banca externa, avaliar e contribuir com o trabalho. Estendo o agradecimento a professora Kamilla Vasconcelos e ao professor Magnos Baroni pelas contribuições dadas no projeto de qualificação.

À toda minha família, em especial a minha mãe Ana Almeida e meu pai Pedro Orlando, por serem a base de tudo, pelo cuidado, afeto, amor, incentivo e por sempre estarem ao meu lado. Não há palavras para expressar minha gratidão.

À minha companheira de vida Tamires Daros. Obrigada por sempre estar ao meu lado, me apoiando e incentivando, e somando esforços para construção de nossos sonhos.

Aos amigos Silvio Schuster, Cleber Faccin, Pedro Ilha, Pablo Vestena, Lucas Bueno e Lorenzo Pacheco pela parceria na pesquisa, companhia e suporte ao longo de toda pós-graduação. A convivência diária com os amigos foi um facilitador e incentivo para conclusão do trabalho. Estendo os agradecimentos à Bethania Machado, Bruno Chaves, Évelyn Paniz, Jéssica Souza, Chavelli Brondani, Victoria Nunes, Mauricio Silveira, Fernando Boeira e Kátia Bohn.

Aos meus amigos e colegas de PROINFRA, por todo suporte e auxílio.

À Petrobras/ANP pelo aporte financeiro na compra dos equipamentos utilizados na pesquisa.

Às empresas que forneceram materiais utilizados na pesquisa.

Enfim, agradeço a todos que de alguma forma contribuíram ao longo destes anos. Muito obrigada a todos.

RESUMO

RECICLAGEM DE MISTURAS 100%RAP: INVESTIGAÇÃO DE PARÂMETROS PARA AVALIAÇÃO E DOSAGEM DE AGENTES REJUVENESCEDORES COM FOCO NA FADIGA

A reciclagem de pavimentos asfálticos é uma alternativa da indústria da pavimentação contemporânea como uma resposta ao aumento considerável no preço dos materiais asfálticos e a necessidade em promover a sustentabilidade e a conservação dos recursos naturais. O uso do *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP) no concreto asfáltico tornou-se atrativa por promover ganhos econômicos e ambientais principalmente pela redução do consumo de agregados e ligantes asfálticos virgens. Os teores de incorporação do material RAP em novas misturas são limitados devido às características do ligante presente no RAP: alta rigidez e elasticidade, com baixa propriedade coesiva, resultando em misturas susceptíveis ao trincamento térmico e por fadiga. Para compensar a elevada rigidez, agentes rejuvenescedores (ARs) são utilizados, com a concentração ótima ou a dosagem definida com base em propriedades de penetração, ponto de amolecimento, *Performance Grade* de alta e baixa temperatura. No entanto, esses parâmetros possuem pouca ou nenhuma relação direta com um dos principais mecanismos de falha de misturas recicladas: o dano por fadiga. Diante disso, essa pesquisa teve por objetivo avaliar a potencialidade de agentes rejuvenescedores em recuperar a vida de fadiga e definir parâmetros de dosagem com base neste mecanismo de danificação a partir da análise em ligantes e validações em misturas asfálticas 100% RAP. Foram avaliadas diferentes definições de falha, critérios de ruptura e equações de previsão da vida de fadiga a fim de identificar quais são sensíveis aos efeitos do envelhecimento e do rejuvenescimento em ligantes e misturas asfálticas. Para isso, o estudo explorou duas diferentes fontes de RAP em três capítulos experimentais. No primeiro capítulo, o processo de recuperação dos ligantes RAP no evaporador rotativo foi implementado e calibrado por meio de análises e testes reológicos e de desempenho. Esta seção evidenciou que a aplicação de testes em ligantes foi assertiva para identificar a completa evaporação do solvente sem promover envelhecimento adicional nos materiais. Em contrapartida, o procedimento conduzido pela norma resultou em ligantes com solvente residual, subestimando o nível de rigidez e o nível de envelhecimento. Os ligantes RAPs foram utilizados no segundo capítulo para análise dos efeitos do envelhecimento, juntamente com ligantes envelhecidos em laboratório, e do rejuvenescimento por dois ARs comerciais (R e S). De modo geral, os efeitos do envelhecimento são de maior intensidade em propriedades medidas em altas temperaturas do que nas baixas e intermediárias temperaturas, resultando em diferentes dosagens dos ARs de acordo com o domínio de análise do critério escolhido. Os teores de ARs definidos com base em 12 parâmetros de fadiga extraídos do teste LAS resultaram em concentrações similares, com baixo desvio padrão e coeficiente de variação quando determinados pelas definições de falha de queda de $50\%|G^*|$, pico do C.N e máximo $C^2.N.(1-C)$. A dosagem dos ARs por parâmetros de fadiga resultou em teores inferiores quando adotado parâmetros linear viscoelástico (LVE) e de dano por deformação permanente. No último capítulo, dez misturas asfálticas 100%RAP com diferentes concentrações de agente R, com combinação entre AR e HiMA, e duas misturas de referência foram investigadas quanto ao efeito do envelhecimento e do rejuvenescimento em propriedades LVE e de desempenho. A ação do AR e AR + HiMA resultaram em misturas mais rígidas e menos flexíveis em altas temperaturas, e menos rígidas e mais flexíveis em temperaturas intermediárias e baixas quando comparadas às misturas com materiais virgens. Com relação à fadiga, os efeitos do envelhecimento e rejuvenescimento foram identificados nas curvas C vs S, nos critérios de ruptura do G^R e D^R , em soluções analíticas de simulações de vida de fadiga e de desempenho no FlexPAVE™. A partir da correlação entre os resultados do LAS e as simulações no FlexPAVE™, identificou-se que a utilização das definições de falha do pico do C.N e máximo $C^2.N.(1-C)$, com a previsão da vida de fadiga pela equação de Wang et al. (2015), resultou em correlações acima de 0,84 independente do nível de deformação (2,5% e 5%) e intervalo do Fator de Fadiga de Ligantes - FFL (1,0% a 2,5%, 2,5% a 5,0% e 1,0% a 5,0%). Assim, essas formulações de cálculo podem ser propostas para selecionar e dosar o agente rejuvenescedor com base no dano por fadiga.

Palavras-chave: *Reclaimed Asphalt Pavement*; Agente Rejuvenescedor; Mistura asfáltica 100%RAP; Envelhecimento; S-VECD; FlexPAVE™.

ABSTRACT

RECYCLING OF 100%RAP MIXTURES: INVESTIGATION OF PARAMETERS FOR EVALUATION AND DOSAGE OF REJUVENATING AGENTS BASED ON FATIGUE

The recycling of asphalt pavements is an alternative for the contemporary paving industry as a response to the considerable increase in the price of asphalt materials and the need to promote sustainability and conservation of natural resources. The use of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) in asphalt concrete has become attractive because it promotes economic and environmental gains, mainly by reducing the consumption of virgin asphalt aggregates and binders. The levels of incorporation of the RAP material in new mixtures are limited due to the characteristics of the binder present in the RAP: high stiffness and elasticity with low cohesive property, resulting in mixtures susceptible to thermal and fatigue cracking. To compensate for the high stiffness, rejuvenating agents (ARs) are used, with the optimal concentration or the dosage generally defined based on penetration, softening point or high and low temperature Performance Grade properties. However, these parameters have little or no direct relationship with one of the main failure mechanisms of recycled asphalt mixtures: fatigue damage. Therefore, this research aimed to evaluate the potential of rejuvenating agents to recover fatigue life and define dosage parameters based on this damage mechanism, from the analysis of binders and validations in 100%RAP asphalt mixtures. Different failure definitions, failure criteria and fatigue life prediction equations were evaluated in order to identify which are sensitive to the effects of ageing and rejuvenation in binders and asphalt mixtures. For this, the study is divided into three experimental chapters, exploring two sources of RAP. In the first experimental chapter, the recovery process of RAP binders in the rotary evaporator was implemented and calibrated through rheological and performance analysis and tests. This section showed that the application of tests on binders was assertive to identify the complete evaporation of the solvent without promoting additional ageing in the materials. In contrast, the procedure conducted by the ASTM standard resulted in binders with residual solvent, underestimating the level of stiffness and the level of ageing. RAP binders were used in the second chapter to analyze the effects of ageing, together with laboratory-aged binders and rejuvenation by two commercial ARs (R and S). In general, the effects of ageing are more intense in properties measured at high temperatures than at low and intermediate temperatures, resulting in different dosages of AR according to the domain of analysis of the chosen criterion. The AR contents defined based on 12 fatigue parameters extracted from the LAS test resulted in similar concentrations, with low values of standard deviation and coefficient of variation when determined by the definitions of failure of drop in $50\%|G^*|$, peak C.N and maximum of the $C^2.N.(1-C)$. The dosage of ARs by fatigue parameters resulted in lower contents when adopting linear viscoelastic (LVE) and damage by permanent deformation parameters. In the last chapter, ten 100%RAP asphalt mixtures with different concentrations of AR R and combination of AR R and HiMA, and two reference mixtures were investigated for the effect of ageing and rejuvenation on LVE and performance properties. The action of AR R and AR R + HiMA resulted in more stiff and less flexible mixtures at high temperatures, and less stiff and more flexible at intermediate and low temperatures when compared to mixtures with virgin materials. Regarding fatigue, the effects of ageing and rejuvenation were identified in the C vs S, in the G^R and D^R rupture criteria, in analytical solutions of fatigue life simulations and in FlexPAVE™ performance. From the correlations between the results of the LAS and the simulations in FlexPAVE™, it was identified that the use of failure definitions of peak C.N and maximum $C^2.N.(1-C)$, with the prediction of fatigue life by the equation of Wang et al. (2015), resulted in correlations above 0.84 regardless of strain level (2.5% and 5%) and Fatigue Factor Binder - FFB range (1.0% to 2.5%, 2.5 % to 5.0% and 1.0% to 5.0%). Thus, these calculation formulations can be proposed to select and dose the rejuvenating agent based on fatigue damage.

Keywords: Reclaimed Asphalt Pavement; Rejuvenating Agent; 100% Recycled Asphalt Mixture; Ageing; S-VECD; FlexPAVE™.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Programa experimental dos Capítulos 3, 4 e 5	24
Figura 2 - Fracionamento SARA do ligante	27
Figura 3 - Modelo de estrutura coloidal segundo Yen	28
Figura 4 - Esquema do tipo sol (a) e gel (b) dos ligantes	28
Figura 5 - Fracionamento SARA de ligante virgem, ligante RAP e ligante RAP com diferentes agentes rejuvenescedores	32
Figura 6 - Curvas mestras de módulo complexo e ângulo de fase em diferentes condições de envelhecimento	33
Figura 7 - Resultados do ligante 70/100 em diferentes tempos de envelhecimento expressos em: (a) curvas mestras de módulo e ângulo de fase e (b) diagrama black.....	34
Figura 8 - Esquema do módulo de <i>crossover</i>	34
Figura 9 - Caracterização viscoelástica de ligante virgem, extraído de RAP e ligante RAP com três agentes rejuvenescedores	35
Figura 10 - Curvas mestras de módulo complexo (a) e ângulo de fase (b) para ligantes virgens, envelhecidos e rejuvenescidos	36
Figura 11 - Curvas mestras de módulo e ângulo de fase para os ligantes PG 64-22S e 70-22S	36
Figura 12 - Log $ G^* $ e ângulo de fase versus temperatura para o ligante SMB com diferentes teores de agente rejuvenescedor.....	37
Figura 13 - Efeito do envelhecimento e rejuvenescimento no módulo complexo e ângulo de fase do ligante SMB	38
Figura 14 - Avaliação do parâmetro G-R de três ligantes com o envelhecimento.....	38
Figura 15 - Parâmetro G-R de ligantes virgem, envelhecido e rejuvenescido	39
Figura 16 - Mudanças no R-value vs frequência crossover com o envelhecimento	39
Figura 17 - Efeito do rejuvenescimento de ligante RAP por diferentes materiais no gráfico frequência crossover versus R-Value.....	40
Figura 18 - Variação do verdadeiro PGH com a espessura do pavimento	42
Figura 19 - Variação do Jnr a 3,2 kPa com a espessura do pavimento	42
Figura 20 - Valores de compliância a 3, 10 e 50 Pa para o ligante virgem, envelhecido e rejuvenescido	43
Figura 21 - Comparação dos resultados do teste de fadiga sob deformação controlada para amostras de ligante Costa Rica 2 envelhecidos em múltiplos ciclos de PAV e no ambiente por 6 a 24 meses.	44
Figura 22 - Resultados de fadiga dos ligantes em diferentes condições de envelhecimento: modo tensão controlada (esquerda) e deformação controlada (direita)	45
Figura 23 - Nf do ligante AC 10 com diferentes teores de RAP e níveis de deformações	46
Figura 24 - Resultado do teste LAS.....	46
Figura 25 - Valores de Nf para ligantes com bio-óleo	47
Figura 26 - Número de ciclo para falha baseado em diferentes definições de falha: (a) pico de CxN , (b) pico de $TauxN$, (c) pico de $C^2xNx(1-C)$, e identificação dos pontos de falha na curva de tensão cisalhante versus número de ciclos	48
Figura 27 - Comparação da vida de fadiga de diferentes misturas de ligantes	49
Figura 28 - Correlação entre número de ciclos correspondente ao DPSE máx (a) e G^R (b) com Nf50	49
Figura 29 - Exemplo de um gráfico de mistura	51
Figura 30 - Gráfico de mistura entre agente rejuvenescedor e ligante RAP com a (a) penetração e (b) ponto de amolecimento	53
Figura 31 - Gráfico de mistura do PGH e PGL entre ligante RAP e agente rejuvenescedor ...	53

Figura 32 – Proposta para projeto de RAM	54
Figura 33 - Framework para projeto de mistura baseado em desempenho.....	55
Figura 34 - Cenários de mistura nula (a), mistura parcial (b) e mistura total (c).....	57
Figura 35 - Processo de difusão do agente rejuvenescedor no ligante envelhecido	63
Figura 36 - Modelo HRT da AMMANN que permite a utilização de 100% RAP.....	68
Figura 37 - Comparação do FFL e <i>af</i> com FFM a 19°C	73
Figura 38 - C versus S para o ligante PG 64-22 oriunda do TS (esquerda) e LAS (direita)....	74
Figura 39 - GR versus Nf obtidos no teste LAS e TS para um ligante PG 64-22	75
Figura 40 - Comparação entre previsão de vida de fadiga entre mistura e ligante de (a) Safei et al. (2015) e (b) Wang et al. (2015)	75
Figura 41 - Correlação entre os parâmetros de fadiga de ligantes e misturas.....	77
Figura 42 – Plano de teste para avaliação do sistema de recuperação	84
Figura 43 –FTIR dos ligantes Neat (a) and SBS (b) do primeiro estágio.....	90
Figura 44 –FTIR dos ligantes Neat RAP (a) and SBS RAP (b) do segundo estágio.....	90
Figura 45 - $ G^* /\text{sen } \delta$ em diferentes temperaturas para os ligantes do primeiro estágio (a) e segundo estágio (b).....	92
Figura 46 – PGH e PGH contínuo para os ligantes do primeiro estágio (a) e segundo estágio (b)	93
Figura 47 - Curvas mestras do módulo de cisalhamento dinâmico e ângulo de fase dos ligantes do primeiro estágio (a e b) e dos ligantes do segundo estágio (c e d).....	94
Figura 48 - Gráficos de igualdade do módulo de cisalhamento dinâmico (aeb) e ângulo de fase (c e d) dos ligantes do primeiro estágio.....	95
Figura 49 - Gráficos de igualdade do módulo de cisalhamento dinâmico (aeb) e ângulo de fase (c e d) dos ligantes do segundo estágio.	96
Figura 50 - Ciclos de fluência e recuperação dos ligantes do primeiro estágio (a) e do segundo estágio (b) em 3,2 kPa.	98
Figura 51 - Jnr dos ligantes de primeiro estágio (a) e segundo estágio (b) em 0,1 kPa e 3,2 kPa.	98
Figura 52 – R% dos ligantes SBS	100
Figura 53 - Ciclo de fala dos ligantes de acordo com $C^2.N.(1-C)$	101
Figura 54 - C vs S dos ligantes do primeiro (a e b) e segundo (c e d) estágios.	103
Figura 55 – Procedimento genérico proposto para calibração da recuperação no evaporador rotativo a partir da análise reológica e de desempenho.	105
Figura 56 - Programa experimental de laboratório proposto para os ligantes asfálticos	110
Figura 57 – Origem das fontes de RAP	111
Figura 58 - Fresagem e estado visual do revestimento que deu origem ao Neat RAP	112
Figura 59 - <i>Dynamic Shear Rheometer</i>	117
Figura 60 – Representação analógica do modelo 2S2P1D (a) e representação gráfica dos parâmetros do modelo no espaço Cole Cole (b).....	119
Figura 61 - Esquema de fluência e recuperação com 20 ciclos a 0,1 kPa (a) e 10 ciclos a 3,2 kPa (b)	124
Figura 62 – Perfis de carregamento no teste LAS para utilização do S-VECD.....	126
Figura 63 - Definições de falhas analisadas: (a) queda de 50% $ G^* $, (b) queda de 35% C, (c) pico de C.N, (d) pico de $\tau.N$, (e) pico de τ , (f) pico do δ , (g) pico do <i>WSR</i> e (h) pico do $C^2.N.(1-C)$	129
Figura 64 - Resultados da medida de penetração (dmm) com o grau de envelhecimento dos ligantes asfálticos.....	133
Figura 65 – Valores de aT de -5 a 75°C para os ligantes envelhecidos	135
Figura 66 – Espaço cole-cole (a), diagrama black (b), curvar mestras de módulo dinâmico (c) e ângulo de fase (d) dos ligantes sem modificação	137

Figura 67 – Espaço cole-cole (a), diagrama black (b), curvar mestras de módulo dinâmico (c) e ângulo de fase (d) dos ligantes com modificação	138
Figura 68 – Aumento percentual de $ G^* $ (a e b) e redução percentual do δ (c) dos ligantes envelhecidos em relação ao ligante virgem sem modificação	140
Figura 69 - Aumento percentual de $ G^* $ (a e b) e redução percentual do δ (c) dos ligantes envelhecidos em relação ao ligante virgem com modificação.....	140
Figura 70 – Cálculo do RAI entre os ligantes SBS RAP e SBS considerando o espectro total de frequência reduzida.	141
Figura 71 - Determinação do RAI de acordo com o tipo de dano e frequências reduzidas para os ligantes sem modificação (a) e com modificação (b).....	142
Figura 72 – RAI dos ligantes com o processo de envelhecimento.....	143
Figura 73 – $ G^* $ vs δ no diagrama black obtido em uma $T_{ref}=15^\circ\text{C}$ e frequência de 0,005 rad/s para todas condições de envelhecimento.	144
Figura 74 - Parâmetro G-R dos ligantes testados com diferentes níveis de envelhecimento .	144
Figura 75 – Identificação dos pontos de cruzamento dos ligantes sem modificação no espaço cole-cole (a), diagrama black (b), curvas mestras de módulo dinâmico (c) e ângulo de fase (d).....	145
Figura 76 – Identificação dos pontos de cruzamento dos ligantes com modificação no espaço cole-cole (a), diagrama black (b), curvas mestras de módulo dinâmico (c) e ângulo de fase (d).....	146
Figura 77 - Temperatura de cruzamento dos ligantes com o envelhecimento	147
Figura 78 – G-R vs temperatura de crossover dos ligantes investigados	147
Figura 79 - Rheological index dos ligantes com o envelhecimento	148
Figura 80 - R-value vs frequência de cruzamento com o envelhecimento.....	149
Figura 81 - $R/\omega c$ vs frequência de cruzamento dos ligantes.....	150
Figura 82 – PGH dos ligantes com o envelhecimento considerando a condição original (a) e original/RTFOT (b).....	151
Figura 83 – PGH_{cont} vs horas de PAV considerando a condição original (a) e original/RTFOT (b).....	152
Figura 84 - Comparação de $ G^* .sen(\delta)$ em 10 rad/s para diferentes temperaturas e níveis de envelhecimento dos ligantes sem modificação (a) e com modificação (b).....	153
Figura 85 – Temperatura crítica intermediária dos ligantes com o envelhecimento.....	154
Figura 86 - Jnr do ligante Neat (sem modificação) em 0,1 e 3,2 kPa sob diferentes condições de envelhecimento a 58°C (a), 64°C (b), 70°C (c), 76°C (d), 82°C (e) e 88°C (f)	155
Figura 87 - Jnr do ligante SBS (com modificação) em 0,1 e 3,2 kPa sob diferentes condições de envelhecimento a 58°C (a), 64°C (b), 70°C (c), 76°C (d), 82°C (e) e 88°C (f)	156
Figura 88 - R (%) em 1,0 kPa (a) e 3,2 kPa dos ligantes em diferentes condições de envelhecimento e temperatura	159
Figura 89 - Valores de $ G^* $ (a), α (b) e m (c) dos ligantes em diferentes níveis de envelhecimento	161
Figura 90 - Definição vs deformação de falha para o ligante sem modificação em diferentes condições de envelhecimento para $CSR=300$: (a) queda de 50% $ G^* $, (b) queda de 35% C, (c) pico de C.N, (d) pico de $\tau.N$, (e) pico de τ , (f) pico do δ , (g) pico do WSR e (h) pico do $C^2.N.(1-C)$	163
Figura 91 - Definição vs deformação de falha para o ligante com modificação em diferentes condições de envelhecimento $CSR=300$: (a) queda de 50% $ G^* $, (b) queda de 35% C, (c) pico de C.N, (d) pico de $\tau.N$, (e) pico de τ , (f) pico do δ , (g) pico do WSR e (h) pico do $C^2.N.(1-C)$	164
Figura 92 - Análise de diferentes definições de falha de ligantes sem modificação em diferentes condições de envelhecimento e CSRs: (a) queda de 50% $ G^* _0$, (b) queda	

	de 35%C, (c) pico de C.N, (d) pico de τ .N, (e) pico de τ , (f) pico do δ , (g) pico do <i>WSR</i> e (h) pico do $C^2.N.(1-C)$	167
Figura 93 - Análise de diferentes definições de falha de ligantes com modificação em diferentes condições de envelhecimento e CSRs (a) queda de 50% G* , (b) queda de 35%C, (c) pico de C.N, (d) pico de τ .N, (e) pico de τ , (f) pico do δ , (g) pico do <i>WSR</i> e (h) pico do $C^2.N.(1-C)$		168
Figura 94 - Nf em diferentes definições de falhas agrupadas sob mesmo nível de envelhecimento em CSR de 0,001.....		169
Figura 95 - Análise de diferentes definições de falha de ligantes sem modificação em diferentes condições de envelhecimento, com inclusão da variável UV: (a) queda de 50% G*), (b) queda de 35% C, (c) pico de C.N, (d) pico de τ .N, (e) pico de τ , (f) pico do δ , (g) pico do <i>WSR</i> e (h) pico do $C^2.N.(1-C)$		171
Figura 96 - Análise de diferentes definições de falha de ligantes com modificação em diferentes condições de envelhecimento, com inclusão da variável UV: (a) queda de 50% G*), (b) queda de 35% C, (c) pico de C.N, (d) pico de τ .N, (e) pico de τ , (f) pico do δ , (g) pico do <i>WSR</i> e (h) pico do $C^2.N.(1-C)$		172
Figura 97 – Curvas C vs S em diferentes definições de falha e condições de envelhecimento: (a, b) queda de 50%G*, (c, d) queda de 35%C, (e, f) pico do C.N, (g, h) pico W^R_s e (i, j) pico do δ e pico do $C^2.N.(1-C)$		174
Figura 98 - Evoltório de ruptura G^R calculado a partir de diferentes definições de falha e níveis de envelhecimento para o ligante sem modificação: (a) Neat, (b) Neat RTFOT, (c) Neat 20PAV, (d) Neat 40PAV, (e) Neat 80PAV e (f) Neat RAP		176
Figura 99 - Evoltório de ruptura G^R calculado a partir de diferentes definições de falha e níveis de envelhecimento para o ligante com modificação: (a) SBS, (b) SBS RTFOT, (c) SBS 20PAV, (d) SBS 40PAV, (e) SBS 80PAV e (f) SBS RAP		177
Figura 100 - Gráfico de mistura entre log (pen) vs concentração dos ARs S e R nos ligantes Neat RAP (a, b) e SBS RAP (c, d)		181
Figura 101 - Teores ótimos dos ARs com base nos limites superior (70) e inferior (50) de penetração para os ligantes Neat RAP (a) e SBS RAP (b).....		181
Figura 102 – Correlação entre log (Pen) vs G* (a) e log (Pen) vs δ (b) dos ligantes RAPs com diferentes concentrações de ARs.....		182
Figura 103 – Valores de at para diferentes tipos e concentrações de agentes rejuvenescedores		183
Figura 104 – Curvas mestras de G* e δ para o ligante Neat RAP com diferentes concentrações de AR S (a e b) e AR R (d e d)		186
Figura 105 – Espaço cole cole e diagrama black para o ligante Neat RAP com diferentes concentrações de AR S (a e b) e AR R (d e d)		186
Figura 106 – Curvas mestras de G* e δ para o ligante SBS RAP com diferentes concentrações de AR S (a e b) e AR R (d e d)		187
Figura 107 – Espaço cole cole e diagrama black para o ligante SBS RAP com diferentes concentrações de AR S (a e b) e AR R (d e d)		187
Figura 108 – G* e δ experimental em diferentes temperaturas e frequência 11,6 Hz para o ligante Neat RAP com diferentes concentrações de AR S (a e b) e AR R (d e d)		188
Figura 109 – G* e δ experimental em diferentes temperaturas e frequência 11,6 Hz para o ligante SBS RAP com diferentes concentrações de AR S (a e b) e AR R (d e d)		189
Figura 110 – Gráfico de mistura entre RAI em três domínio de frequência vs ligante Neat RAP com diferentes concentrações de AR S (a, c, e) e AR R (b, d, f)		190
Figura 111 – Teor ótimo do AR S e R para o ligante Neat RAP de acordo com o parâmetro RAI em três domínios de frequência		191

Figura 112 – Gráfico de mistura entre RAI em três domínio de frequência vs ligante SBS RAP com diferentes concentrações de AR S (a, c, e) e AR R (b, d, f).....	191
Figura 113 – Teor ótimo do AR S e R para o ligante SBS RAP de acordo com o parâmetro RAI em três domínios de frequência.....	192
Figura 114 – Gráfico de mistura entre coeficiente τ do modelo 2S2P1D vs ligante Neat RAP (a, b) e SBS RAP (c, d) com diferentes tipos e concentrações de AR S e R	193
Figura 115 - Teor ótimo do AR S e R para o ligante Neat RAP e SBS RAP de acordo com o coeficiente τ do modelo 2S2P1D	193
Figura 116 – $ G^* $ e δ do ligante Neat RAP em 15°C e 0,005 rad/s com diferentes concentrações de AR S e R no diagrama black	194
Figura 117 – Gráfico de mistura entre G-R e diferentes concentrações de AR S (a) e R (b) no ligante Neat RAP	194
Figura 118 – Teor ótimo do AR S e R para o ligante Neat RAP de acordo com o parâmetro Glover Rowe	195
Figura 119 – $ G^* $ e δ do ligante SBS RAP em 15°C e 0,005 rad/s com diferentes concentrações de AR S e R no diagrama black	195
Figura 120 – Gráfico de mistura entre G-R e diferentes concentrações de AR S (a) e R (b) no ligante SBS RAP.....	195
Figura 121 – Teor ótimo do AR S e R para o ligante SBS RAP de acordo com o parâmetro Glover Rowe	196
Figura 122 – Identificação da frequência de cruzamento na curva mestra de $ G^* $ (a) e δ (b), espaço cole cole (c) e diagrama black (d) para o ligante Neat RAP + R.....	196
Figura 123 – Gráfico de mistura entre ω_c e diferentes concentrações de AR S e R para os ligantes Neat RAP (a, b) e SBS RAP (c, d)	197
Figura 124 – Teor ótimo do AR S e R para os ligantes Neat RAP e SBS RAP de acordo com o parâmetro ω_c	197
Figura 125 – Gráfico de mistura entre $ G_c^* $ e diferentes concentrações de AR S e R para os ligantes Neat RAP (a) e SBS RAP (b)	198
Figura 126 – Gráfico de mistura entre $T_{\delta=45^\circ}$ vs ligante Neat RAP (a, b) e SBS RAP (c, d) com diferentes tipos e concentrações de AR S e R.....	199
Figura 127 – Teor ótimo do AR S e R para os ligantes Neat RAP e SBS RAP de acordo com o parâmetro $T_{\delta=45^\circ}$	199
Figura 128 – G-R vs $T_{\delta=45^\circ}$ dos ligantes Neat RAP (a) e SBS RAP (b) com diferentes concentrações de AR S e R.....	200
Figura 129 - Teor ótimo do AR S e R para os ligantes Neat RAP (a) e SBS RAP (b) determinado por diferentes índices extraídos da caracterização LVE	202
Figura 130 – Gráfico de mistura entre PGH cont. vs diferentes concentrações de AR S e R para os ligantes Neat RAP considerando a condição original (a, b) e entre original e RTFOT (c, d)	203
Figura 131 – Gráfico de mistura entre PGH cont. vs diferentes concentrações de AR S e R para os ligantes SBS RAP considerando a condição original (a, b) e entre original e RTFOT (c, d)	203
Figura 132 – Teor ótimo do AR S e R para os ligantes Neat RAP (a) e SBS RAP (b) de acordo com o parâmetro PGH cont. considerando condição original e entre original e RTFOT.	204
Figura 133 – Parâmetro $\log(G^* \cdot \text{sen } \delta)$ de 15°C a 35°C e 10 rad/s dos ligantes Neat RAP (a, b) e SBS RAP (c, d) com diferentes concentrações dos agentes S e R.....	206
Figura 134 – $T_{\text{crit. int.}}$ para os ligantes os ligantes Neat RAP e SBS RAP com diferentes concentrações de AR S e R.....	207

Figura 135 – Gráfico de mistura entre $T_{crit. int.}$ vs diferentes concentrações de AR S e R para os ligantes Neat RAP (a, b) e SBS RAP (c, d).....	207
Figura 136 – Teor ótimo do AR S e R para os ligantes Neat RAP e SBS RAP de acordo com o parâmetro $T_{crit. int.}$	208
Figura 137 – Jnr 3,2 kPa em 64°C para os ligantes os ligantes Neat RAP e SBS RAP com diferentes concentrações de AR S e R.....	209
Figura 138 – Gráfico de mistura entre Jnr 3,2 kPa à 64°C. vs diferentes concentrações de AR S e R para os ligantes Neat RAP (a) e SBS RAP (b)	209
Figura 139 – Teor ótimo do AR S e R para os ligantes Neat RAP (a) e SBS RAP (b) de acordo com o Jnr 3,2 kPa à 64°C alvo dos ligantes Neat e SBS	210
Figura 140 – Gráfico de mistura entre dados de caracterização LVE obtidos no teste LAS vs diferentes concentrações de AR S e R com os ligantes Neat RAP (a, b, c) e SBS RAP (a, b, c)	212
Figura 141 – Teor ótimo do AR S e R para os ligantes Neat RAP (a) e SBS RAP (b) com base nos dados de caracterização LVE do teste LAS	213
Figura 142 – Análise das definições de falha de (a) queda de 50% $ G^* $, (b) queda de 35% C, (c) pico de C.N para o ligante Neat RAP com diferentes concentrações de AR S e R e CSRs	215
Figura 143 – Análise das definições de falha de (a) pico do W_{Sr} , (b) pico do δ , e (c) pico do $C^2.N.(1-C)$ para o ligante Neat RAP com diferentes concentrações de AR S e R e CSRs.....	216
Figura 144 – Análise das definições de falha de (a) queda de 50% $ G^* $, (b) queda de 35% C, (c) pico de C.N para o ligante SBS RAP com diferentes concentrações de AR S e R e CSRs	217
Figura 145 – Análise das definições de falha de (a) pico do W_{Sr} , (b) pico do δ , e (c) pico do $C^2.N.(1-C)$ para o ligante SBS RAP com diferentes concentrações de AR S e R e CSRs.....	218
Figura 146 – Gráfico de mistura entre definições de falha vs diferentes concentrações de AR S e R com o ligante Neat RAP e CSR 300	219
Figura 147 – Gráfico de mistura entre definições de falha vs diferentes concentrações de AR S e R com o ligante SBS RAP e CSR 300.....	220
Figura 148 – Teor ótimo do AR S (a) e R (b) para os ligantes Neat RAP com base em diferentes definições de falhas e CSRs.....	221
Figura 149 – Teor ótimo do AR S (a) e R (b) para os ligantes SBS RAP com base em diferentes definições de falhas e CSRs.....	221
Figura 150 – C vs S determinados por diferentes definições de falhas para os ligantes Neat RAP com diferentes concentrações do agente R.....	224
Figura 151 – C vs S determinados por diferentes definições de falhas para os ligantes SBS RAP com diferentes concentrações do agente R.....	225
Figura 152 – Teor ótimo do AR S e R para os ligantes Neat RAP (a) e SBS RAP (b) com base no S_f , critérios de rupturas e vida de fadiga determinados com base na queda de 50% $ G^* $	228
Figura 153 – Teor ótimo do AR S e R para os ligantes Neat RAP (a) e SBS RAP (b) com base no S_f , critérios de rupturas e vida de fadiga determinados com base na queda de 35% C.....	228
Figura 154 – Teor ótimo do AR S e R para os ligantes Neat RAP (a) e SBS RAP (b) com base no S_f , critérios de rupturas e vida de fadiga determinados com base na pico de C.N	229

Figura 155 – Teor ótimo do AR S e R para os ligantes Neat RAP (a) e SBS RAP (b) com base no Sf, critérios de rupturas e vida de fadiga determinados com base na pico de WSR	229
Figura 156 – Teor ótimo do AR S e R para os ligantes Neat RAP (a) e SBS RAP (b) com base no Sf, critérios de rupturas e vida de fadiga determinados com base na pico do δ 230	
Figura 157 – Teor ótimo do AR S e R para os ligantes Neat RAP (a) e SBS RAP (b) com base no Sf, critérios de rupturas e vida de fadiga determinados com base na pico do $C^2.N.(1-C)$	230
Figura 158 – Teor ótimo do AR S e R para os ligantes Neat RAP (a) e SBS RAP (b) com base no Sf, critérios de rupturas e vida de fadiga determinados com base na pico do δ 234	
Figura 159 – Teor ótimo do AR S e R para os ligantes Neat RAP (a) e SBS RAP (b) com base no Sf, critérios de rupturas e vida de fadiga determinados com base na pico do δ 235	
Figura 160 - Programa experimental para desenvolvimento e avaliação das misturas	241
Figura 161 - Composição granulométrica black e white do Neat RAP e SBS RAP	242
Figura 162 - Protocolo para determinação do DoA	246
Figura 163 - Definição da fratura do trabalho	247
Figura 164 – Amostras compactadas após condicionamento em temperaturas de 70 a 190°C para determinação da máxima ativação das duas fontes de RAP	257
Figura 165 – Volume de vazios de amostras 100% RAP densificadas no compactador Marshall em diferentes temperaturas de condicionamento	258
Figura 166 – ITS de amostras 100% RAP densificadas no compactador Marshall em diferentes temperaturas de condicionamento	259
Figura 167 – Parâmetros energeticos de Wf, pico (a) e Wf, total (b) determinados a partir do teste ITS em diferentes condições de temperatura	259
Figura 168 – DoA (%) do Neat (a) e SBS (b) RAP determinado por diferentes índices e temperaturas de condicionamento	260
Figura 169 – Correlação entre os resultados de DoA vs ITS (a), de DoA vs Vv (b) e de ITS vs Vv (c) para as misturas em diferentes temperaturas	261
Figura 170 – Amostra 100% RAP sem AR (a), com 8% (b), 12% (c) e 16% (d) de AR	263
Figura 171 – Amostra 100% RAP pré (a) e pós (b) mistura com o AR	263
Figura 172 – Amostras para testes mecânicos com diferentes concentrações de AR	264
Figura 173 – Coeficientes at para Tref = 21°C das misturas Neat RAP (a) e SBS RAP (b) ..	266
Figura 174 – Espaço cole-cole (a), diagrama black (b), curvas mestras de módulo dinâmico (c - d) e ângulo de fase (e) para as misturas Neat RAP com diferentes concentrações do AR R. Tref = 21°C	267
Figura 175 – Espaço cole-cole (a), diagrama black (b), curvas mestras de módulo dinâmico (c - d) e ângulo de fase (e) para as misturas SBS RAP com diferentes concentrações do agente rejuvenescedor R. Tref = 21°C	268
Figura 176 – Comparativo de E* e Φ em 10 Hz de -10 a 54°C para as misturas Neat (a, b) e SBS (c, d) RAP com as demais misturas recicladas e de referência	271
Figura 177 – Flow Number em número de ciclos para as misturas Neat (a) e SBS (b) RAP com diferentes concentrações do agente rejuvenescedor R	273
Figura 178 – Ep vs n° de ciclos para as misturas Neat (a) e SBS (b) RAP com diferentes concentrações do agente rejuvenescedor R no teste de FN	274
Figura 179 – Correlação entre E* (a) e Φ (b) (@54°C e 10 Hz) vs Ep (7200 ciclos)	274
Figura 180 – Corpo de prova rompido após teste de fadiga à tração-compressão	275
Figura 181 – Influência do AR em E* (a) e correlação entre E* e G* à 19°C e 10 Hz	276
Figura 182 – Curvas características de dano para as misturas Neat (a) e SBS (b)	278
Figura 183 – Envoltórios de ruptura G^R vs Nf e Cum (1-C) vs Nf para as misturas Neat (a) e SBS (b)	280

Figura 184 – D^R (a), Srep (b) e Sapp para as misturas Neat e SBS RAP com AR.....	281
Figura 185 – Curvas de Wohller simuladas pelo S-VECD e G^R vs Nf para as misturas Neat (a) e SBS (b) RAP com diferentes concentração de AR R.....	284
Figura 186 – FMM (100 e 200 μ m) com base nas curvas de Wohller simuladas pelo S-VECD e G^R vs Nf.....	284
Figura 187 – Curvas de Wohller simuladas pelo S-VECD e Cum (1-C) para as misturas Neat (a) e SBS (b).....	285
Figura 188 – FMM (100 e 200 μ m) com base nas curvas de Wohller simuladas pelo S-VECD e Cum (1-C).....	285
Figura 189 – Dano médio acumulado por fadiga vs N para as misturas Neat (a) e SBS (b) determinados com base no G^R	288
Figura 190 – Dano médio acumulado por fadiga vs N para as misturas Neat (a) e SBS (b) determinados com base no D^R	289
Figura 191 – Correlação entre dano simulado N/Nf aos 300 meses vs FFM determinados pelo G^R (a) e pelo D^R (b).....	291
Figura 192 – Correlação entre N/Nf (300 meses) das misturas asfálticas e ciclo de falha no LAS 300, 600 e 1200 para as diferentes definições de falha.....	294
Figura 193 – Correlação entre N/Nf (300 meses) das misturas asfálticas e Nf em 1,0% dos ligantes.....	296
Figura 194 – Correlação entre N/Nf (300 meses) das misturas asfálticas e Nf em 2,5% dos ligantes.....	297
Figura 195 – Correlação entre N/Nf (300 meses) das misturas asfálticas e Nf em 5% dos ligantes.....	298
Figura 196 – Correlação entre N/Nf (300 meses) das misturas asfálticas e FFL determinado entre 1 e 5% de deformação dos ligantes.....	300
Figura 197 – Correlação entre N/Nf (300 meses) das misturas asfálticas e FFL determinado entre 1 e 2,5% de deformação dos ligantes.....	301
Figura 198 – Correlação entre N/Nf (300 meses) das misturas asfálticas e FFL determinado entre 2,5 e 5,0% de deformação dos ligantes.....	302
Figura 199 – Critérios de ruptura determinados com base na queda de 50% G^* para os ligantes Neat (a, b, c) e SBS (d, e, f).....	330
Figura 200 – Critérios de ruptura determinados com base na queda de 35% C para os ligantes Neat (a, b, c) e SBS (d, e, f).....	331
Figura 201 – Critérios de ruptura determinados com base no pico C.N para os ligantes Neat (a, b, c) e SBS (d, e, f).....	332
Figura 202 – Critérios de ruptura determinados com base no pico de WSR para os ligantes Neat (a, b, c) e SBS (d, e, f).....	333
Figura 203 – Critérios de ruptura determinados com base no pico do δ para os ligantes Neat (a, b, c) e SBS (d, e, f).....	334
Figura 204 – Critérios de ruptura determinados com base no pico $C^2.N.(1-C)$ para os ligantes Neat (a, b, c) e SBS (d, e, f).....	335
Figura 205 – Nf calculado com base na definição de queda de 50% G^* para os ligantes Neat (a, b, c) e SBS (d, e, f) em diferentes condições de envelhecimento e leis de fadiga.....	336
Figura 206 – Nf calculado com base na definição de queda de 35% C para os ligantes Neat (a, b, c) e SBS (d, e, f) em diferentes condições de envelhecimento e leis de fadiga.....	337
Figura 207 – Nf calculado com base na definição pico C.N para os ligantes Neat (a, b, c) e SBS (d, e, f) em diferentes condições de envelhecimento e leis de fadiga.....	338
Figura 208 – Nf calculado com base na definição do pico WSR para os ligantes Neat (a, b, c) e SBS (d, e, f) em diferentes condições de envelhecimento e leis de fadiga.....	339

Figura 209 – Nf calculado com base na definição do pico δ para os ligantes Neat (a, b, c) e SBS (d, e, f) em diferentes condições de envelhecimento e leis de fadiga.....	340
Figura 210 – Nf calculado com base na definição do pico $C^2.N.(1-C)$ para os ligantes Neat (a, b, c) e SBS (d, e, f) em diferentes condições de envelhecimento e leis de fadiga .	341
Figura 211 – Critérios de ruptura determinados com base na queda de $50\% G^* $ para os ligantes Neat RAP com diferentes concentrações de agente S (a, b, c) e R (d, e, f)	348
Figura 212 – Critérios de ruptura determinados com base na queda de $50\% G^* $ para os ligantes Neat RAP com diferentes concentrações de agente S (a, b, c) e R (d, e, f)	349
Figura 213 – Gráfico de mistura entre critérios de ruptura vs diferentes concentrações de AR S e R com o ligante Neat RAP determinados com base na definição de falha de queda de $50\% G^* $	350
Figura 214 – Gráfico de mistura entre critérios de ruptura vs diferentes concentrações de AR S e R com o ligante SBS RAP determinados com base na definição de falha de queda de $50\% G^* $	351
Figura 215 – Critérios de ruptura determinados com base na queda de $35\%C$ para os ligantes Neat RAP com diferentes concentrações de agente S (a, b, c) e R (d, e, f)	352
Figura 216 – Critérios de ruptura determinados com base na queda de $35\%C$ para os ligantes SBS RAP com diferentes concentrações de agente S (a, b, c) e R (d, e, f).....	353
Figura 217 – Gráfico de mistura entre critérios de ruptura vs diferentes concentrações de AR S e R com o ligante Neat RAP determinados com base na definição de falha de queda de $35\%C$	354
Figura 218 – Gráfico de mistura entre critérios de ruptura vs diferentes concentrações de AR S e R com o ligante SBS RAP determinados com base na definição de falha de queda de $35\%C$	355
Figura 219 – Critérios de ruptura determinados com base no pico de $C.N$ para os ligantes Neat RAP com diferentes concentrações de agente S (a, b, c) e R (d, e, f).....	356
Figura 220 – Critérios de ruptura determinados com base no pico de $C.N$ para os ligantes SBS RAP com diferentes concentrações de agente S (a, b, c) e R (d, e, f).....	357
Figura 221 – Gráfico de mistura entre critérios de ruptura vs diferentes concentrações de AR S e R com o ligante Neat RAP determinados com base na definição de falha de pico de $C.N$	358
Figura 222 – Gráfico de mistura entre critérios de ruptura vs diferentes concentrações de AR S e R com o ligante SBS RAP determinados com base na definição de falha pico de $C.N$	359
Figura 223 – Critérios de ruptura determinados com base no pico de WSR para os ligantes Neat RAP com diferentes concentrações de agente S (a, b, c) e R (d, e, f)	360
Figura 224 – Critérios de ruptura determinados com base no pico de WSR para os ligantes Neat RAP com diferentes concentrações de agente S (a, b, c) e R (d, e, f)	361
Figura 225 – Gráfico de mistura entre critérios de ruptura vs diferentes concentrações de AR S e R com o ligante Neat RAP determinados com base na definição de falha pico de WSR	362
Figura 226 – Gráfico de mistura entre critérios de ruptura vs diferentes concentrações de AR S e R com o ligante SBS RAP determinados com base na definição de falha pico de WSR	363
Figura 227 – Critérios de ruptura determinados com base no pico do δ para os ligantes Neat RAP com diferentes concentrações de agente S (a, b, c) e R (d, e, f).....	364
Figura 228 – Critérios de ruptura determinados com base no pico do δ para os ligantes SBS RAP com diferentes concentrações de agente S (a, b, c) e R (d, e, f).....	365

Figura 229 – Gráfico de mistura entre critérios de ruptura vs diferentes concentrações de AR S e R com o ligante Neat RAP determinados com base na definição de falha do pico do δ	366
Figura 230 – Gráfico de mistura entre critérios de ruptura vs diferentes concentrações de AR S e R com o ligante SBS RAP determinados com base na definição de falha do pico do δ	367
Figura 231 – Critérios de ruptura determinados com base no $C^2.N.(1-C)$ para os ligantes Neat RAP com diferentes concentrações de agente S (a, b, c) e R (d, e, f)	368
Figura 232 – Critérios de ruptura determinados com base no $C^2.N.(1-C)$ para os ligantes SBS RAP com diferentes concentrações de agente S (a, b, c) e R (d, e, f)	369
Figura 233 – Gráfico de mistura entre critérios de ruptura vs diferentes concentrações de AR S e R com o ligante Neat RAP determinados com base na definição de falha do $C^2.N.(1-C)$	370
Figura 234 – Gráfico de mistura entre critérios de ruptura vs diferentes concentrações de AR S e R com o ligante SBS RAP determinados com base na definição de falha do $C^2.N.(1-C)$	371
Figura 235 – Vida de fadiga dos ligantes Neat RAP com diferentes concentrações de AR S (a, b, c) e R (d, e, f) determinados com base na definição de falha de queda de $50\% G^* $ e diferentes leis de fadiga	372
Figura 236 – Vida de fadiga dos ligantes SBS RAP com diferentes concentrações de AR S (a, b, c) e R (d, e, f) determinados com base na definição de falha de queda de $50\% G^* $ e diferentes leis de fadiga	373
Figura 237 – Gráfico de mistura entre N_f em 5% de deformação por diferentes leis para previsão de desempenho vs diferentes concentrações de AR S e R com o ligante Neat RAP (a, b, c) e SBS RAP (d, e, f) determinados com base na definição de falha de queda de $50\% G^* $	374
Figura 238 – Vida de fadiga dos ligantes Neat RAP com diferentes concentrações de AR S (a, b, c) e R (d, e, f) determinados com base na definição de falha de queda de $35\%C$ e diferentes leis de fadiga	375
Figura 239 – Vida de fadiga dos ligantes SBS RAP com diferentes concentrações de AR S (a, b, c) e R (d, e, f) determinados com base na definição de falha de queda de $35\%C$ e diferentes leis de fadiga	376
Figura 240 – Gráfico de mistura entre N_f em 5% de deformação por diferentes leis para previsão de desempenho vs diferentes concentrações de AR S e R com o ligante Neat RAP (a, b, c) e SBS RAP (d, e, f) determinados com base na definição de falha de queda de $35\%C$	377
Figura 241 – Vida de fadiga dos ligantes Neat RAP com diferentes concentrações de AR S (a, b, c) e R (d, e, f) determinados com base na definição de falha de pico de $C.N$ e diferentes leis de fadiga	378
Figura 242 – Vida de fadiga dos ligantes SBS RAP com diferentes concentrações de AR S (a, b, c) e R (d, e, f) determinados com base na definição de falha de pico de $C.N$ e diferentes leis de fadiga	379
Figura 243 – Gráfico de mistura de N_f (@5%) determinado diferentes leis para previsão de desempenho vs diferentes concentrações de AR S e R com o ligante Neat RAP (a, b, c) e SBS RAP (d, e, f) com base na definição de falha de pico de $C.N$	380
Figura 244 – Vida de fadiga dos ligantes Neat RAP com diferentes concentrações de AR S (a, b, c) e R (d, e, f) determinados com base na definição de falha pico de WSR e diferentes leis de fadiga	381

Figura 245 – Vida de fadiga dos ligantes SBS RAP com diferentes concentrações de AR S (a, b, c) e R (d, e, f) determinados com base na definição de falha pico de WSR e diferentes leis de fadiga.....	382
Figura 246 – Gráfico de mistura de Nf (@5%) determinado diferentes leis para previsão de desempenho vs diferentes concentrações de AR S e R com o ligante Neat RAP (a, b, c) e SBS RAP (d, e, f) com base na definição de falha pico de WSR	383
Figura 247 – Vida de fadiga dos ligantes Neat RAP com diferentes concentrações de AR S (a, b, c) e R (d, e, f) determinados com base na definição de falha do pico do δ e diferentes leis de fadiga.....	384
Figura 248 – Vida de fadiga dos ligantes SBS RAP com diferentes concentrações de AR S (a, b, c) e R (d, e, f) determinados com base na definição de falha do pico do δ e diferentes leis de fadiga.....	385
Figura 249 – Gráfico de mistura de Nf (@5%) determinado diferentes leis para previsão de desempenho vs diferentes concentrações de AR S e R com o ligante Neat RAP (a, b, c) e SBS RAP (d, e, f) com base na definição de falha do pico do δ	386
Figura 250 – Vida de fadiga dos ligantes Neat RAP com diferentes concentrações de AR S (a, b, c) e R (d, e, f) determinados com base na definição de falha do $C^2.N.(1-C)$ e diferentes leis de fadiga.....	387
Figura 251 – Vida de fadiga dos ligantes SBS RAP com diferentes concentrações de AR S (a, b, c) e R (d, e, f) determinados com base na definição de falha do $C^2.N.(1-C)$ e diferentes leis de fadiga.....	388
Figura 252 – Gráfico de mistura de Nf (@5%) determinado diferentes leis para previsão de desempenho vs diferentes concentrações de AR S e R com o ligante Neat RAP (a, b, c) e SBS RAP (d, e, f) com base na definição de falha $C^2.N.(1-C)$	389
Figura 253 – Gráficos de contorno aos 1, 6, 24, 90, 180 e 300 meses da mistura Neat RAP determinados com base no G^R	390
Figura 254 – Gráficos de contorno aos 1, 6, 24, 90, 180 e 300 meses da mistura Neat RAP +8%R determinados com base no G^R	390
Figura 255 – Gráficos de contorno aos 1, 6, 24, 90, 180 e 300 meses da mistura Neat RAP +12%R determinados com base no G^R	391
Figura 256 – Gráficos de contorno aos 1, 6, 24, 90, 180 e 300 meses da mistura Neat RAP +16%R determinados com base no G^R	391
Figura 257 – Gráficos de contorno aos 1, 6, 24, 90, 180 e 300 meses da mistura Neat RAP + 8%R + 1%HiMA determinados com base no G^R	392
Figura 258 – Gráficos de contorno aos 1, 6, 24, 90, 180 e 300 meses da mistura Neat REF determinados com base no G^R	392
Figura 259 – Gráficos de contorno aos 1, 6, 24, 90, 180 e 300 meses da mistura SBS RAP determinados com base no G^R	393
Figura 260 – Gráficos de contorno aos 1, 6, 24, 90, 180 e 300 meses da mistura SBS RAP + 8%R determinados com base no G^R	393
Figura 261 – Gráficos de contorno aos 1, 6, 24, 90, 180 e 300 meses da mistura SBS RAP + 12%R determinados com base no G^R	394
Figura 262 – Gráficos de contorno aos 1, 6, 24, 90, 180 e 300 meses da mistura SBS RAP + 16%R determinados com base no G^R	394
Figura 263 – Gráficos de contorno aos 1, 6, 24, 90, 180 e 300 meses da mistura SBS RAP + 8%R + 1%HiMA determinados com base no G^R	395
Figura 264 – Gráficos de contorno aos 1, 6, 24, 90, 180 e 300 meses da mistura SBS REF determinados com base no G^R	395
Figura 265 – Gráficos de contorno aos 1, 6, 24, 90, 180 e 300 meses da mistura Neat RAP determinados com base no D^R	396

Figura 266 – Gráficos de contorno aos 1, 6, 24, 90, 180 e 300 meses da mistura Neat RAP + 8%R determinados com base no D^R	396
Figura 267 – Gráficos de contorno aos 1, 6, 24, 90, 180 e 300 meses da mistura Neat RAP + 12%R determinados com base no D^R	397
Figura 268 – Gráficos de contorno aos 1, 6, 24, 90, 180 e 300 meses da mistura Neat RAP + 16%R determinados com base no D^R	397
Figura 269 – Gráficos de contorno aos 1, 6, 24, 90, 180 e 300 meses da mistura Neat RAP + 8%R + 1%HiMA determinados com base no D^R	398
Figura 270 – Gráficos de contorno aos 1, 6, 24, 90, 180 e 300 meses da mistura Neat REF determinados com base no D^R	398
Figura 271 – Gráficos de contorno aos 1, 6, 24, 90, 180 e 300 meses da mistura SBS RAP determinados com base no D^R	399
Figura 272 – Gráficos de contorno aos 1, 6, 24, 90, 180 e 300 meses da mistura SBS RAP + 8%R determinados com base no D^R	399
Figura 273 – Gráficos de contorno aos 1, 6, 24, 90, 180 e 300 meses da mistura SBS RAP + 12%R determinados com base no D^R	400
Figura 274 – Gráficos de contorno aos 1, 6, 24, 90, 180 e 300 meses da mistura SBS RAP + 16%R determinados com base no D^R	400
Figura 275 – Gráficos de contorno aos 1, 6, 24, 90, 180 e 300 meses da mistura SBS RAP + 8%R + 1%HiMA determinados com base no D^R	401
Figura 276 – Gráficos de contorno aos 1, 6, 24, 90, 180 e 300 meses da mistura SBS REF determinados com base no D^R	401

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tipos comuns de agentes rejuvenescedores	59
Tabela 2 - Efeito do tipo e da dosagem dos agentes rejuvenescedores nas propriedades de ligante e misturas	60
Tabela 3 - Plano experimental proposto pela autora	73
Tabela 4 – Caracterização dos ligantes asfálticos Neat e SBS	83
Tabela 5 – Características das duas fontes de material RAP	83
Tabela 6 - Parâmetros adotados no processo de recuperação e designações dos ligantes.....	86
Tabela 7 - Classificação PGH quanto ao nível de tráfego e análise da variação do Jnr dos ligantes de acordo com os limites permitidos pela ASTM D 7405 (2020).....	99
Tabela 8 – Parâmetros de fadiga de acordo com os ligantes analisados	101
Tabela 9 - Resultados de caracterização convencional do ligante 50/70 e do AMP 60/85	113
Tabela 10 – Caracterização das propriedades do AR S.....	114
Tabela 11 – Caracterização das propriedades do AR R	114
Tabela 12 – Ligantes utilizados para análise do envelhecimento.....	115
Tabela 13 – Resumo das misturas entre ligantes RAP e agentes rejuvenescedores.....	115
Tabela 14 - Estrutura de análise S-VECD para ligantes.....	127
Tabela 15 - Critérios estatísticos para a qualidade do ajuste.....	132
Tabela 16 - Queda no valor de penetração com o grau de envelhecimento em %	134
Tabela 17 – Coeficientes de translação (at) para Tref = 25°C e coeficientes de ajuste WLF e polinomial com o envelhecimento	136
Tabela 18 – Coeficientes de ajuste pelo modelo 2s2p1s com o envelhecimento	136
Tabela 19 – Classificação quanto ao nível de tráfego dos ligantes sob diferentes condições de envelhecimento a partir do Jnr em 3,2 kPa	157
Tabela 20 - Comparação de diferentes critérios de falha em CSR = 300.....	165
Tabela 21 - Ranqueamento das definições de falha com base no R ² das correlações encontradas	165
Tabela 22 - Valores de G* , α e m dos ligantes Neat e SBS submetidos ao envelhecimento UV	170
Tabela 23 - Valores médios de C1 e C2 obtidos entre as seis definições de falhas em um mesmo nível de envelhecimento	173
Tabela 24 - Variação de Nf (Nf virgem – Nf RAP) simulado pelas três formulações de previsão de desempenho para as diferentes definições de falha em níveis de deformação de 1,0%, 2,5% e 5%	179
Tabela 25 - Coeficientes de translação (at) para Tref = 25°C e coeficientes de ajuste do WLF e polinomial para diferentes tipos e concentrações de agentes rejuvenescedores .	184
Tabela 26 – Parâmetros do ajuste 2s2p1d para os ligantes com diferentes tipos e concentrações de agentes rejuvenescedores.....	192
Tabela 27 - Teor ótimo do AR S e R para os ligantes Neat RAP e SBS RAP determinado por diferentes índices extraídos da caracterização LVE	201
Tabela 28 - Dados de caracterização LVE do ligantes obtidos a partir do teste LAS para os ligantes Neat RAP e SBS RAP com diferentes concentrações de AR S e R.....	211
Tabela 29 – Comparação entre C1 e C2 para diferentes definições de falha	223
Tabela 30 - Teores ótimos de ARs com base em diferentes parâmetros de fadiga extraídos do teste LAS do ligante Neat RAP.....	231
Tabela 31 - Teores ótimos de ARs com base em diferentes parâmetros de fadiga extraídos do teste LAS do ligante SBS RAP.....	232

Tabela 32 – Valores médios, desvio padrão e coeficiente de variação dos teores ótimos com base em critérios LVE, fadiga e deformação permanente	233
Tabela 33 - Resultados de caracterização convencional do ligante HiMA.....	243
Tabela 34 - Projeto das misturas: resumo do teor de ligante, concentração de agente rejuvenescedor, gmm e nomenclatura utilizada	245
Tabela 35 - Classificação das misturas quanto ao tráfego de acordo com o FN.....	251
Tabela 36 - Estrutura de análise S-VECD	253
Tabela 37 – Coeficientes de translação (at) para $T_{ref} = 21^{\circ}C$ e coeficientes do WLF.....	264
Tabela 38 – Coeficientes do modelo sigmoidal e shift factos usados para modelar o comportamento LVE das misturas	277
Tabela 39 – Alpha, coeficientes C11 e C12; Y e Δ ; D^R , S_{rep} , S_{app} e coeficiente angular de $Cum(1-C)$ vs N_f	277
Tabela 40 Proposta de classificação das misturas quanto ao desempenho por fadiga por meio do FFM simulado pelo G^R e D^R , e pelo dano médio acumulado aos 300 meses no FlexPAVE TM também pelo G^R e D^R	290
Tabela 41 – Comparação das misturas investigadas com misturas convencionais de Boeira (2018), Schuster (2018), Luzzi (2019), Correa (2020) e Possebon (2021) a partir do FFM determinado pela solução analítica de Santos et al. (2020).....	292
Tabela 42 – Correlação entre N/N_f (FlexPAVE TM) vs N_f (ciclo de falha) obtido pelas seis definições testadas no LAS 300, 600 e 1200.....	295
Tabela 43 – Correlação entre N/N_f (FlexPAVE TM) vs N_f obtido pelas três equações de simulação da vida de fadiga nos níveis de deformação de 1,0%, 2,5% e 5%	299
Tabela 44 – Correlação entre N/N_f (FlexPAVE TM) vs FFL obtido pelas três equações de simulação da vida de fadiga em intervalos de 1% a 1,5%, 2,5% a 5% e 1% a 5%	303
Tabela 45 - Dados S-VECD com base na definição de falha pela queda de 50% $ G^* $	327
Tabela 46 - Dados S-VECD com base na definição de falha pela queda de 35% C	327
Tabela 47 - Dados S-VECD com base na definição de falha pelo pico do C.N	328
Tabela 48 - Dados S-VECD com base na definição de falha pelo pico do WSR	328
Tabela 49 - Dados S-VECD com base na definição de falha pelo pico do δ	329
Tabela 50 - Dados S-VECD com base na definição de falha pelo pico do $C^2.N.(1-C)$	329
Tabela 51 - Dados S-VECD com base na definição de falha redução de 50% $ G^* $	342
Tabela 52 - Dados S-VECD com base na definição de falha redução de 35% da integridade	343
Tabela 53 - Dados S-VECD com base na definição de falha C.N.....	344
Tabela 54 - Dados S-VECD com base na definição de falha PSE	345
Tabela 55 - Dados S-VECD com base na definição de falha do ângulo de fase	346
Tabela 56 - Dados S-VECD com base na definição de falha do $C^2.N.(1-C)$	347

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ε_{TA}^R	Amplitude de pseudo deformação
$ E^* $	Módulo dinâmico
$ G^* $	Módulo de cisalhamento dinâmico
°	Graus
°C	Graus Celsius
2S2P1D	<i>2 Springs, 2 Parabolic Elements, 1 Dashpot</i>
A35	Queda de 35% da integridade do material
AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
af	Tamanho da trinca
AMP	Asfalto Modificado por Polímero
APA	<i>Asphalt Pavement Analyzer</i>
AR	Agente rejuvenescedor
ASTM	<i>American Society for Testing</i>
aT	Fator de Translação
ATR	Afundamento em Trilha de Roda
C	Integridade
CDE	Energia Dissipada Acumulada
Cf	Pseudo-módulo normalizado na falha
CGS	Compactador Giratório Superpave
cm ⁻¹	1/centímetro
CO ₂	Dióxido de Carbono
COAC	<i>Corrected Optimum Asphalt Content</i>
CSR	<i>Cyclic Strain Rate</i>
DAER	Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem
DER	<i>Dissipated Energy Ratio</i>
dmm	Décimos de milímetro
DMR	Razão do módulo dinâmico ou <i>Dynamic modulus ratio</i>
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte
DoA	<i>Degree of binder Activity</i>
DoAv	<i>Degree of binder Availability</i>
DoB	<i>Degree of binder Blending</i>
DPSE	<i>Dissipated Pseudo-Strain Energy</i>
D ^R ou DR	Critério de falha baseado na redução média da pseudo rigidez (C) até a falha
DSR	<i>Dynamic Shear Rheometer</i>
EIMC	<i>Enhanced Integrated Climate Model</i>
ESALs	<i>Equivalent Single Axle Load</i>
EVA	<i>Polyethylene-Ethylene-Vinylacetate</i>
FFL	Fator de Fadiga de Ligantes
FFM	Fator de Fadiga de Misturas
FN	<i>Flow Number</i>
FSC	<i>Fatigue Strain Capacity</i>
FTIR	<i>Fourier Transform Infrared Spectroscopy</i>
g	grama
G _C	Módulo de Cruzamento
G _g	Constante de 10 ⁹

Gmb	Densidade Específica Aparente
Gmm	Densidade máxima medida
G ^R ou GR	Critério de falha por fadiga baseado na energia
G-R	Glover-Rowe
Gsb	Massa Específica do Agregado RAP
HiMA	<i>Highly Modified Asphalt</i>
HMA	<i>Hot Mix Asphalt</i>
Hz	Hertz
Ic	Instabilidade Coloidal
IDT ou ITS	<i>Indirect tensile strength</i>
ITT	Resistência à Tração Indireta
J	Compliância
Jnr	Compliância não recuperável
Kg	Kilograma
Km/h	Kilometro por Hora
kN	Kilonewton
kPa	Kilopascal
LAS	<i>Linear Amplitude Sweep</i>
LTPP	<i>Long-Term Pavement Performance</i>
LVE	<i>Linear Viscoelastic</i>
LVECD	<i>Layered Viscoelastic Pavement Analysis for Critical Distresses</i>
MFS	Material Fatigue Sensitive
mg	miligrama
min	Minutos
mm	Milímetros
MMLS3	<i>Model Mobile Load Simulator</i>
MPa	Megapascal
MSCR	<i>Multiple Stress Creep and Recovery</i>
NBR	Norma Brasileira
NCAT	<i>National Center for Asphalt Technology</i>
Nf	Ciclos até a falha
Nf ₅₀	<i>Número de ciclos até a redução de 50% da rigidez</i>
PAV	<i>Pressure Aging Vessel</i>
PG	<i>Performance Grade</i>
PGH	<i>Performance Grade High</i>
PGHcont	<i>Continuous Performance Grade High</i>
PGI	<i>Intermediate Performance Grade</i>
PGI _{cont}	<i>Continuous Intermediate Performance Grade</i>
PGL	<i>Performance Grade Low</i>
PSE	<i>Pseudo-Strain Energy</i>
PSTT	Princípio de superposição tempo-temperatura
R%	Percentual de Recuperação
R _{1,0}	Percentual de recuperação pós fluência em 1,0 kPa
R ²	Coeficiente de determinação
R _{3,2}	Percentual de recuperação pós fluência em 3,2 kPa
RAB	<i>Reclaimed Asphalt Binder</i>
rad	Radianos
rad/s	Radianos por Segundo
RAI	<i>Rheological Aging Index</i>
RAI _{DP}	<i>Rheological Aging Index</i> no domínio relacionado à deformação permanente

RAI _{FAD}	<i>Rheological Aging Index</i> no domínio relacionado à fadiga
RAI _{TOTAL}	<i>Rheological Aging Index</i> no domínio total de frequências e temperaturas
RAM	<i>Reclaimed Asphalt Mixture</i>
RAP	<i>Reclaimed Asphalt Pavement</i>
RAS	<i>Reclaimed Asphalt Single</i>
RP	<i>Retained Penetration Aging Index</i>
RS	Rio Grande do Sul
RSM	<i>Rejuvenator Sealer Materials</i>
RT	Resistência à tração
RTFOT	<i>Rolling Thin Film Oven Test</i>
R-Value	<i>Reological Index</i>
RVB	<i>Replaced Virgin Binder</i>
S	Dano
s	Segundo
SARA	Saturados, Aromáticos, Resinas e Asfaltenos
SBR	<i>Styrene-Butadiene-Rubber</i>
SBS	<i>Styrene-Butadiene-Styrene</i>
SCB	Semi-Circular Bend
SE	Straining effort
Sf	Dano na falha
SHRP	<i>Strategic Highway Research Programme</i>
SINAPI	Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices
SMB	<i>Styrene-Butadiene copolymer Modified Bitumen</i>
Sol	Líquido newtoniano
Superpave	<i>Superior Performing Asphalt Pavement</i>
S-VECD	<i>Simplified Viscoelastic Continuum Damage</i>
TCE	Tricloroetileno
ton	Tonelada
Tref	Temperatura de Referência
TS	<i>Time Sweep</i>
TTSP	Princípio de superposição tempo-temperatura
T _{δ=45°C}	Temperatura de Cruzamento
UTM	<i>Universal Testing Machine</i>
UV	Raios Ultravioleta
VAM	Vazios no Agregado Mineral
VECD	<i>Viscoelastic Continuum Damage</i>
Vv	Volume de Vazios
W	Trabalho
WLF	Williams-Landel-Ferry
WMA	<i>Warm Mix Asphalt</i>
W ^R	Energia de pseudo-deformação armazenada
W ^R _{sum}	Energia de pseudo-deformação acumulada
α	Taxa de evolução do dano
δ ou Φ	Ângulo de fase
ΔTc	Diferença nas temperaturas de testes no BBR
ε ₀	Deformação inicial
ε _p	Deformação permanente
τ	Tensão cisalhante
τxN	Tensão cisalhante vs número de ciclos
ω _c	<i>Crossover Frequency</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	OBJETIVO GERAL.....	21
1.2	ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO.....	22
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	26
2.1.	LIGANTE ASFÁLTICO.....	26
2.1.1.	Definição, composição química e estrutura coloidal	26
2.1.2.	Envelhecimento e Rejuvenescimento de ligantes.....	29
2.1.2.1.	Fatores e mecanismos de envelhecimento.....	29
2.1.2.2.	Influência nas propriedades químicas	30
2.1.2.3.	Influência nas propriedades convencionais	32
2.1.2.4.	Influência nas propriedades reológicas.....	33
2.1.2.5.	Influência nas propriedades de desempenho.....	40
2.2.	RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT (RAP).....	50
2.2.1.	Práticas atuais para projetos.....	51
2.2.2.	Degree of binder Activity e Degree of binder Blending	56
2.2.3.	Agentes rejuvenescedores	57
2.2.3.1.	Tipos, dosagem e impacto no comportamento	58
2.2.3.2.	Difusão e local de adição	63
2.2.4.	Comportamento mecânico de misturas recicladas.....	64
2.2.5.	Misturas 100% RAP.....	67
2.3.	CORRELAÇÃO DO DANO POR FADIGA ENTRE LIGANTE E MISTURAS ASFÁLTICAS.....	70
3	CALIBRAÇÃO DO PROCESSO DE RECUPERAÇÃO DE LIGANTES ASFÁLTICOS NO EVAPORADOR ROTATIVO ATRAVÉS DE ANÁLISE REOLÓGICA E DE DESEMPENHO.....	80
3.1.	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	80
3.2.	MATERIAIS	82
3.3.	PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	84
3.4.	PROCEDIMENTO DE RECUPERAÇÃO E TESTES	85
3.4.1.	Fourier Transform Infrared Spectroscopy	85
3.4.2.	<i>Performance Grade</i> de alta temperatura	86
3.4.3.	Caracterização viscoelástica linear	86
3.4.4.	Multiple Stress Creep and Recovery	87
3.4.5.	Linear amplitude sweep	87
3.5.	RESULTADOS	89
3.5.1.	Fourier Transform Infrared Spectroscopy	89
3.5.2.	<i>Performance Grade</i> de alta temperatura	91
3.5.3.	Caracterização viscoelástico linear	94
3.5.4.	MSCR.....	97
3.5.5.	Linear Amplitude Sweep.....	100
3.6.	PROPOSTA DE PROCEDIMENTO GENÉRICO DE CALIBRAÇÃO	103
3.7.	CONCLUSÕES	106
4	AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DE LIGANTES COM O ENVELHECIMENTO E O REJUVENESCIMENTO	108
4.1.	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	108
4.2.	PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	109
4.3.	MATERIAIS	111
4.3.1.	Ligantes RAPs	111

4.3.2.	Ligantes asfálticos.....	112
4.3.3.	Agentes rejuvenescedores.....	113
4.4.	PROJETO DE LIGANTES ASFÁLTICOS	114
4.5.	CARACTERIZAÇÃO E TESTES DE LIGANTES	116
4.5.1.	Propriedade Convencional.....	117
4.5.1.1.	Penetração.....	117
4.5.2.	Propriedades Reológicas.....	118
4.5.3.	Caracterização <i>Superpave</i>	121
4.5.4.	Propriedades de Desempenho.....	122
4.5.4.1.	Deformação permanente: Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR).....	122
4.5.4.2.	Fadiga: Linear Amplitude Sweep (LAS).....	125
4.6.	RESULTADOS	131
4.6.1.	Influência do envelhecimento nas propriedades dos ligantes.....	132
4.6.1.1.	Penetração.....	133
4.6.1.2.	Caracterização LVE.....	134
4.6.1.3.	Performance Grade: temperaturas críticas.....	150
4.6.1.4.	Multiple Stress Creep and Recovery.....	154
4.6.1.5.	Linear Amplitude Sweep Test.....	160
4.6.1.5.1.	Definições de falha.....	162
4.6.1.5.2.	Curvas características de dano e critérios de ruptura.....	173
4.6.1.5.3.	Previsão da vida de fadiga.....	177
4.6.2.	Influência do rejuvenescimento nas propriedades dos ligantes.....	180
4.6.2.1.	Penetração.....	180
4.6.2.2.	Caracterização LVE.....	182
4.6.2.3.	Performance grade: temperaturas críticas.....	202
4.6.2.4.	Multiple Stress Creep and Recovery:.....	208
4.6.2.5.	Linear Amplitude Sweep Test.....	210
4.6.2.5.1.	Definições de falha.....	213
4.6.2.5.1.	Curvas características de dano e critérios de ruptura.....	222
4.6.2.5.1.	Previsão da vida de fadiga.....	226
4.6.2.6.	Dosagem dos agentes rejuvenescedores por diferentes critérios.....	233
4.7.	CONCLUSÕES	236
5	AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DE MISTURAS 100% RAP COM AGENTE REJUVENESCEDOR E TEOR DE LIGANTE OTIMIZADO	238
5.1.	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	238
5.2.	PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	240
5.3.	MATERIAIS.....	242
5.3.1.	RAPs.....	242
5.3.2.	Ligantes asfálticos.....	243
5.3.3.	Agente rejuvenescedor.....	243
5.4.	PROJETO DE MISTURAS ASFÁLTICAS	243
5.4.1.	Determinação do Degree of Binder Activity.....	244
5.4.2.	Preparação e compactação de amostras para testes mecânicos.....	248
5.5.	CARACTERIZAÇÃO E TESTES EM MISTURAS	249
5.5.1.	Caracterização Linear Viscoelástica.....	249
5.5.2.	Deformação Permanente: <i>Flow number</i>	250
5.5.3.	Fadiga: ensaio uniaxial cíclico à tração-compressão.....	251
5.6.	RESULTADOS	256
5.6.1.	Determinação do Degree of Binder Activity.....	257
5.6.2.	Caracterização Linear Viscoelástica.....	264

5.6.3.	Deformação Permanente: <i>Flow Number</i>	272
5.6.4.	Fadiga: Simplified viscoelastic continuum damage model	275
5.6.5.	Performance à fadiga utilizando o programa de simulação FlexPave™	286
5.6.5.1.	Correlação entre resistência à fadiga de ligantes e misturas	293
5.6.5.1.1.	Ciclo de falha no LAS vs N/Nf (FlexPAVE™).....	293
5.6.5.1.2.	Equações de previsão da vida de fadiga no LAS vs N/Nf (FlexPAVE™).....	295
5.6.5.1.3.	FFL no LAS vs N/Nf (FlexPAVE™).....	299
5.7.	CONCLUSÕES	303
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	306
6.1.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	308
	APÊNDICES	326
	Apêndice A – Dados S-VECD para as diferentes definições de falha no teste LAS com o envelhecimento.....	327
	Apêndice B – Efeitos do envelhecimento nos diferentes critérios de ruptura determinados por diferentes definições de falha	330
	Apêndice C – Efeito do envelhecimento na simulação da vida de fadiga com base nas equações de Wang et al. (2015), Wang et al. (2018) e Safaei (2017) e diferentes definições de falha.	336
	Apêndice D – Dados S-VECD para as diferentes definições de falha no teste LAS com o rejuvenescimento.	342
	Apêndice E – Efeito do rejuvenescimento nos diferentes critérios de ruptura.....	348
	Apêndice F – Efeito do rejuvenescimento na simulação da vida de fadiga com base nas equações de Wang et al. (2015), Wang et al. (2018) e Safaei (2017) e diferentes definições de falha	372
	Apêndice G – Gráficos de contorno aos 1, 6, 24, 90, 180 e 300 meses para as misturas com base no G^R e DR.....	390

1 INTRODUÇÃO

O aumento considerável no preço dos insumos asfálticos e a necessidade em promover a sustentabilidade e a preservação de recursos naturais, como resposta às mudanças climáticas e socioeconômicas globais, colocam a reciclagem como um dos pilares da indústria da pavimentação contemporânea. Dentre as soluções, a utilização do *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP), principalmente no concreto asfáltico, tornou-se atrativa por promover ganhos ambientais pela conservação dos recursos naturais, redução nos custos, consumo de energia e emissão de gases do efeito estufa (ARULRAJAH et al., 2014; MANGIAFICO, 2014; RAHMAN et al., 2014; HOY et al., 2017; LUZZI et al., 2021).

Dados dos Estados Unidos de 2019 mostram que a utilização de mais de 89,2 milhões de toneladas de RAP em novos revestimentos gerou uma economia de 4,5 milhões de toneladas de ligante asfáltico, 84 milhões de toneladas de agregado e mais de 3,3 bilhões de dólares (BRETT et al., 2020). Na Europa, em 2020, foram empregadas 25,6 milhões de toneladas (de 46,4 milhões de toneladas) em misturas asfálticas mornas e quentes (EAPA, 2020). No Brasil, Suzuki (2019) estima aproximadamente 1 milhão de toneladas de RAP gerado entre 2017 a 2021 a partir de dados de sete concessionárias de rodovias.

Apesar do alto volume gerado como efeito da perda da capacidade estrutural e da vida de serviço do revestimento asfáltico, a quantidade média incorporada em novas misturas asfálticas ainda é limitada a baixos teores. Nos EUA, por exemplo, o percentual médio em misturas asfálticas aumentou de 15,6% em 2009 para 21,1% em 2019 (BRETT et al., 2020). Nestas proporções, estudos apontam pouca ou nenhuma perda de desempenho nas propriedades mecânicas do concreto asfáltico (TABAKOVIC et al, 2010; WEST et al. 2011; AL QADI et al., 2012; NOROUZI et al., 2014; CENTOFANTE, 2016; BOHN, 2017; LUZZI, 2019; SUZUKI, 2019; CORREA, 2020).

Em contrapartida, concretos asfálticos com teores mais elevados exibem perda de desempenho como consequência das propriedades e fenômenos relacionados ao ligante presente no RAP: o grau de atividade, a interação e a rigidez excessiva. O desempenho das misturas recicladas em níveis similares aos promovidos por materiais virgens é uma condição para a redução de custos, somado ao menor impacto ambiental.

O grau de atividade é relacionado a um processo de quantificação, chamado de *Degree of binder Activity* (DoA) e *Degree of binder Availability* (DoAv), e representam um índice que indica a quantidade mínima e máxima, respectivamente, de ligante RAP ativo que pode ser considerado em um projeto de mistura. Além de depender das condições de processamento

como a temperatura e o tempo de mistura, é uma propriedade intrínseca do material (LO PRESTI et al., 2019).

A interação está ligada a um fenômeno de mistura do ligante RAP com outros materiais virgens ou agentes rejuvenescedores, sendo denominado grau de mistura (*Degree of binder Blending*, DoB). Pode ser definido como um indicador que descreve até que ponto o ligante RAP contribui ou é efetivo para as propriedades finais da mistura asfáltica reciclada (LO PRESTI et al., 2019). Nesta variável, três cenários são citados: mistura nula, mistura parcial e mistura total, e inúmeras formulações para quantificar o fenômeno são estudadas na literatura (SHIRODKAR et al., 2011; BOWERS et al., 2014; ABED, THOM e LO PRESTI, 2018).

Por fim, os principais fatores que limitam o teor de incorporação são as propriedades do ligante RAP, como a baixa penetração, o alto ponto de amolecimento, a alta rigidez e elasticidade, e a baixa propriedade coesiva (NOSETTI et al., 2018). Essas características são efeitos dos processos de envelhecimento como a oxidação, mudanças na organização molecular e a perda dos voláteis (PETERSEN e GLASER, 2011; CAVALLI, PARTL e POULIKAKOS, 2017). Assim, quando incorporado sem nenhum material compensatório, resulta em misturas excessivamente rígidas e susceptíveis à fadiga (COPELAND, 2011; WEST et al., 2013; YAN et al., 2018; CORREA, 2020).

Procedimentos de dosagem e materiais são utilizados e testados para compensar a rigidez excessiva de misturas recicladas e testadas para melhorar o desempenho à fadiga. A dosagem balanceada, por exemplo, busca otimizar o teor de ligante final com o objetivo de melhorar a resposta ao trincamento por fadiga sem desbalancear a deformação permanente (AASHTO MP 46, 2020; AASHTO PP 105, 2020; MERONI et al., 2020; HABBOUCHE et al., 2021). GDOT (2013) propõe um teor adicional de ligante virgem acima do teor de projeto no valor de 25% do teor de ligante RAP, denominado de teor ótimo de ligante corrigido (*Corrected Optimum Asphalt Content*, COAC).

Os materiais que buscam reestabelecer a rigidez excessiva são os ligantes de alta penetração e baixa viscosidade (*softers binders*) (LIPHARDT et al., 2015; CARRION et al., 2017; YAN et al., 2018), e os agentes rejuvenescedores ou agentes de reciclagem. A primeira alternativa é utilizada como ligante base em projetos de mistura asfáltica, no entanto, como consequência pode resultar em misturas susceptíveis à deformação permanente.

Por outro lado, o agente rejuvenescedor (AR) tem por objetivo a quebra dos aglomerados de asfaltenos na matriz do ligante, reestabelecendo as propriedades químicas, reológicas e de desempenho do material envelhecido (NAHAR et al., 2014; YU et al., 2014; ZAUMANIS et al., 2014). Esses rejuvenescedores podem ser produtos comerciais ou

alternativos, provenientes de uma gama variada de matérias-primas, como a base de petróleo, resíduos da indústria de papel, óleos de cozinha ou motor, biomassa e algodão (YU et al., 2014; ZAUMANIS et al., 2014).

A dosagem do agente rejuvenescedor deve ser cuidadosamente selecionada, pois um valor excessivo irá amolecer significativamente o ligante RAP e tornar a mistura susceptível à deformação permanente; já o contrário, pode não ser suficiente para promover modificações químicas, recompor a reologia e o desempenho à fadiga. Este processo é realizado de acordo com a recomendação do fabricante ou por meio de uma dosagem que busca reestabelecer alguma propriedade ao nível de um ligante virgem, como a viscosidade, a penetração e o ponto de amolecimento (ZAUMANIS, MALLICK e FRANK, 2013; ZAUMANIS, MALLICK e FRANK, 2014; YAN et al., 2014).

O Grau de Desempenho (*Performance Grade*, PG), preconizado pela AASHTO M 320 (2017), também é utilizado para assegurar uma dosagem mínima em termos de resistência ao trincamento térmico (*Performance Grade Low*, PGL) ou uma dosagem máxima quanto à deformação permanente (*Performance Grade High*, PGH) (SHEN, AMIRKHANDIAN e MILLER, 2007; TRAN, TAYLOR e WILLIS, 2012; ZAUMANIS, MALLICK e FRANK, 2014). O parâmetro ΔT_c e o *Glover-Rowe* (G-R) também são testados como referência (ARÁMBULA-MERCADO et al., 2018).

As propriedades de dosagem citadas anteriormente não avaliam um dos principais mecanismos de falha de misturas recicladas: o trincamento por fadiga. Inclusive, a partir de estudos multi-escalas, autores concluíram que essas propriedades se relacionam bem com a deformação permanente e com o trincamento térmico, porém pouco ou nada com a fadiga de misturas asfálticas (RASTEGAR, DANIEL e REINKE, 2017; ZAUMANIS et al., 2018). Além disso, a própria potencialidade e a eficácia dos agentes rejuvenescedores em restaurar a vida de fadiga ainda é uma incógnita.

Diferentes ensaios e métodos de análises foram propostos para avaliar o comportamento à fadiga de misturas e ligantes asfálticos, como o teste uniaxial cíclico de tração-compressão e o *Linear Amplitude Sweep* (LAS), respectivamente. O modelo viscoelástico linear de dano contínuo simplificado (S-VECD) tem sido utilizado para interpretar os resultados experimentais de ambos os testes com relativo sucesso para concretos e ligantes asfálticos convencionais ou com baixos teores de RAP (AMERI et al., 2016; NASCIMENTO, 2015; NOROUZI et al., 2017; RASTEGAR, DANIEL e REINKE, 2017; SAFAEI, 2017). No entanto, a acurácia do modelo para previsão da vida de fadiga com o envelhecimento e o rejuvenescimento ainda carece de estudos.

Para isso, esta pesquisa avaliou diferentes definições de falha, critérios de ruptura e equações de previsão da vida de fadiga a fim de identificar quais são sensíveis aos efeitos do envelhecimento e do rejuvenescimento em ligantes e misturas asfálticas. A partir de análise comparativa dos resultados de fadiga entre ligantes e misturas, buscou-se definir os parâmetros para seleção e dosagem do agente rejuvenescedor com foco no principal mecanismo de falha de misturas recicladas que é o fenômeno de fadiga.

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral do trabalho é avaliar a potencialidade de agentes rejuvenescedores em recuperar a vida de fadiga e definir parâmetros de dosagem com base neste mecanismo de danificação a partir da análise em ligantes e validações em misturas asfálticas 100% RAP. A fim de atingir o objetivo geral, foram traçados objetivos específicos em três etapas com seus propósitos vinculados: implementação e calibração do evaporador rotativo para recuperação e correta caracterização de ligantes extraídos de RAP, estudo do envelhecimento e rejuvenescimento em ligantes com a finalidade de avaliar os efeitos em propriedades convencionais, reológicas e de desempenho; por fim, avaliação das propriedades de misturas 100% RAP com diferentes concentrações de agente rejuvenescedor e combinação entre agente rejuvenescedor e otimização do teor final por um ligante altamente modificado (HiMA).

Para implementação e calibração do evaporador rotativo, os objetivos específicos são:

- a) Analisar se o tipo, a modificação e o grau de envelhecimento do ligante asfáltico influenciam no tempo de destilação do tricloroetileno (TCE) no evaporador rotativo, por meio de análises químicas, reológicas e de desempenho;
- b) Determinar se a reologia e o desempenho dos ligantes asfálticos são efetivos para calibrar um procedimento de recuperação que resulte na evaporação completa do solvente, sem promover envelhecimento adicional, independentemente dos materiais testados;
- c) Determinar se testes reológicos e de desempenho em ligantes asfálticos são eficientes para calibrar um procedimento de recuperação que resulte na evaporação completa do solvente sem promover envelhecimento adicional.

A nível de ligantes asfálticos, os objetivos específicos são:

- a) Avaliar os efeitos do envelhecimento nas propriedades reológicas e de desempenho de ligantes envelhecidos artificialmente e dos extraídos e recuperados de RAPs;
- b) Analisar os impactos de diferentes concentrações de dois agentes rejuvenescedores comerciais nas propriedades reológicas e de desempenho de ligantes extraídos e recuperados de RAPs;
- c) Investigar diferentes definições de falha, critérios de ruptura e equações de previsão de vida de fadiga para definir quais são sensíveis ao envelhecimento e ao rejuvenescimento;
- d) Comparar os parâmetros de dosagem do agente rejuvenescedor com base no fenômeno de fadiga com os demais parâmetros oriundos de testes convencionais, linear viscoelásticos (LVE) e de deformação permanente.

A nível de mistura asfáltica, os objetivos específicos são:

- e) Avaliar a reologia, a deformação permanente e a fadiga de misturas 100% RAP com diferentes concentrações de agente rejuvenescedor e combinação de agente rejuvenescedor e otimização do teor final por ligante modificado por polímero;
- f) Analisar a fadiga destas misturas por meio diferentes critérios de ruptura e simulações no FlexPAVE™, a fim de definir quais são sensíveis em captar o envelhecimento e o rejuvenescimento;
- g) A partir da comparação entre resultados de fadiga oriundos do LAS teste e os danos obtidos no FlexPAVE™, definir e validar os parâmetros para seleção e dosagem do agente rejuvenescedor com base no fenômeno de fadiga.

1.2 ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está estruturado em 6 capítulos temáticos, conforme descrito a seguir:

- a) Capítulo 2: Apresenta uma revisão bibliográfica na qual são revistos os principais tópicos relacionados ao tema proposto, sendo subdividido em três grandes seções. A primeira seção aborda os ligantes asfálticos, com sua definição, origem, composição química e os efeitos do envelhecimento e rejuvenescimento nas

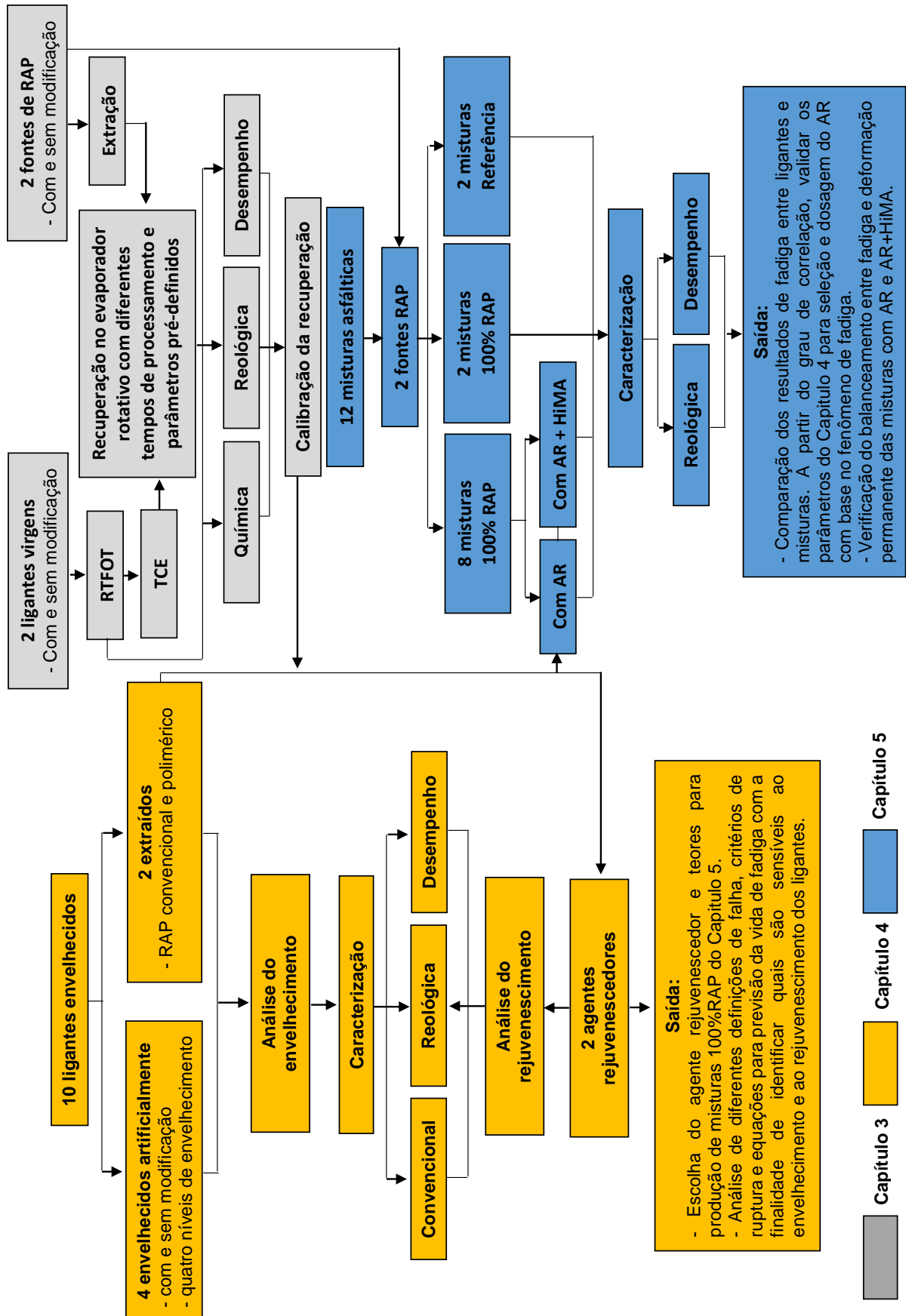
propriedades químicas, convencionais, reológicas e de desempenho. A segunda seção disserta sobre os *Reclaimed Asphalt Pavements*, com as práticas atuais para projetos, as propriedades (DoA e DaAv) e fenômenos (DoB), os agentes rejuvenescedores, e o comportamento mecânico de misturas recicladas e misturas 100% RAP. Por fim, a última seção aborda a correlação entre as propriedades de fadiga de ligantes e misturas asfálticas.

Nos capítulos 3, 4 e 5 estão os procedimentos experimentais (resumidos na Figura 1), as análises e as discussões dos resultados que respondem aos objetivos propostos.

- b) Capítulo 3: Dedicado à implementação e à calibração do processo de recuperação do ligante no evaporador rotativo por meio da análise reológica e de desempenho dos materiais, com a finalidade de obter a correta caracterização dos ligantes recuperados de RAP.
- c) Capítulo 4: Analisa os efeitos do envelhecimento e do rejuvenescimento nas propriedades reológicas e de desempenho em ligantes asfálticos. Diferentes abordagens no teste LAS quanto as definições de falhas, critérios de ruptura e equações de previsão da vida de fadiga foram investigadas, a fim de selecionar quais identificam os fenômenos do envelhecimento e do rejuvenescimento;
- d) Capítulo 5: Avalia as propriedades de misturas 100% RAP com diferentes concentrações de agente rejuvenescedor e combinação de agente rejuvenescedor + otimização por ligante altamente modificado, todas produzidas na temperatura de máxima ativação. O modelo S-VECD e os envoltórios de ruptura do G^R e D^R foram utilizados para interpretação dos resultados experimentais, juntamente com simulações no FlexPAVE™. Por fim, são realizadas comparações numéricas entre os resultados de fadiga entre ligantes e misturas a fim de identificar e validar os parâmetros de referência para seleção e dosagem dos agentes rejuvenescedores, contemplando o objetivo geral da pesquisa;
- e) Capítulo 6: As considerações finais e as principais conclusões a partir dos três capítulos temáticos são apresentadas, juntamente com as sugestões de trabalhos futuros.

Por fim, são apresentadas as referências que deram sustentação teórica e experimental ao trabalho, assim como a lista de Apêndices.

Figura 1 - Programa experimental dos Capítulos 3, 4 e 5.



Capítulo 3

Capítulo 4

Capítulo 5

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são fornecidos os principais elementos teóricos sobre os materiais asfálticos e suas particularidades quanto ao envelhecimento e ao rejuvenescimento, subdividido em três seções. A primeira seção aborda o ligante asfáltico, a segunda o *Reclaimed Asphalt Pavement*, e por fim, a última seção trata sobre a correlação entre as propriedades de fadiga de ligantes e misturas.

2.1. LIGANTE ASFÁLTICO

O ligante asfáltico é um material com comportamento reológico que depende das condições de temperatura e das frequências de solicitação, sendo o responsável por conferir essas características às misturas asfálticas (OLARD e DI BENEDETTO, 2003). Em nível macroscópico, é considerado um material contínuo, homogêneo e isotrópico, sendo que seu comportamento é dependente de três fatores: temperatura, amplitude de deformação e frequência de carregamento (MANGIAFICO, 2014). Portanto, a compreensão de suas propriedades é fundamental para prever, modelar e melhorar o desempenho das misturas asfálticas.

O ligante presente no concreto asfáltico passa por um processo de envelhecimento ao longo da vida útil do pavimento, resultando em alterações químicas, reológicas e de desempenho. O uso de aditivos ou agentes rejuvenescedores busca restaurar os componentes que o ligante perde com o envelhecimento.

Assim, essa seção apresenta a definição, composição química e a estrutura coloidal dos ligantes na condição virgem. Por fim, os efeitos do envelhecimento e do rejuvenescimento nas propriedades químicas, convencionais, reológicas e de desempenho do material são relatados.

2.1.1. Definição, composição química e estrutura coloidal

O asfalto é um dos materiais de construção mais antigos, sendo definido pela British Standards 3690, em 1990, como um líquido viscoso, ou sólido, consistindo de hidrocarbonetos e seus derivados, solúvel em dissulfeto de carbono, não volátil, que amolece gradualmente com o aumento da temperatura, de cor preta ou marrom, com propriedades impermeabilizantes e adesivas. Esta definição traz as três principais propriedades do material: sua composição química, viscoelasticidade e a dependência da temperatura.

O ligante é formado por uma mistura de compostos orgânicos constituídos por derivados lineares alifáticos (carbonos lineares saturados), cicloalifáticos (estruturas de anéis compostas por carbonos saturados ou estruturas cíclicas com baixo número de grupos insaturados) e aromáticos. A interação e o efeito de diluição entre as moléculas refletem nas propriedades do ligante. Assim, a constituição (composição química) e a estrutura (arranjo físico) impactam no comportamento reológico do material (HUNTER, SELF e READ, 2015).

O material é principalmente composto por carbono (82-88%), hidrogênio (8-11%), enxofre (0-6%), oxigênio (0-1,5%), nitrogênio (0-1%) e outros metais pesados como níquel (20 mg/kg a 200 mg/kg), vanádio (10 mg/kg a 2000 mg/kg), ferro, cálcio e magnésio. Embora sua composição elementar seja importante, ela não fornece informações sobre de que forma sua estrutura molecular afeta suas propriedades físicas, mecânicas e a reatividade química (WHITEOAK e READ, 2003; EL BEZE, 2008).

Tradicionalmente, os ligantes são divididos em dois grandes grupos químicos chamados de asfaltenos e maltenos, sendo este último subdividido em saturados, aromáticos e resinas. Esta separação isola os tipos moleculares em termos de solubilidade (funcionalidade química e tamanho molecular) (DI BENEDETTO e CORTÉ, 2005). O ensaio SARA (Saturados, Aromáticos, Resinas e Asfaltenos) separa os componentes do ligante (Figura 2) conforme a solubilidade.

Figura 2 - Fracionamento SARA do ligante

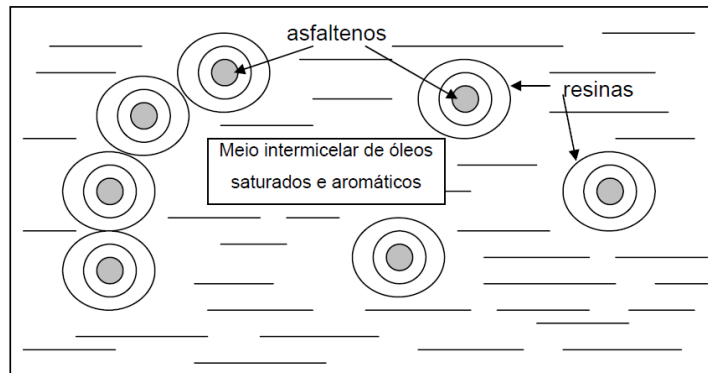


Fonte: Adaptado de Carrión (2017)

Após a separação destes componentes, é necessário entender a estrutura deste material. O modelo de Yen de 1960 (YEN, 1972) é o mais aceito para representar as propriedades físicas do ligante. Consiste em uma mistura heterogênea em um meio coloidal complexo, no qual as micelas de asfaltenos de alto peso molecular são dispersas ou dissolvidas em meio oleoso de baixo peso molecular (maltenos).

Assim, as resinas funcionam como agentes peptizadores e se adsorvem nos asfaltenos a fim de permitir a dispersão destas no meio de óleos saturados e aromáticos, conforme Figura 3. Os asfaltenos e as resinas são responsáveis pelas propriedades viscoelásticas do ligante na temperatura ambiente (WHITEOAK e READ, 2003).

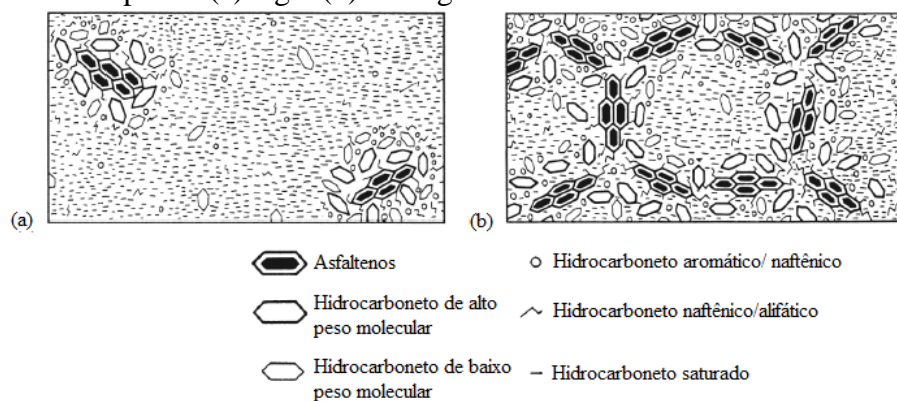
Figura 3 - Modelo de estrutura coloidal segundo Yen



Fonte: Silva (2005)

O grau de dispersão das micelas define a estrutura em dois tipos. Se a dispersão for grande será uma estrutura Sol (líquido newtoniano). Para uma baixa dispersão, no qual demonstra forte tendência de aglomeração, será uma estrutura Gel (líquido não newtoniano), ambos ilustrados na Figura 4.

Figura 4 - Esquema do tipo sol (a) e gel (b) dos ligantes



Fonte: Adaptado de Whiteoak e Read (2003)

O envelhecimento diminui a estabilidade coloidal dos ligantes principalmente devido à redução da quantidade de maltenos com aumento e aglomeração dos asfaltenos, o que associa o material ao estado gel e o torna quebradiço.

Os componentes e a estrutura coloidal são importantes para o entendimento das propriedades convencionais, reológicas, de envelhecimento e desempenho do ligante, inclusive para correlacionar estas variáveis. Corbett (1969) relaciona as propriedades de rigidez e resistência dos ligantes aos asfaltenos e resinas, enquanto as propriedades viscosas e plásticas aos aromáticos e saturados. Lin et al. (1996) perceberam que as propriedades reológicas dependem fortemente do teor de asfaltenos ao notar que a uma temperatura constante a viscosidade aumenta à medida que a concentração dos asfaltenos misturados nos maltenos parentais é aumentada.

Assim, na seção seguinte, os impactos do envelhecimento e rejuvenescimento nas propriedades dos ligantes asfálticos são apresentados.

2.1.2. Envelhecimento e Rejuvenescimento de ligantes

O ligante asfáltico passa por diferentes processos de envelhecimento, que inicia no armazenamento, produção, transporte e compactação (envelhecimento de curto prazo), até ao longo de sua vida em serviço (envelhecimento de longo prazo). O envelhecimento de curto prazo é simulado em laboratório com o *Rolling Thin Film Oven Test* (RTFOT) segundo a AASHTO T 240 (2013), enquanto que o envelhecimento de longo prazo é simulado com o *Pressure Aging Vessel* (PAV) conforme a AASHTO R 28 (2016) ou ASTM D 6521 (2019).

Diversos fatores e mecanismos promovem o envelhecimento do ligante, resultando em alterações químicas e reológicas que tornam o material mais rígido e quebradiço. Os agentes rejuvenescedores são soluções para recuperar as propriedades perdidas pelo material em misturas recicladas com alto teor de RAP (maior de 25%) (ZAUMANIS, MALLICK e FRANK, 2014; ARAMBULA et al., 2018).

A seguir serão apresentados os fatores e os mecanismos de envelhecimento, e a influência do envelhecimento e rejuvenescimento nas propriedades químicas, convencionais, reológicas e de desempenho do ligante.

2.1.2.1. Fatores e mecanismos de envelhecimento

Três fatores são os responsáveis pelo envelhecimento do ligante: ambientais, o próprio ligante e o tráfego de veículos. Os fatores ambientais são atribuídos à luz solar, que induz as reações de foto-oxidação com as resinas se polimerizando em asfaltenos; a temperatura, que acelera a difusão do oxigênio, fornece parte da energia de ativação das reações de oxidação e

evapora componentes voláteis; a água que favorece a degradação do material; e por fim ao oxigênio, que penetra por difusão e a outros poluentes externos como o ozônio. Já os fatores relacionados ao ligante são a espessura do filme em torno do agregado, a sua natureza e a reatividade com os gases. Por fim, os fatores relacionados ao tráfego são decorrentes do desgaste mecânico (EL BEZE, 2008).

Os mecanismos de envelhecimento são separados em curto e longo prazo. No curto prazo ocorre a oxidação da película do ligante em contato com o oxigênio do ar, a volatilização (evaporação de voláteis com baixo peso molecular devido à temperatura) e a absorção de constituintes pelos agregados.

Os mecanismos de longo prazo, que dependem dos vazios do concreto asfáltico e da superfície exposta, são (EL BEZE, 2008; CRAVO, 2016):

- a) A oxidação (maior responsável pelo endurecimento irreversível e que varia em função das características do ligante e da temperatura);
- b) A polimerização (combinação de moléculas menores para formar compostos de massa molar maior, resultando em um endurecimento progressivo);
- c) A foto-oxidação para camadas superficiais (no qual as resinas se polimerizam em asfaltenos);
- d) A sinerese (separa os líquidos menos viscosos dos mais viscosos, com remoção dos constituintes oleosos, resinas ou asfaltenos devido à absorção por agregados porosos);

Esses fatores e mecanismos de envelhecimento, assim como a tentativa de reversão deste processo por meio de aditivos, promovem as alterações no material descritas na sequência.

2.1.2.2. *Influência nas propriedades químicas*

Conforme apresentado anteriormente, o modelo coloidal do ligante é formado por uma fase de asfaltenos insolúveis e altamente polar dispersos em uma fase solúvel de maltenos (saturados, aromáticos e resinas). Os asfaltenos formam grupos, porém, não criam uma rede contínua (denominada *clusters*), sendo o equilíbrio entre as duas fases relacionado às propriedades físicas e reológicas. Com o envelhecimento, os óleos mais leves da fase maltênica volatilizam e parte do meio é transformada em asfaltenos devido ao processo de oxidação (PETERSEN, 2009; QIN et al., 2014; CRAVO, 2016). Portanto, a hipótese para a origem do

processo de envelhecimento se situa nos maltenos, que aumenta a instabilidade coloidal, favorece a formação de micelas e a aglomeração dos asfaltenos, dando ao ligante um comportamento gel (CRAVO, 2016).

O tamanho dos aglomerados de asfaltenos e sua dispersão na fase maltênica afetam a reologia do ligante, com aumento da rigidez e da fragilidade do material, reduzindo sua capacidade de deformar sem quebrar (ductilidade). O fracionamento SARA é uma importante ferramenta para quantificar os componentes quando submetido ao envelhecimento e rejuvenescimento. A seguir estão detalhadas as alterações nos componentes de acordo com a literatura.

Chipperfield et al. (1970) investigaram a composição química de ligantes extraídos do topo (3mm) de amostras provenientes de pistas. O teor de asfaltenos aumentou com a usinagem e gradualmente com o tempo. Já o teor de resina e aromáticos diminuíram.

Siddiqui e Ali (1999) estudaram o efeito do envelhecimento em ligantes arábicos no RTFOT durante 85 e 340 minutos. Foi encontrado um aumento de asfaltenos e resinas, e uma redução de aromáticos, com os saturados permanecendo constantes. Resultado semelhante foi encontrado por Dehouche, Mustapha e Mokhtar (2012) com o envelhecimento no RTFOT de um ligante 35/50, e dois ligantes Asfálticos Modificados com Polímeros (AMP) EVA e SBS. Sa-da-Costa, Diogo e Farcas (2016), ao estudar o ciclo de vida do ligante 35/50, constatou um aumento de asfaltenos e grupos funcionais contendo oxigênio com o envelhecimento no PAV por 25 e 90 horas à 100°C.

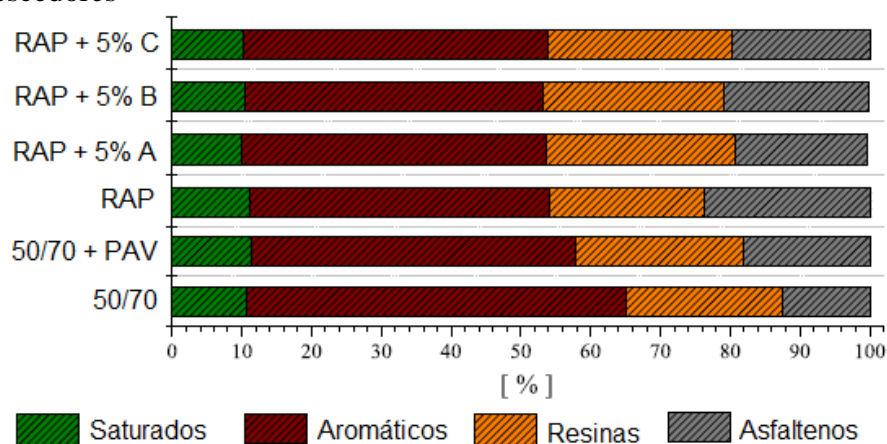
Quando se incorpora os agentes rejuvenescedores em misturas recicladas, objetiva-se restaurar o balanceamento das frações químicas, com reposição dos maltenos e uma dissolução dos aglomerados de asfaltenos, que são os responsáveis pela maior rigidez do material. Os agentes rejuvenescedores serão tratados com maiores detalhes na seção 2.2.3.

Yu et al. (2014) determinaram o fracionamento SARA de dois ligantes, PG 58-28 e PG 58-10, na condição virgem, envelhecida (RTFOT+PAV) e rejuvenescida por um óleo aromático. O envelhecimento alterou significativamente os componentes de ambos os ligantes, com a fração aromática reduzindo de 28% para 10%, os asfaltenos aumentaram em cerca de 12%, e sem grande variação nos saturados e nas resinas. O agente rejuvenescedor introduziu mais aromáticos e saturados, com a redução das resinas e asfaltenos, no entanto, não foi suficiente para reestabelecer os níveis da condição virgem.

Cavalli et al. (2018) investigaram os componentes de um ligante extraído de RAP e misturado com três agentes rejuvenescedores comerciais de base biológica (A, B e C), além de um ligante 50/70 na condição virgem e envelhecido no PAV. Os resultados (Figura 5) exibiram

um maior teor de asfaltenos no ligante RAP e 50/70 + PAV em comparação ao ligante virgem. Os agentes rejuvenescedores não reestabeleceram a frações maltênicas em nível similar ao fracionamento do ligante virgem.

Figura 5 - Fracionamento SARA de ligante virgem, ligante RAP e ligante RAP com diferentes agentes rejuvenescedores



Fonte: Adaptado de Cavalli et al. (2018)

Kuang et al. (2018) avaliaram os componentes SARA de um ligante (penetração de 70 dmm) na condição virgem, envelhecida (curto e longo prazo) e rejuvenescida. Osmari et al. (2017) estudaram a incorporação de 3 rejuvenescedores (um comercial a base de petróleo, um resíduo de óleo de cozinha e um óleo de mamona) em dois ligantes (PG 64-22S e PG 70-22S) envelhecidos no RTFOT + PAV. Em ambos os trabalhos, os agentes rejuvenescedores aumentaram a quantidade de aromáticos e reduziram a quantidade de asfaltenos, no entanto não reestabeleceram a condição virgem.

Os estudos anteriores indicam que os agentes rejuvenescedores utilizados em cada pesquisa não restauraram completamente os componentes químicos, ou seja, não convertem asfaltenos em maltenos, e sim reduzem a concentração e quebram os aglomerados de asfaltenos dentro da matriz química do ligante asfáltico, resultando na diminuição da rigidez. Assim, esses materiais são mais redutores de viscosidade do que propriamente agentes rejuvenescedores.

2.1.2.3. *Influência nas propriedades convencionais*

O envelhecimento também impacta nas propriedades convencionais do ligante, resultando na diminuição da penetração, aumento do ponto de amolecimento e da viscosidade do material, como constatado em Zhang, Yu e Wu (2010), Ali, Mashaan e Karim (2013), Nayak

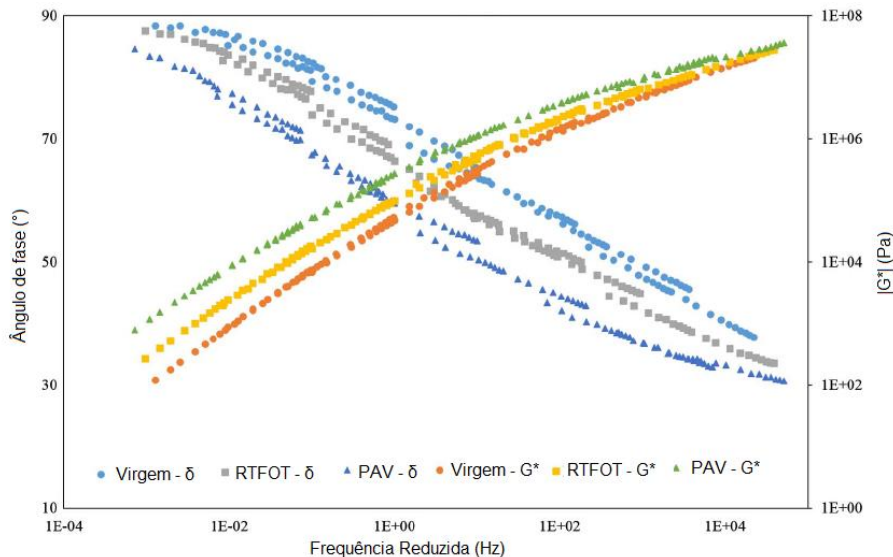
e Sahoo, (2017), Hofko et al. (2017), Sirin et al. (2017), Yang et al. (2018) e Li et al. (2019). Essas propriedades físicas foram restauradas pela incorporação dos agentes rejuvenescedores em Nahar et al. (2014), Zaumanis, Mallick e Frank (2014), Ongel e Hugener (2015), Osmari et al. (2017), Carrion (2017), Pires (2018), Girimath e Singh (2019).

2.1.2.4. Influência nas propriedades reológicas

Em relação às propriedades reológicas, que descreve o comportamento do material em diferentes temperaturas e frequências de carregamento, o envelhecimento do ligante resulta em um aumento da rigidez e uma redução do ângulo de fase, muito em virtude das reorganizações moleculares das frações constituintes. Essas alterações reológicas foram encontradas em diversos estudos descritos a seguir.

Naderi, Nejad e Khodai (2018) verificaram o efeito do envelhecimento de curto e longo prazo de um ligante virgem com penetração 67 dmm e PG 64-22. Os resultados, apresentados na Figura 6, demonstram um aumento da rigidez e redução do ângulo de fase do ligante como efeito do envelhecimento.

Figura 6 - Curvas mestras de módulo complexo e ângulo de fase em diferentes condições de envelhecimento

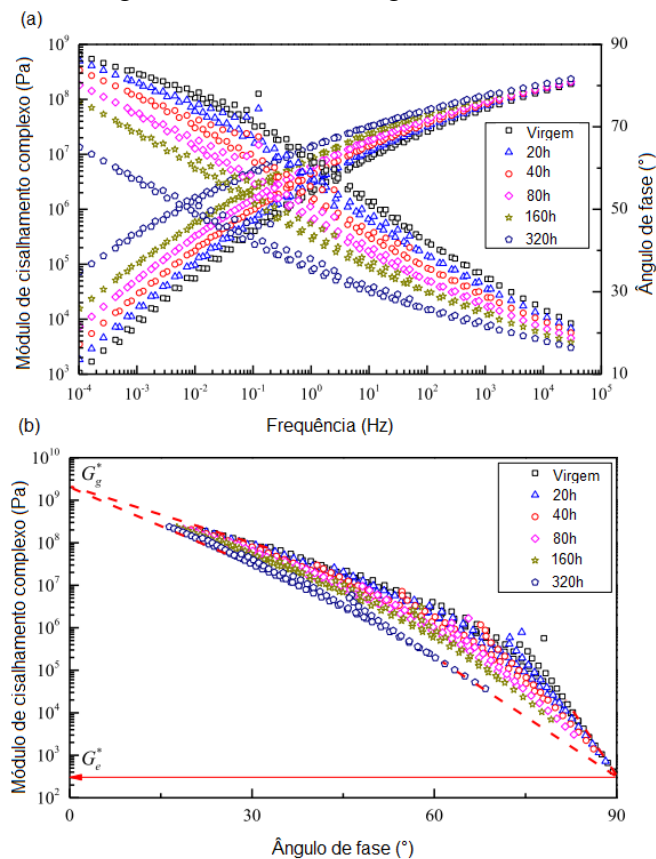


Fonte: Adaptado de Naderi, Nejad e Khodaii (2018)

Jing et al. (2020) avaliaram as propriedades reológicas de um ligante 70/100 dmm na condição virgem e envelhecido no PAV por 20, 40, 80, 160 e 320 horas à 100°C e 1 atm. Os resultados estão apresentados na Figura 7: (a) para as curvas mestras de $|G^*|$ e δ , e em (b) o

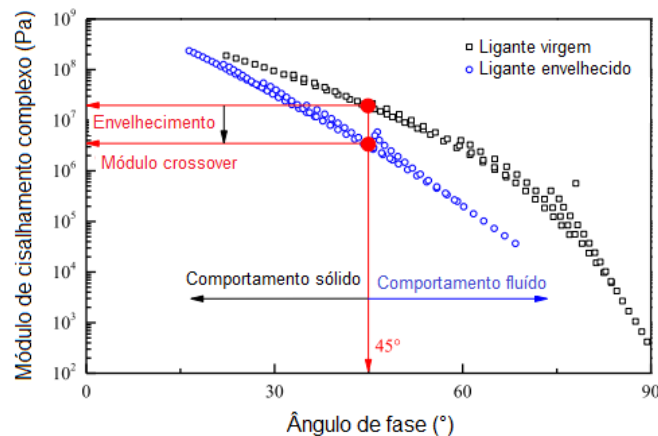
diagrama black. Os autores constataram um aumento na rigidez, diminuição no ângulo de fase e redução da curvatura no diagrama black com o maior tempo de envelhecimento. Além disso, o módulo de *crossover* (Figura 8) indicou um aumento da quantidade de dados experimentais com resposta elástica com o envelhecimento a partir do deslocamento da curva no sentido dos menores valores de ângulo de fase.

Figura 7 - Resultados do ligante 70/100 em diferentes tempos de envelhecimento expressos em: (a) curvas mestras de módulo e ângulo de fase e (b) diagrama black



Fonte: Adaptado de Jing et al. (2020)

Figura 8 - Esquema do módulo de *crossover*

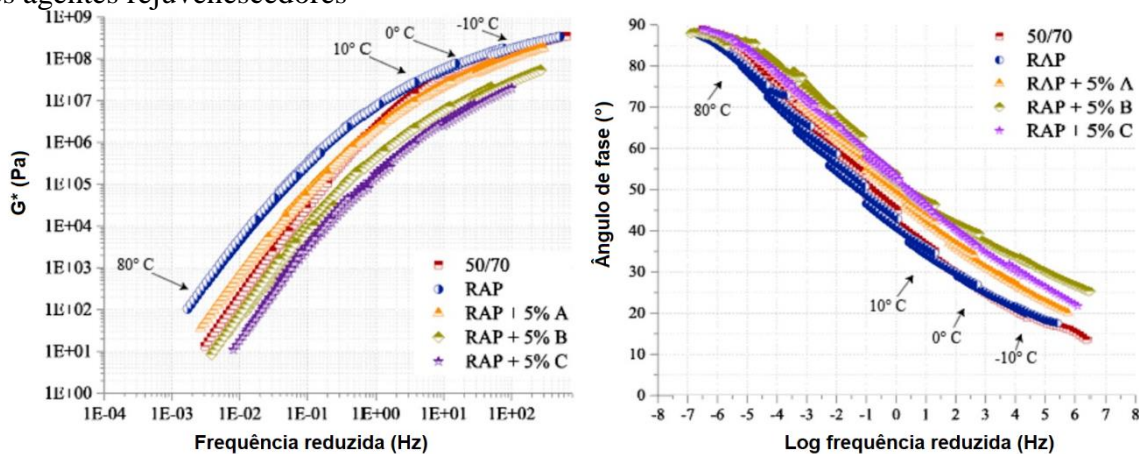


Fonte: Adaptado de Jing et al. (2020)

Por fim, resultados semelhantes foram encontrados em Liu et al. (2008), Hofko et al. (2017), Mazzoni, Bocci e Canestrari (2018), Pires (2018), Yang et al. (2018) e Berkowitz et al. (2019).

A utilização do agente rejuvenescedor busca a redução da rigidez e o aumento da componente viscosa. Cavalli et al. (2018) investigaram a reologia de um ligante extraído de RAP com incorporação de três agentes rejuvenescedores (A, B e C), todos na dosagem de 5%. As curvas mestras de $|G^*|$ e δ estão apresentadas na Figura 9. De modo geral, os agentes rejuvenescedores no teor de 5% tornaram o comportamento do ligante RAP menos rígido e mais viscoso em comparação com um ligante virgem 50/70.

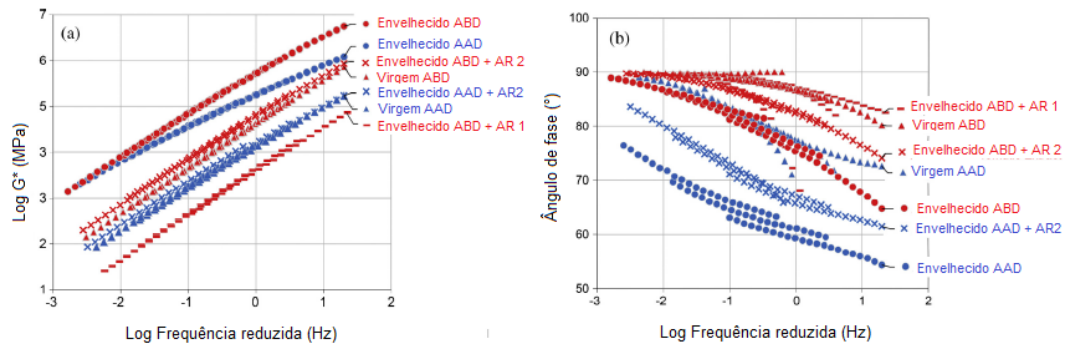
Figura 9 - Caracterização viscoelástica de ligante virgem, extraído de RAP e ligante RAP com três agentes rejuvenescedores



Fonte: Cavalli et al. (2018)

Yu et al. (2014) caracterizaram reologicamente o efeito de dois agentes rejuvenescedores (resíduo de óleo vegetal (AR 1) e um extrato aromático (AR 2)) em dois ligantes asfálticos (AAD com PG 58-28 e ABD com PG 58-10) envelhecidos no RTFOT e PAV, conforme Figura 10. Nota-se que ambos os ligantes aumentaram a rigidez e diminuíram o ângulo de fase com o envelhecimento, e a adição dos agentes rejuvenescedores restauraram os componentes a níveis próximos da condição virgem.

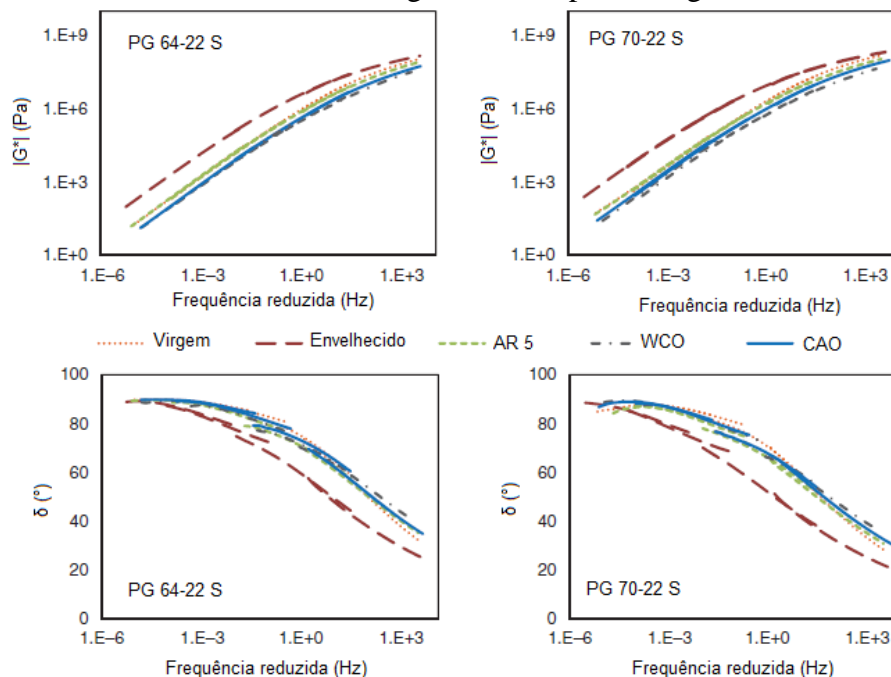
Figura 10 - Curvas mestras de módulo complexo (a) e ângulo de fase (b) para ligantes virgens, envelhecidos e rejuvenescidos



Fonte: Adaptado de Yu et al. (2014)

No trabalho de Osmari et al. (2017), os três agentes rejuvenescedores (AR5, WCO e CAO) restauraram a rigidez e os ângulos de fase dos ligantes envelhecidos a nível de ligante virgem, conforme Figura 11.

Figura 11 - Curvas mestras de módulo e ângulo de fase para os ligantes PG 64-22S e 70-22S



Fonte: Adaptado de Osmari et al. (2017)

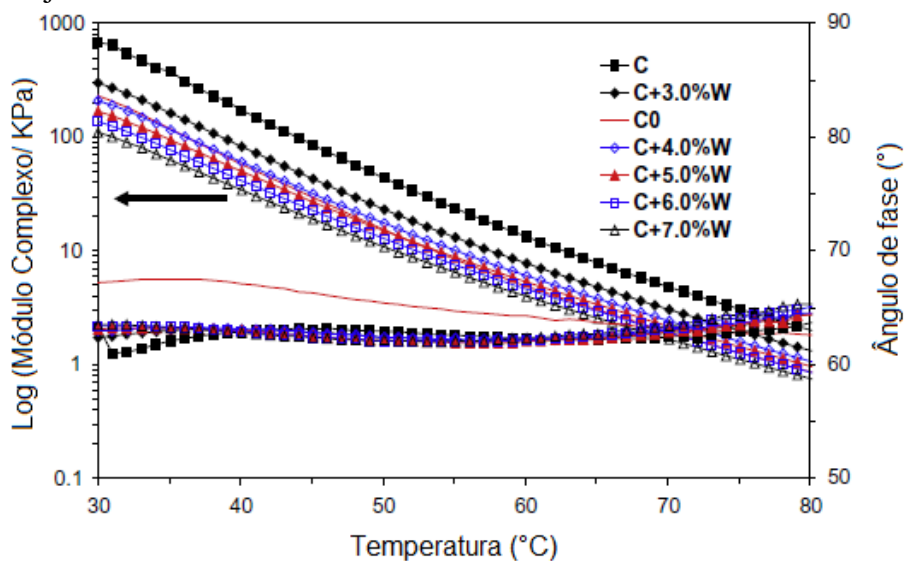
Resultados semelhantes foram encontrados em Mogawer et al. (2013), Im, Karki e Zhou (2016), Mazzoni, Bocci e Canestrari (2018), Tauste et al. (2019).

Considerando ligantes com modificação, o processo de envelhecimento e rejuvenescimento pode não seguir as tendências demonstradas anteriormente. O envelhecimento não apenas resulta na oxidação e a na polimerização do ligante base, mas

também há degradação oxidativa do polímero e da cadeia polimérica, que difere do envelhecimento do ligante base (XU et al., 2017). Algumas pesquisas reportaram que o rejuvenescimento do ligante SMB (*Styrene-butadiene copolymer Modified Bitumen*) pode ser atingido com a inserção de ligante virgem SBM e/ou por óleos ricos em aromáticos (CHEN et al., 2014; ZHU et al, 2017 e QIU et al., 2018).

Chen et al. (2014) investigaram física, química e reologicamente as propriedades de três ligantes, sendo um SMB rejuvenescido por óleo vegetal. A Figura 12 exhibe a caracterização LVE do ligante SBM, na condição virgem (C0), envelhecida (RTFOT + PAV, denominado C) e rejuvenescida (3%, 4%, 5%, 6% e 7%). Os autores identificaram que o módulo complexo foi restaurado à condição virgem com 4%. No entanto, o ângulo de fase, que reduziu com o envelhecimento, foi pouco influenciado com a incorporação do material.

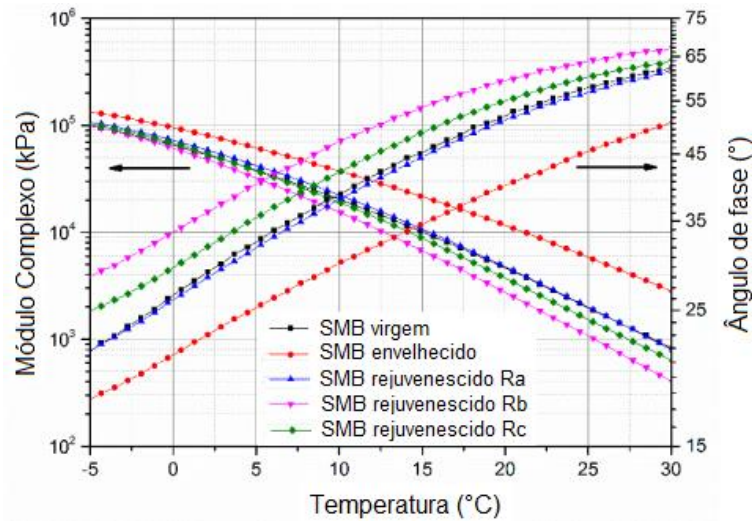
Figura 12 - Log $|G^*|$ e ângulo de fase versus temperatura para o ligante SMB com diferentes teores de agente rejuvenecedor



Fonte: Adaptado de Chen et al. (2014)

Li et al. (2019) analisaram as propriedades físicas e reológicas de um ligante SMB envelhecido (Thin Film Oven Test - TFOT + PAV) e rejuvenescido por três materiais (Ra, Rb e Rc), sendo os resultados mostrados na Figura 13. Os autores identificaram que o módulo complexo aumentou e o ângulo de fase diminuiu com o envelhecimento do SMB virgem. Com o rejuvenescimento, o módulo complexo diminuiu a nível original e mais baixo que o ligante virgem, enquanto que o ângulo de fase ficou próximo e superior à referência.

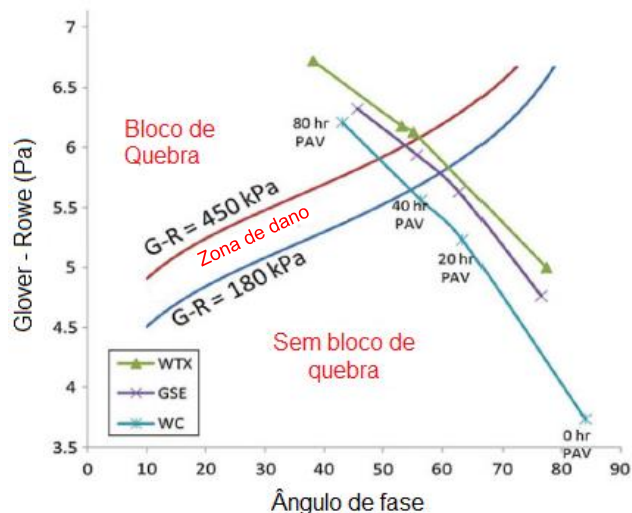
Figura 13 - Efeito do envelhecimento e rejuvenescimento no módulo complexo e ângulo de fase do ligante SMB



Fonte: Adaptado de Li et al. (2019)

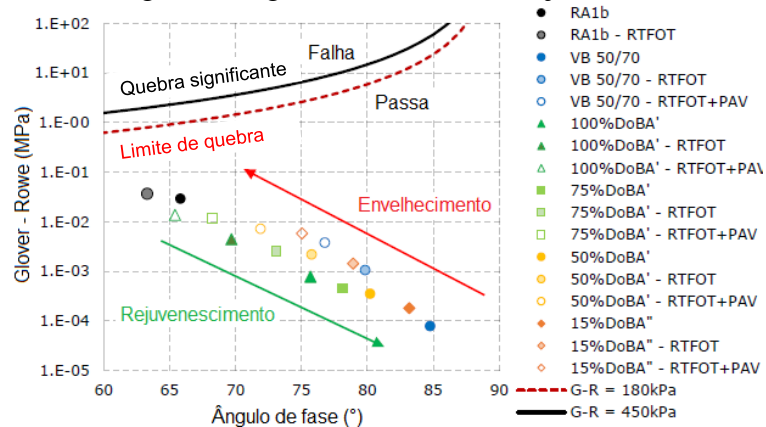
Alguns parâmetros que indicam o envelhecimento e o rejuvenescimento podem ser extraídos dos resultados de caracterização reológica do ligante, que serão tratadas com maiores detalhes na seção 4.5.2. O primeiro parâmetro é o Glover-Rowe (G-R), que combina o módulo dinâmico e o ângulo de fase a 15°C e 0,005 rad/s no diagrama Black. A Figura 14 demonstra que o G-R caminha em direção aos limites de quebra (180 kPa) e de falha (450 kPa, atualmente como 600 kPa) com o envelhecimento de três ligantes em 20, 40 e 80 horas no PAV. Com a utilização do agente rejuvenescedor, Pires (2018) encontrou o processo inverso ao envelhecimento conforme a Figura 15. O RA1b é um ligante extraído de RAP e VB 50/70 é um ligante virgem.

Figura 14 - Avaliação do parâmetro G-R de três ligantes com o envelhecimento



Fonte: Adaptado de Rowe et al. (2016)

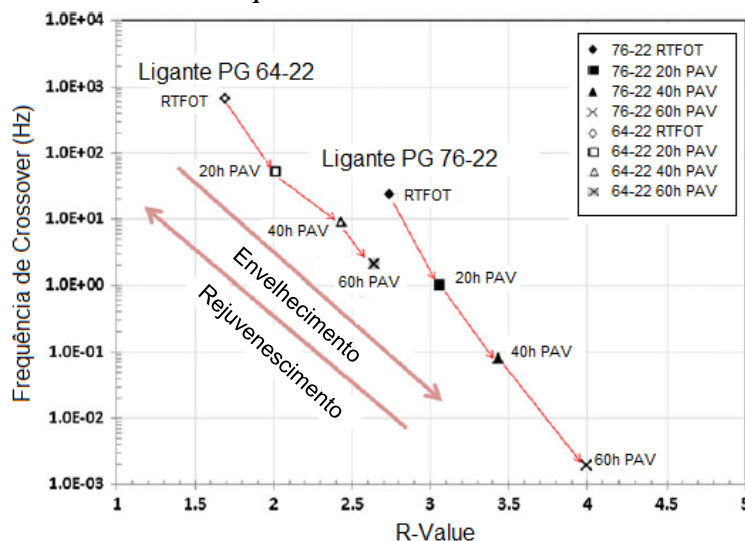
Figura 15 - Parâmetro G-R de ligantes virgem, envelhecido e rejuvenescido



Fonte: Adaptado de Pires (2018)

Outros dois parâmetros são o *Rheological Index* (R-value) e o *Crossover Frequency* (ω), que também estão abordados na seção 4.5.2. O R-value é um indicador extraído da curva mestra de $|G^*|$ e está relacionado ao formato da curva principal: maiores valores de R-value resultam em curvas mestras com menor concavidade e se interliga ao envelhecimento. Já a frequência de crossover diminui com o aumento do envelhecimento. Essas tendências são observadas na Figura 16, de Rowe et al. (2016), que avaliou o R-value versus frequência de crossover de dois ligantes com PG 64-22 e 76-22, submetidos ao envelhecimento no RTFOT e no PAV por 20, 40 e 60 horas.

Figura 16 - Mudanças no R-value vs frequência crossover com o envelhecimento

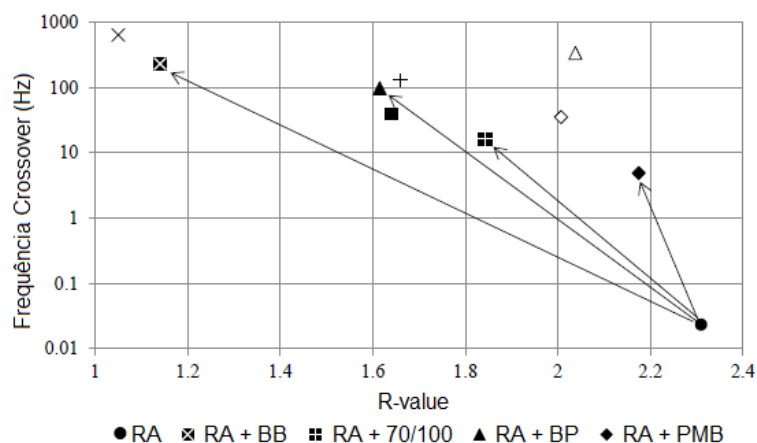


Fonte: Adaptado de Rowe et al. (2016)

Estudo conduzido por Carrion (2017) apresenta o caminho inverso devido ao efeito do agente rejuvenescedor. A autora misturou um ligante RAP com biobinder (RA+BB), com

ligante 70/100 de penetração (RA + 70/100), com Biophalt® (RA+BP) e com um ligante modificado por polímero SBS (RA+PMB). A Figura 17 mostra que com a adição desses materiais, a frequência crossover aumenta e o R-value diminui.

Figura 17 - Efeito do rejuvenescimento de ligante RAP por diferentes materiais no gráfico frequência crossover versus R-Value



Fonte: Adaptado de Carrion (2017)

Portanto, observa-se que o agente rejuvenescedor tem potencialidade para recuperar as propriedades LVE dos ligantes envelhecidos, com redução da rigidez e aumento do ângulo de fase a níveis de um material virgem, também corroboradas a partir dos parâmetros reológicos extraídos.

2.1.2.5. Influência nas propriedades de desempenho

A resistência à deformação permanente de ligantes são comumente avaliadas ou correlacionadas com três principais parâmetros: a relação $|G^*|/\sin \delta$ proveniente do teste de varredura de frequência e temperatura, a compliância não-recuperável (Jnr) obtida do teste *Multiple Stress Creep and Recovery* (MSCR), e o *Performance Grade High* (PGH). Os dois últimos parâmetros fazem parte da especificação Superpave AASHTO M 332 (2019).

O envelhecimento, que promove o enrijecimento do ligante, tende a aumentar a tolerância do material ao dano por deformação permanente, resultando em um aumento no PGH e redução no valor de Jnr, como apresentado a seguir.

Sirin et al. (2017) investigaram o efeito do envelhecimento nas propriedades do ligante a partir da extração em amostras retiradas de 6 seções de teste com idade de 5 anos. As amostras eram cilíndricas de 150 mm de largura e 330 mm de altura, subdividida em 5 fatias do topo a base na seguinte sequência: duas na camada de revestimento (*wearing course*) - W1 (30 mm) e

W2 (30 mm) e três na camada de base (*base layer*) - B1 (90 mm), B2 (90 mm) e B3 (90 mm). Foram extraídas 6 amostras por seção, sendo 3 na trilha de roda (2 interna e 1 externa), e 3 fora da trilha de roda. Os ligantes recuperados de fatias idênticas foram combinados e, avaliados quanto ao PGH e ao teste de MSCR. O PGH está apresentado na Figura 18 e o Jnr na Figura 19, onde w/p e s/p são, respectivamente, interno e externo à trilha de roda. Os resultados das extrações foram comparados aos ligantes originais de cada seção: para as seções 2 a 4 um ligante com penetração de 60/70 (Jnr de 3,07 e PGH de 67,5°C) e a seção 6 com ligante PMB (Jnr de 2,393 e PGH de 80,8°C).

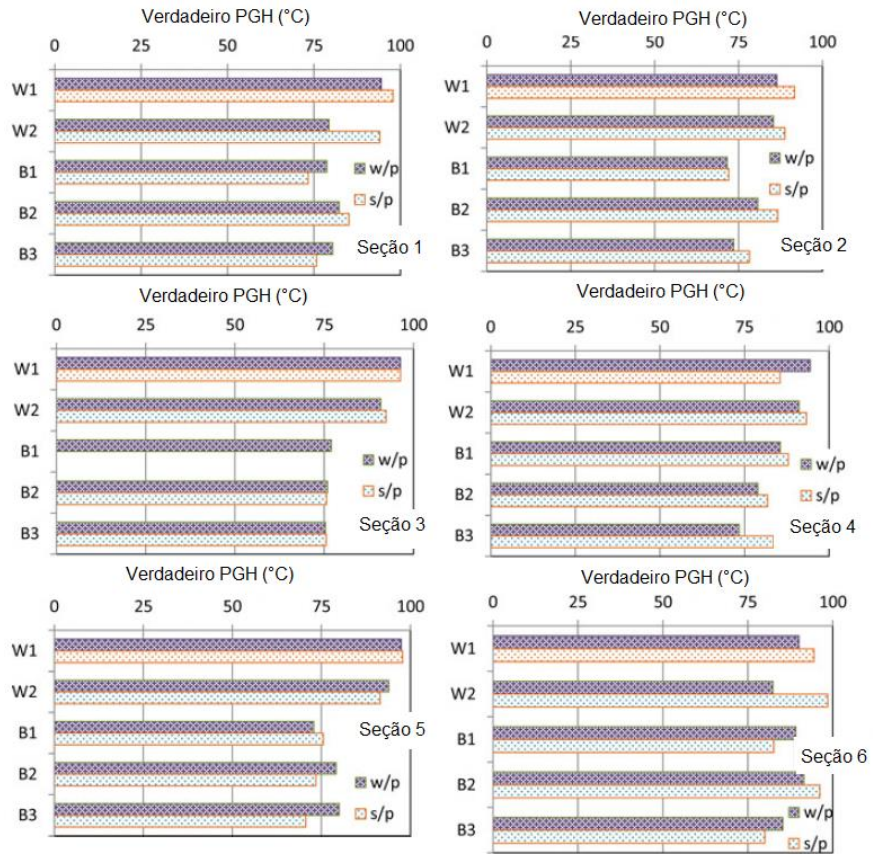
Os autores identificaram um aumento significativo no PGH com o envelhecimento em campo. Como exemplo, o PGH do ligante 60/70 e do PMB aumentaram de 64°C para 96°C e 76°C para 99°C, respectivamente. Além disso, o PGH tende a decrescer de W1 para B3, e ser maior fora da trilha de roda. Os valores de Jnr dos ligantes fora da trilha de roda são inferiores aos da trilha de roda, e também aumentam com a profundidade (W1 para B3).

Essas análises indicam que o envelhecimento foi mais severo externo à trilha de roda e na superfície do revestimento. Com isso, os autores concluíram que o envelhecimento aumenta o PGH e reduz o Jnr dos ligantes, resultando em uma maior rigidez e resistência à deformação permanente.

O trabalho acima foi baseado em ligantes extraídos que foram submetidos a condições reais de campo, tanto a nível de envelhecimento e de tráfego. As análises dos autores reforçam um dos problemas ao se utilizar o material RAP, a variabilidade, visto que para uma mesma mistura, a caracterização variou com a profundidade e ao longo da seção transversal. Muitos outros trabalhos a nível de laboratórios também reforçam os resultados anteriores: que o aumento da rigidez do ligante devido ao envelhecimento (ou a incorporação crescente de material RAP) resulta em aumento no PGH e redução no valor de Jnr (CARRION, 2017; ARAMBULA et al., 2018; PIRES, 2018; SINGH, SHOWKAT e SAWANT, 2019).

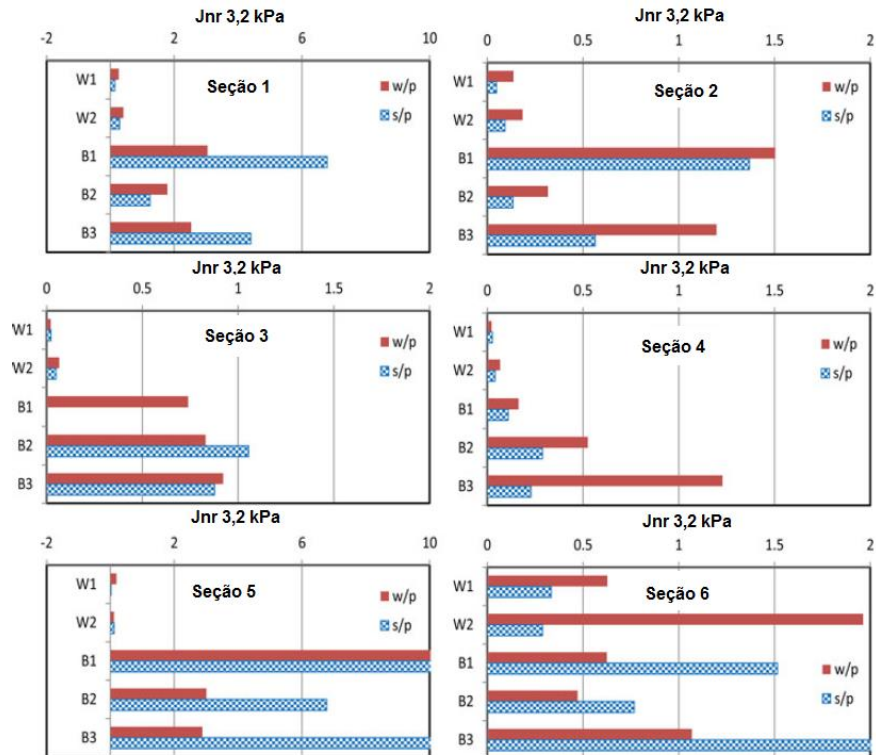
Como apresentado anteriormente, o agente rejuvenescedor reduz a rigidez do ligante, que em termos de deformação permanente, resulta na redução do PGH e aumento de Jnr. Nayak e Sahoo (2017) estudaram um ligante VG 20 (grau de viscosidade) quanto à deformação e recuperação em três níveis de tensão (3, 10 e 50 Pa) nas condições, virgem, envelhecido (RTFTO + PAV) e rejuvenescido (5, 10 e 15% de um óleo vegetal). Os resultados estão apresentados na Figura 20. Em todos os níveis de tensão, o envelhecimento reduziu o valor de Jnr, indicando melhor resistência ao dano. Com a incorporação do agente rejuvenescedor, a resistência à deformação permanente volta ao nível do ligante virgem com um teor entre 5 e 10%.

Figura 18 - Variação do verdadeiro PGH com a espessura do pavimento



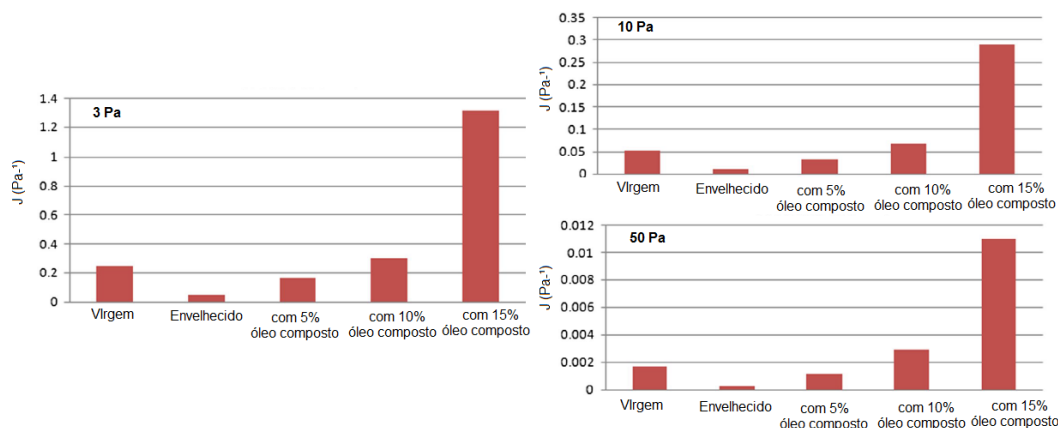
Fonte: Adaptado de Sirin et al. (2017)

Figura 19 - Variação do Jnr a 3,2 kPa com a espessura do pavimento



Fonte: Adaptado de Sirin et al. (2017)

Figura 20 - Valores de compliância a 3, 10 e 50 Pa para o ligante virgem, envelhecido e rejuvenescido



Fonte: Adaptado de Nayak e Sahoo (2017)

Zhou et al. (2018) misturou um ligante recuperado de RAP (10 anos de serviço) com um agente rejuvenescedor nas dosagens de 2%, 4% e 6%. O ligante original era um AMP SBS, com PG 70-22. O PGH reduziu em uma função linear com o teor de AR, indicando segundo os autores, um efeito de amolecimento do ligante RAP. Ao misturar o ligante RAP nas porcentagens de 15%, 30%, 40% e 50% com um ligante AMP SBS de PG 70-22, identificou-se um aumento no PGH e redução no Jnr.

Resultados semelhantes foram encontrados em Yang e Lee (2016), Nabizadeh et al. (2017), Arambula et al. (2018), Menapace et al. (2018) e Girimath e Singh (2019).

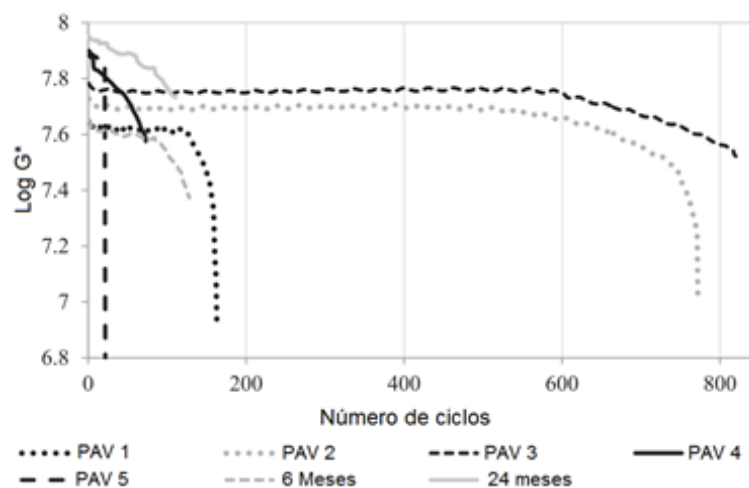
Por fim, a avaliação da tolerância ou a previsão da vida de fadiga dos ligantes é complexa, tanto que na literatura existem diferentes ensaios, definições e critérios de falha para tal objetivo. Esses procedimentos de análise têm apresentado relativo sucesso na caracterização voltada para materiais convencionais. No entanto, quando envolvem a reciclagem, com diferentes níveis de envelhecimento, modificações e a incorporação de aditivos, podem não prever com acurácia o dano por fadiga. A seguir, serão apresentadas pesquisas que envolvem múltiplos materiais, ensaios, definições e critérios de falhas à fadiga que mostram diversas tendências no comportamento do ligante com o envelhecimento e o rejuvenescimento.

Mannan, Islam e Tarefder (2015) compararam a vida de fadiga de mistura (flexão de viga apoiada em quatro pontos) e ligante (*Time Sweep e LAS test*) de materiais asfálticos sem RAP e com 35% RAP, todos com definição de falha baseada na redução de 50% da rigidez. Na análise relacionada à mistura, a incorporação de RAP reduziu a vida de fadiga, no entanto, para o ligante, o oposto foi encontrado. Os autores atribuem a fraca interação entre o agregado RAP e o ligante virgem na mistura reciclada, pois o trincamento por fadiga ocorre principalmente na interface agregado-ligante.

Villegas-Villegas et al. (2018), dentre seus objetivos, estudaram o efeito do envelhecimento, em condições naturais e no PAV, na fadiga de um ligante denominado Costa Rica 2. Cinco níveis de PAV (1 a 5 ciclos) e envelhecimento em condições ambientais por 6 e 24 meses (amostras em moldes antiaderentes com espessura de 1 mm a fim de simular o filme de ligante que reveste o agregado na mistura asfáltica, sob pressão atmosférica de 1200 metros acima do nível do mar e temperatura entre 20 e 27°C) foram testadas. O teste de fadiga foi conduzido no DSR com deformação de 10%, a uma frequência de 10 rad/s e o critério de falha adotado foi a redução de 50% do módulo inicial.

A Figura 21 apresenta os resultados encontrados. A análise química indicou uma maior oxidação nos ligantes envelhecidos no ambiente em comparação ao envelhecimento em PAV. Segundo os autores, a menor severidade do PAV resulta em ligantes mais resistentes à fadiga com relação aos ligantes expostos à condição ambiental. A tolerância ao dano por fadiga aumenta até o terceiro ciclo contínuo de PAV. Nos ciclos 4 e 5, o material torna-se frágil e suporta um número menor de ciclos de carga.

Figura 21 - Comparação dos resultados do teste de fadiga sob deformação controlada para amostras de ligante Costa Rica 2 envelhecidos em múltiplos ciclos de PAV e no ambiente por 6 a 24 meses.



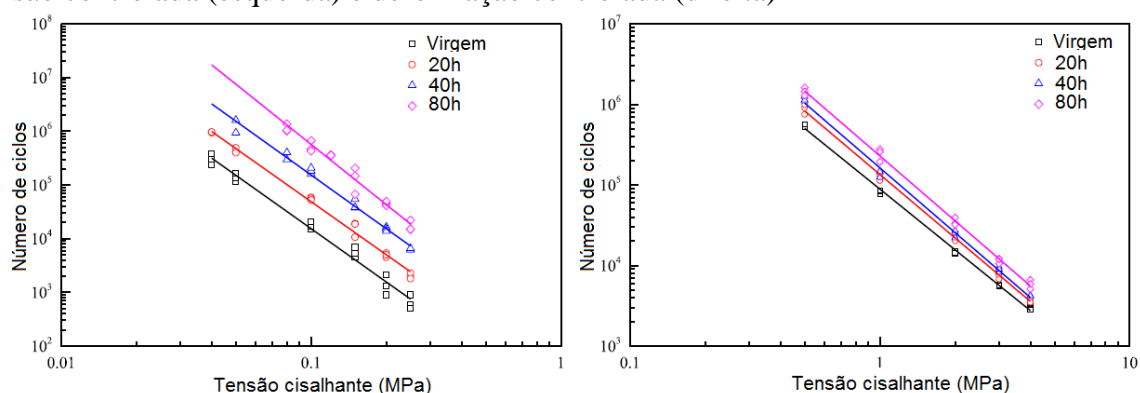
Fonte: Adaptado de Villegas-Villegas et al. (2018)

Para validar os resultados, os autores submeteram outros três ligantes aos mesmos cinco ciclos de PAV (origens na Bolívia, El Salvador e Nicaragua). Nos três materiais, a resistência à fadiga cresceu até o terceiro ciclo, e decresceu no quarto e quinto ciclo, confirmando as tendências anteriores.

Jing et al. (2020) investigaram o efeito do envelhecimento em estufa de um ligante 70/100 (penetração) por 20, 40, e 80h a 100°C na propriedade de fadiga. O ensaio foi conduzido

no DSR com a aplicação de carga dinâmica de cisalhamento a 20°C e 10 Hz em dois modos de controle: controle de tensão (0.04, 0.10, 0.15, 0.20 e 0.25 MPa) e deformação (0.5, 1.0, 2.0, 3.0 e 4.0%). O critério de falha utilizado foi a redução de 50% da rigidez inicial. Os resultados estão apresentados na Figura 22. De maneira conflitante, segundo os autores, a vida a fadiga dos ligantes aumenta com o envelhecimento. Duas possibilidades foram levantadas: além da perda de coesão, o critério de falha adotado pode não ser adequado para a análise dos dados nestas condições, sendo recomendado a busca por novas metodologias de análise.

Figura 22 - Resultados de fadiga dos ligantes em diferentes condições de envelhecimento: modo tensão controlada (esquerda) e deformação controlada (direita)

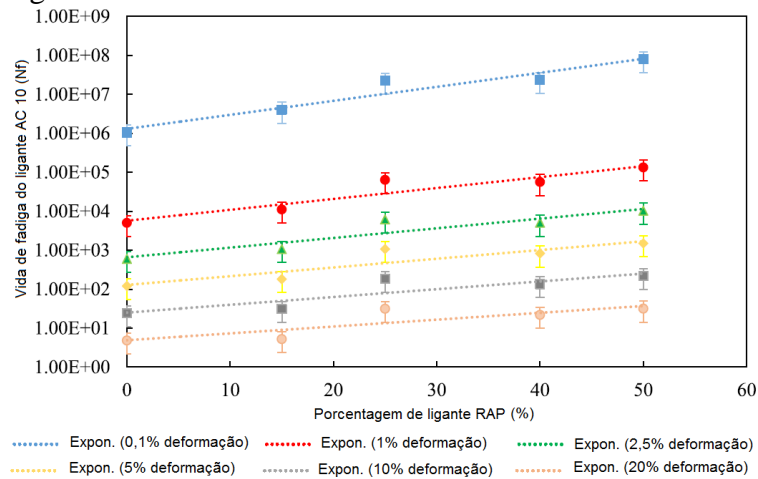


Fonte: Adaptado de Jing (2019)

Singh, Showkat e Sawant (2019) combinaram um ligante RAP com um ligante base (denominado AC 10) nas seguintes porcentagens: 0%, 15%, 25%, 40% e 50%, sendo a fadiga avaliada pelo teste LAS. O critério de falha adotado foi o pico da tensão cisalhante no gráfico com o a deformação cisalhante. Para os níveis de deformação de 0,1% a 20%, o aumento da porcentagem de ligante RAP melhorou a fadiga dos ligantes, conforme Figura 23.

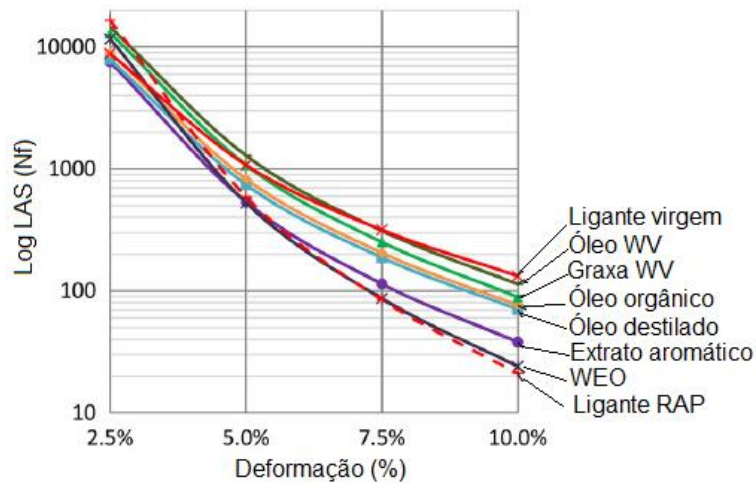
Em relação ao rejuvenescimento, Zaumanis, Mallick e Frank (2014) analisaram o potencial de 6 agentes rejuvenescedores em restaurar a vida de fadiga de um ligante extraído de RAP por meio do teste LAS. A abordagem VECD foi utilizada e o critério de falha adotado é a redução de 35% do $|G^*|_{sen \delta}$ não danificado. Com base nos resultados, Figura 24, constatou-se que em níveis mais baixos de deformação, o ligante RAP apresentou melhor desempenho, porém à medida que a deformação aumenta, seu desempenho cai gradativamente. O óleo e a graxa vegetal (WV) foram os dois agentes rejuvenescedores que melhoraram a resistência à fadiga do ligante RAP, aproximando-o do ligante virgem.

Figura 23 - Nf do ligante AC 10 com diferentes teores de RAP e níveis de deformações



Fonte: Adaptado de Singh, Showkat e Sawant (2019)

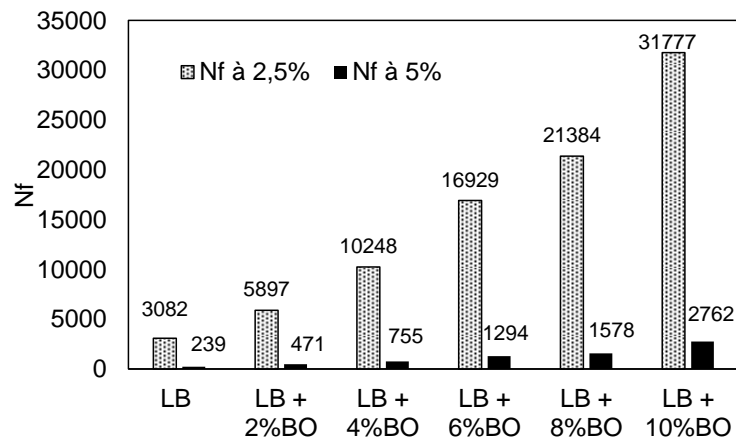
Figura 24 - Resultado do teste LAS



Fonte: Zaumanis, Mallick e Frank (2014)

Girimath e Singh (2019) avaliaram a vida de fadiga de um ligante (LB) VG 30 (grau de viscosidade) com a incorporação de um bio-óleo (BO) nas porcentagens de 2%, 4%, 6%, 8% e 10% por meio do teste LAS. A definição de falha adotada foi o pico da tensão cisalhante, e os resultados são apresentados na Figura 25. A vida de fadiga aumenta com o maior teor de bio-óleo nos níveis de deformação de 2,5% e 5%.

Figura 25 - Valores de Nf para ligantes com bio-óleo



Fonte: Adaptado de Girimath e Singh (2019)

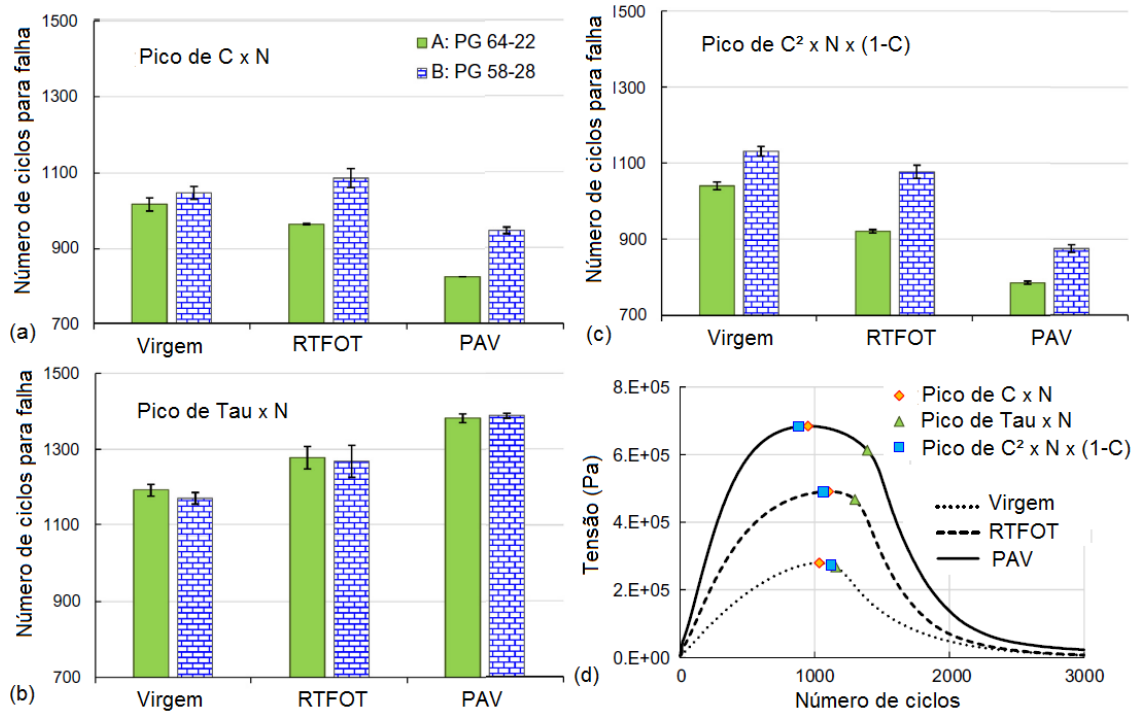
Cao e Wang (2018), buscando uma nova estrutura de análise para caracterizar a fadiga de ligantes com o teste LAS, avaliaram três definições de falha para dois ligantes de PG 64-22 e 58-28 nas condições virgens, envelhecidos no RTFOT e no PAV. As definições de falhas foram o pico de CxN (módulo normalizado e número de ciclos), pico de τxN (tensão cisalhante e número de ciclos) e o pico de $C^2xNx(1-C)$, sendo este último a formulação proposta pelos autores e os dois primeiros são definições de falhas já existentes. Segundo os autores, para uma mesma condição de teste, espera-se que o envelhecimento de um ligante reduza a resistência à fadiga ou o número de ciclos até a falha (Nf), e para uma mesma condição de envelhecimento, o ligante menos consistente (PG 58-28) apresente uma maior vida de fadiga.

A Figura 26 (a) e (b) exhibe os resultados com base nas definições existentes, (c) a formulação proposta pelos autores, e (d) os pontos de falhas identificados na curva de tensão cisalhante versus número de ciclos. A definição de falha no pico de CxN não reduziu a vida de fadiga do ligante PG 58-22 com o envelhecimento, mas identificou bem a diferença entre os graus de desempenho. Por outro lado, a definição de falha no pico de τxN resultou em maior vida de fadiga para níveis mais elevados de envelhecimento e ligeiramente mais baixo para o ligante mais mole de PG 58-28, o que segundo os autores, é contrária à experiência e evidências experimentais. Além disso, esta definição identificou a falha no ponto em que tensão cai abruptamente.

A nova definição de falha proposta no trabalho, após uma extensa exploração, mostrou-se capaz de discriminar claramente os dois ligantes e produziu uma tendência razoável que o aumento do envelhecimento reduz a vida de fadiga dos ligantes. Na condição virgem, os ligantes mostram ponto de falha próximos aos dois critérios existentes. Na condição RTFOT e PAV, a definição proposta produziu identificação de falha semelhante, porém, melhorada em

comparação ao pico de $C \times N$. Por isso, a versão proposta pode ser considerada uma versão aprimorada do pico de $C \times N$.

Figura 26 - Número de ciclo para falha baseado em diferentes definições de falha: (a) pico de $C \times N$, (b) pico de $\tau \times N$, (c) pico de $C^2 \times N \times (1-C)$, e identificação dos pontos de falha na curva de tensão cisalhante versus número de ciclos



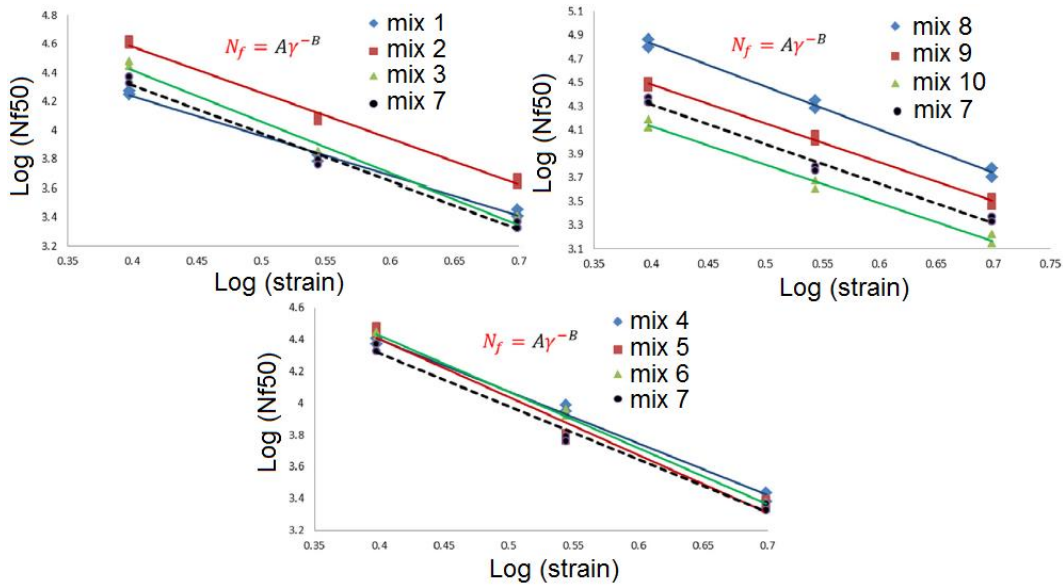
Fonte: Adaptado de Cao e Wang (2018)

Ameri, Mansourkhaki e Daryae (2019) avaliaram os efeitos de diferentes modificadores na vida de fadiga de misturas de ligantes e correlacionaram os resultados de falha com base na redução de 50% da rigidez (Nf_{50}) e no parâmetro G^R da abordagem S-VECD. Dez misturas, divididas em três grupos foram utilizadas, sendo a primeira composta por três misturas de ligante RAP com um ligante 85/100 de penetração nas seguintes proporções, 20/80 (Mix 1), 30/70 (Mix 2) e 50/50 (Mix 3), respectivamente. No segundo cenário foi misturado ligante RAP com ligante 60/70 nas proporções 30/70 (Mix 4), 50/50 (Mix 5) e 100/0 (Mix 6), respectivamente, todas com agente rejuvenescedor na dosagem de 7,5% em peso de ligante RAP (restaurou a penetração do ligante RAP em 65 dmm). O terceiro cenário consistiu em ligante RAP com um ligante modificado por polímero (AMP) nas proporções: 20/80 (Mix 8), 30/70 (Mix 9) e 50/50 (Mix 10), respectivamente. Um ligante virgem com penetração 60/70 foi utilizado como controle (Mix 7).

O critério com base na redução de 50% do valor inicial $|G^*|$ indicou que quase todas as misturas apresentam resistência à fadiga maior que o ligante controle (Figura 27). Além disso,

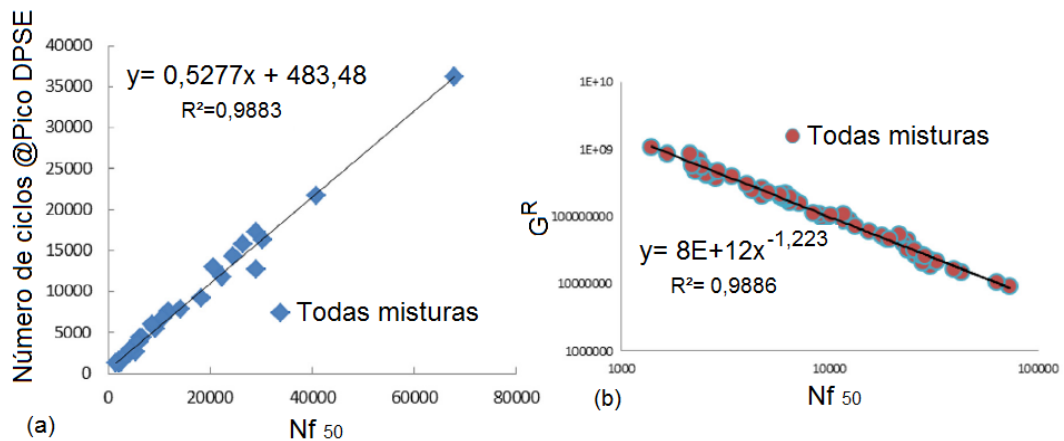
o critério apresentou boa correlação com a máxima energia de pseudo-deformação dissipada (máx DPSE) e com o critério energético G^R (Figura 28 a e b, respectivamente). Não foi identificada tendência no comportamento à fadiga com o aumento da quantidade de ligante RAP nas misturas.

Figura 27 - Comparação da vida de fadiga de diferentes misturas de ligantes



Fonte: Adaptado de Ameri, Mansourkhaki e Daryaei (2019)

Figura 28 - Correlação entre número de ciclos correspondente ao DPSE máx (a) e G^R (b) com Nf50



Fonte: Adaptado de Ameri, Mansourkhaki e Daryaei (2019)

Nota-se com base nos estudos anteriores, que não há um consenso quanto ao efeito do envelhecimento e rejuvenescimento na avaliação da fadiga de ligantes com base nos testes, definições e critérios de falhas existentes. Por isso, a fim de propor um parâmetro de dosagem e avaliar o potencial de recuperação dos agentes rejuvenescedores com base no fenômeno de

fadiga, esta pesquisa irá aprofundar a investigação sobre as definições de falha, critérios de ruptura e equações de previsão da vida fadiga, a fim de identificar quais são sensíveis em captar as variáveis como o envelhecimento e o rejuvenescimento.

2.2. RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT (RAP)

O pavimento em concreto asfáltico, ao longo de sua vida de serviço, passa por diferentes mecanismos de envelhecimento e de danificação por ciclos de carregamento. Esses fatores somados levam à perda de integridade do material e ao acúmulo de dano, promovendo o rompimento do mesmo, principalmente por fadiga e/ou deformação permanente. Ao fim de sua vida útil, inicia-se o processo de restauração e reconstrução do pavimento, com remoção parcial ou integral do material danificado por fresagem ou escarificação (COPELAND, 2011), obtendo o material denominado fresado (*Reclaimed Asphalt Pavement*). Esse material tem grande potencial para substituir parte ou na integralidade os materiais virgens na produção de novos revestimentos, sem perda de desempenho (DINIS-ALMEIDA et al., 2016; LO PRESTI et al., 2016; ZAUMANIS et al., 2016; ZAUMANIS et al., 2019).

A reciclagem do material RAP em novos revestimentos tornou-se atraente por promover ganhos ambientais e econômicos ao conferir uma alternativa duradoura e de alto valor agregado ao material, resultando em conservação dos recursos naturais, redução nos custos, consumo de energia e emissão de gases do efeito estufa (NAYAK e SAHOO, 2017; ARULRAJAH et al., 2014; MANGIAFICO, 2014; RAHMAN et. al., 2014; HOY et al., 2017). A principal economia está ligada ao reaproveitamento do ligante asfáltico presente no RAP em substituição ao ligante virgem. No Brasil, o custo o ligante virgem (CAP 50/70) aumentou de R\$ 1.978,09 para R\$ 5.536,76 a tonelada entre maio de 2018 e maio de 2022, segundo o Sistema Nacional de Pesquisa de custos e Índices (SINAPI).

Departamentos de transportes apresentam restrições quanto às misturas asfálticas com alto teor de RAP, pois a baixa durabilidade resulta na falha prematura do pavimento. Assim, as vantagens da economia circular são perdidas (ZAUMANIS et al., 2019). Por isso, a quantidade média de incorporação de RAP em novas misturas é baixa, em torno de 21,2% (BRETT et al., 2020), visto que neste quantitativo, há pouca influência no comportamento mecânico do concreto asfáltico.

Alguns fatores limitam a incorporação de altos teores, tais como: as propriedades do ligante RAP, mostradas na seção 2.1.2, que tornam as misturas excessivamente rígidas (VUKOSAVLJEVIC, 2006; MOGAWER et al., 2012; BORIACK et al., 2014); a quantificação

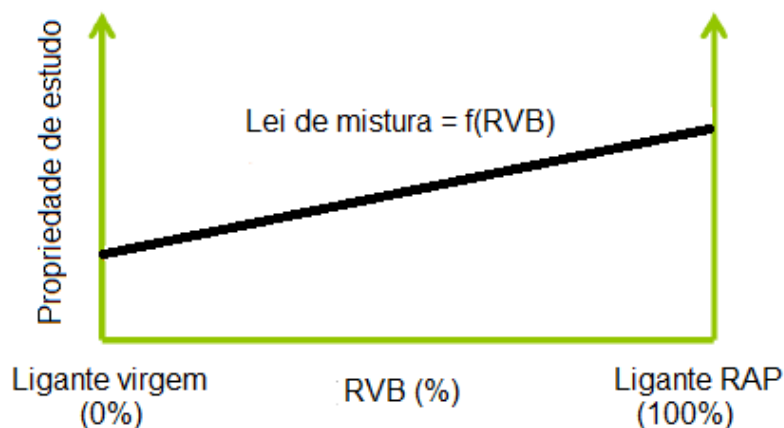
do ligante RAP ativo ou disponível, que pode resultar em um teor de ligante acima ou abaixo do projetado (GOTTUMUKKALA, KASUM e TANDON, 2018; PIRES, 2018; ARÁMBULA-MERCADO et al., 2018; GASPAR, 2019); o fenômeno de interação entre o ligante RAP e os materiais adicionados (ZHAO et al., 2015; ABED, THOM e LO PRESTI, 2018; DING, HUANG e SHU, 2018); e por fim, as limitações de capacidade técnica para produção nos modelos atuais de usinas.

Diante disso, este capítulo está dividido em práticas atuais para projetos, propriedades e fenômenos, agentes rejuvenescedores, propriedades mecânicas de misturas recicladas e misturas 100% RAP.

2.2.1. Práticas atuais para projetos

Dadas as características do material RAP, com o aumento no teor de incorporação, determinadas diretrizes e considerações devem ser avaliadas, principalmente às relacionadas ao ligante asfáltico a fim de atendimento das especificações. Essas diretrizes são diferentes e de acordo com cada país. De modo geral, os modelos, as leis de mistura ou os gráficos de mistura (*Blending Charts*) entre o ligante virgem e ligante RAP são utilizados para projetar um ligante final com propriedades finais específicas, conforme Figura 29, onde o RVB corresponde ao percentual de ligante virgem substituído (*Replaced Virgin Binder - RVB*).

Figura 29 - Exemplo de um gráfico de mistura



Fonte: Adaptado de Carrion (2017)

Nos países Europeus, a norma EN 13108-1 (2016) define a metodologia de projeto em modelos de mistura, com base nas propriedades físicas de penetração e ponto de amolecimento entre o ligante RAP e o ligante virgem, dados pelas Equações 1 e 2, respectivamente.

$$a.\log(\text{pen}_1) + b.\log(\text{pen}_2) = (a + b).\log(\text{pen}_{\text{mist}}) \quad (1)$$

Onde pen_{mist} = penetração da mistura final entre ligante RAP e ligante virgem; pen_1 = penetração do ligante RAP; pen_2 = penetração do ligante virgem; a e b= proporção de massa entre ligante RAP e ligante virgem ($a+b=1$), respectivamente.

$$T_{PA\text{mist}} = a.T_{PA1} + b.T_{PA2} \quad (2)$$

Onde $T_{PA\text{mist}}$ = ponto de amolecimento da mistura final entre ligante RAP e ligante virgem; T_{PA1} = ponto de amolecimento do ligante RAP; T_{PA2} = ponto de amolecimento do ligante virgem; a e b= proporção de massa entre ligante RAP e ligante virgem ($a+b=1$), respectivamente.

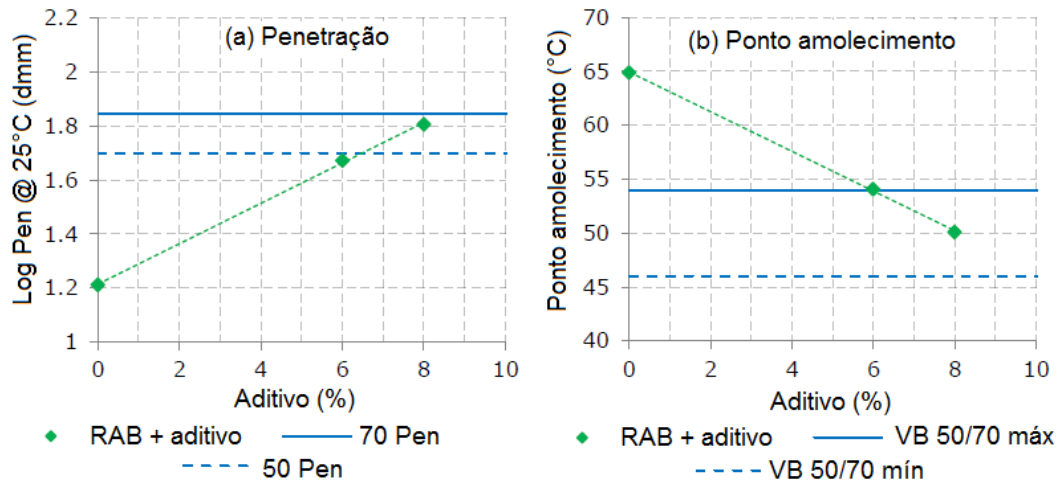
A metodologia americana se baseia em propriedades de desempenho que se relacionam com a deformação permanente e com o trincamento térmico. A norma AASHTO M 323 (2017) traz três situações, de acordo com o percentual de RAP. Para valores menores que 15%, não há necessidade de mudança no ligante virgem a ser adicionado. Valores entre 15% e 25%, deve ser selecionado um ligante com um grau menor nas temperaturas críticas de alta e baixa (escolher um PG 58-28 se comumente é utilizado um PG 64-22). Por fim, para valores maiores que 25%, recomenda-se a elaboração dos gráficos de mistura.

Os gráficos de mistura também são utilizados para representar a propriedade avaliada (penetração, ponto de amolecimento, viscosidade, PGH, PGL, etc) do ligante RAP com a incorporação de um agente rejuvenescedor (dosagem). A Figura 30 demonstra a dosagem do agente rejuvenescedor versus (a) penetração e (b) ponto de amolecimento, enquanto a Figura 31 exhibe a dosagem versus PGH e PGL. Em ambos os gráficos são apresentados o valor inicial das propriedades do ligante RAP e sua evolução com a incorporação do agente rejuvenescedor, bem como os alvos pretendidos.

Embora a prática de projetos de misturas recicladas volta-se principalmente às propriedades do ligante asfáltico, alguns fatores relacionados à mistura devem ser considerados. A quantidade de RAP incorporado pode ser limitada devido às especificações, tipo de usina disponível (capacidade de aquecimento, secagem, temperatura de condicionamento, etc), granulometria, agregados e propriedades do ligante (MCDANIEL e ANDERSON, 2001). Conforme Copeland (2011), um projeto de mistura reciclada (*Reclaimed Asphalt Mixture – RAM*) é semelhante ao projeto de mistura com todos os materiais virgens, no qual uma vez caracterizado, o RAP pode ser combinado com o agregado virgem para definição da

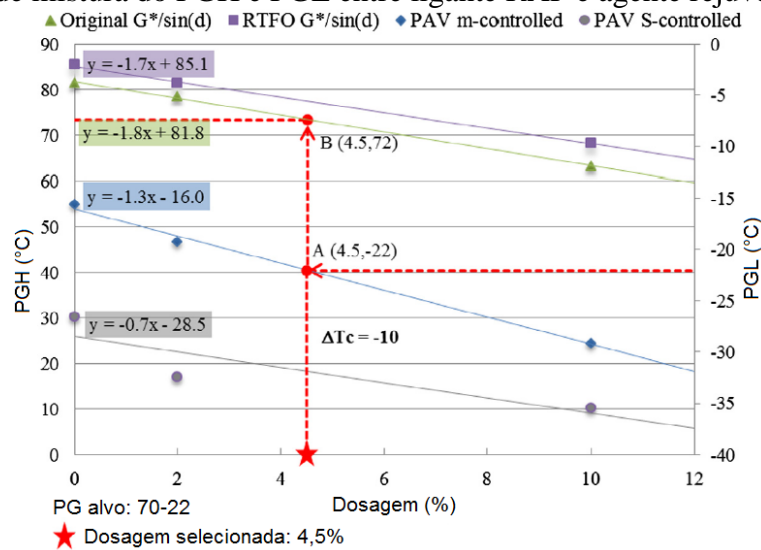
composição granulométrica. Além disso, o ligante presente no RAP deve ser considerado no teor total de projeto.

Figura 30 - Gráfico de mistura entre agente rejuvenecedor e ligante RAP com a (a) penetração e (b) ponto de amolecimento



Fonte: Adaptado de Pires (2018)

Figura 31 - Gráfico de mistura do PGH e PGL entre ligante RAP e agente rejuvenecedor



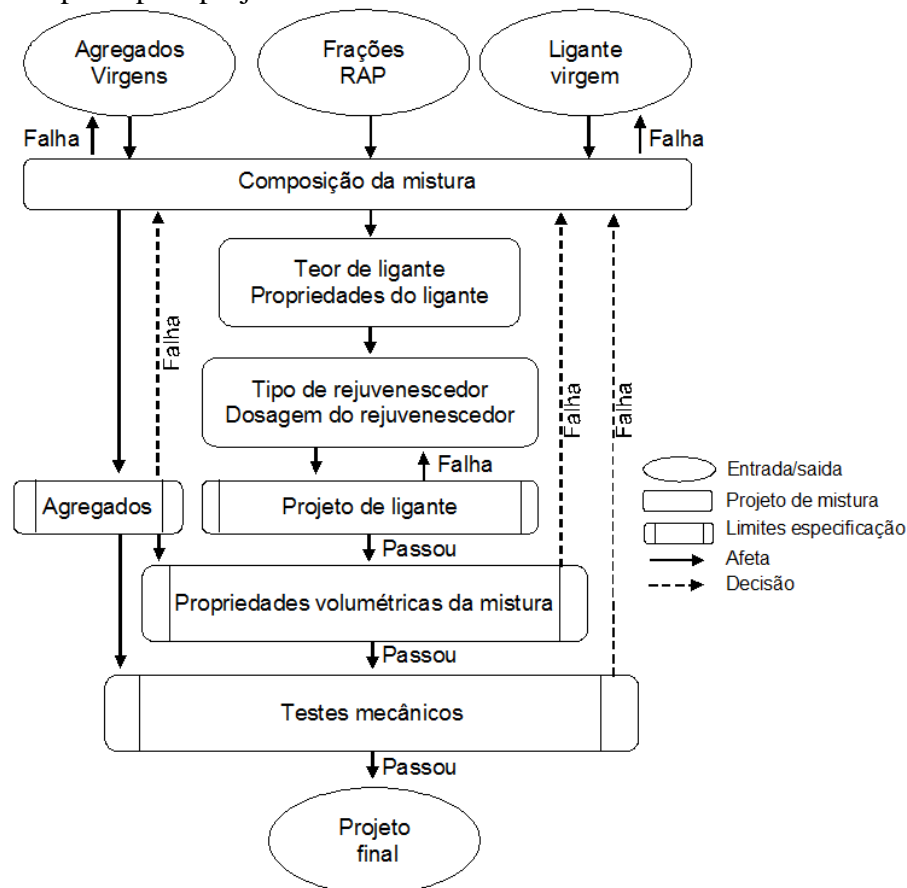
Fonte: Adaptado de Arámbula-Mercado et al. (2018)

Para West et al. (2013), a massa específica do agregado RAP (G_{sb}) é importante para determinação dos Vazios no Agregado Mineral (VAM), sendo obtida após o processo de extração com solvente. No entanto, estas determinações podem conter erro, especialmente para altos teores. Zaumanis et al. (2019) cita que os métodos tradicionais de projeto com base nas propriedades volumétricas desenvolvidas para os materiais virgens podem não captar os

problemas associados ao uso de altas porcentagens de RAP, como o material envelhecido, heterogeneidade, o efeito *black rock*, entre outros.

Segundo Zaumanis, Mallick e Frank (2016), no projeto de RAM deverão ser escolhidos a forma de processamento do RAP, as frações de tamanho que melhor atendam à granulometria da mistura, o teor de ligante, os requisitos volumétricos e de desempenho. A escolha do agente rejuvenecedor e sua dosagem é outro ponto importante para alterar a composição química, a rigidez e tornar disponível o ligante RAP. A Figura 32 mostra uma proposta para o projeto de misturas densas com alto teor de RAP.

Figura 32 – Proposta para projeto de RAM



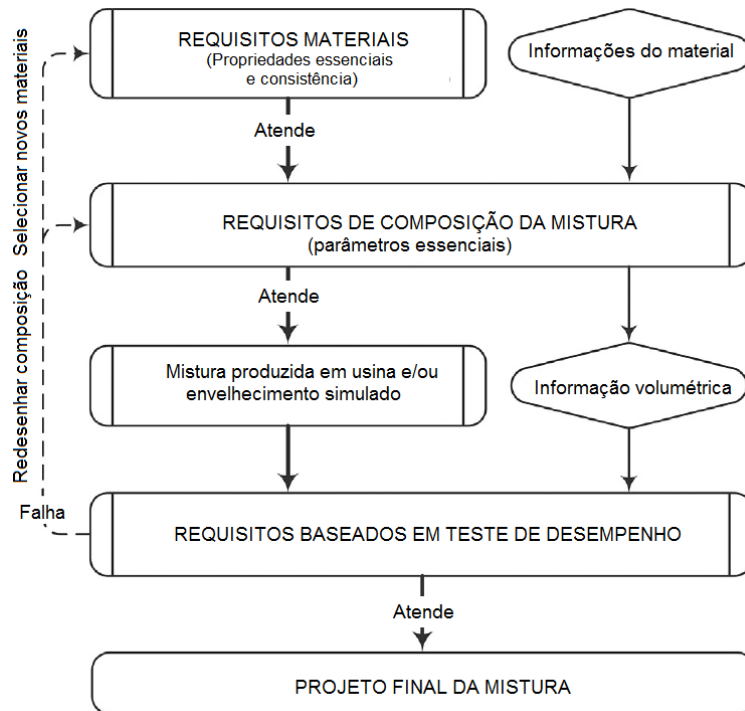
Fonte: Adaptado de Zaumanis (2014)

Primeiramente, os agregados são testados e uma composição de frações RAP são combinadas, aplicando-se os mesmos requisitos dos agregados virgens. O ligante RAP é extraído, caracterizado e selecionado o tipo e dosagem do agente rejuvenecedor. O teor de ligante pode ser modificado com alteração da fonte de RAP, ajuste nos finos da mistura, alteração do rejuvenecedor e sua dosagem, ou adicionando-se um ligante virgem. Por fim, são produzidas misturas em laboratório para determinação das propriedades volumétricas e de

desempenho. Cuidados especiais devem ser tomados para a difusão entre o ligante RAP e os materiais adicionados. As etapas devem ser repetidas se os requisitos das especificações não forem atendidos em qualquer estágio.

Para suprir a dificuldade de projetos para RAM baseados em propriedades volumétricas, Zaumanis et al. (2018) sugerem um método de projeto baseado no desempenho, com balanceamento entre as propriedades de deformação permanente e de fadiga. Esse balanceamento é uma alternativa para fornecer confiabilidade no uso de RAM com alto teor (ZHOU et al., 2014; IM et al., 2016; OZER et al., 2016; ZAUMANIS E VALTERS, 2018). A Figura 33 apresenta uma proposta de método de projeto baseado em desempenho desenvolvida pelos autores.

Figura 33 - Framework para projeto de mistura baseado em desempenho



Fonte: Adaptado de Zaumanis, Poulikakos e Partl (2018)

Os requisitos para os materiais constituintes e para a composição da mistura são reduzidos ao mínimo para permitir a inovação. São coletadas informações sobre materiais constituintes e propriedades volumétricas para auxiliar na otimização do desempenho da mistura. Posteriormente, o envelhecimento é realizado nas amostras para simular as condições de campo. Por fim, a mistura tem seu desempenho testado de acordo com ensaios e critérios especificados, e caso não aprovado, os materiais devem ser alterados.

GDOT (2013) realizou um estudo interno em vários estoques de RAP. Nele, o agregado virgem foi aquecido acima das temperaturas normais de mistura e combinado com RAP não aquecido. O objetivo era determinar quanto de ligante RAP seria transferido para o agregado virgem. Observou-se que não houve transferência apreciável.

Um ligante virgem foi adicionado ao agregado RAP pós-forno em incrementos de 0,25% até que a consistência e o revestimento original fossem atingidos. A diferença entre as porcentagens de ligante do RAP inicial e o agregado RAP com ligante virgem foi calculada como a razão efetiva para determinar quanto do ligante RAP estava contribuindo para o efetivo teor e espessura de ligante. A proporção encontrada foi de 75%, ou seja, 75% do ligante RAP contribuiu de maneira eficaz. Essa investigação levou o GDOT a desenvolver o *Corrected Optimum Asphalt Content*, que consiste em otimizar o teor de ligante total da mistura com um ligante virgem em 25% do teor de ligante RAP. Maiores detalhes são encontrados em GDOT (2013).

2.2.2. Degree of binder Activity e Degree of binder Blending

Além do ligante envelhecido presente no RAP, outros dois fatores são influentes no comportamento mecânico de misturas recicladas e também são considerados como limitações para a utilização de altos teores: o grau de atividade e o grau de mistura.

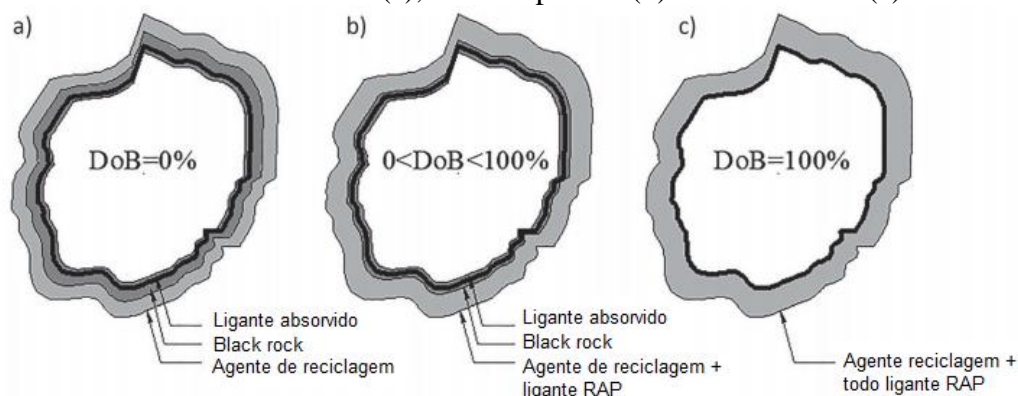
Quando aquecido, uma parte do ligante envelhecido no entorno do agregado fica disponível e participa junto a outros componentes na propriedade final da nova mistura. Esta disponibilidade é chamada de grau de atividade, e se relaciona a um processo de quantificação em dois cenários: “somente RAP” e “RAP + agente rejuvenescedor”. O primeiro é definido como grau de atividade do ligante (*Degree of binder Activity, DoA*) e corresponde a quantidade mínima de ligante RAP ativo que pode ser considerada por um projetista em um projeto de mistura, sendo uma propriedade intrínseca do material que depende do tipo de RAP e condições de processamento (temperatura e tempo de mistura) (LO PRESTI et al., 2019). Uma forma de quantificação foi desenvolvida por Pires (2018), e adaptada em Gaspar (2019), sendo apresentada na seção 5.4.1.

O segundo é definido como grau de disponibilidade do ligante (*Degree of binder Availability, DoAv*), no qual se utiliza um agente rejuvenescedor, e representa a porcentagem máxima do ligante RAP disponível que um projetista pode considerar em suas formulações de projeto (LO PRESTI et al., 2019). Neste caso, além de continuar dependendo do tipo de RAP e das condições de processamento, o tipo de aditivo também se torna um fator de influência.

A adoção correta de um DoA/DoAv é importante para atendimento a padrões específicos, evitando teores de ligante acima ou abaixo do projetado que resultariam em problemas de durabilidade da mistura reciclada, ou seja, corresponde a quantidade de ligante que não precisa ser substituído por ligante virgem. Um teor acima do projetado resultará em susceptibilidade à deformação permanente, e um teor abaixo do projetado tornará a mistura susceptível ao trincamento.

O grau de mistura está ligado a um fenômeno de interação entre o ligante RAP e outros materiais virgens ou agentes rejuvenescedores, sendo denominado de *Degree of binder Blending* (DoB). Pode ser definido como um indicador que descreve até que ponto o ligante RAP contribui ou é eficiente para as propriedades finais da mistura entre o ligante RAP e o agente rejuvenescedor (LO PRESTI et al., 2019). Nesta variável, três cenários são citados, mistura nula (a), mistura parcial (b) e mistura total (c) (Figura 34), e muitas formulações para quantificar o fenômeno são propostos na literatura (SHIRODKAR et al., 2011; BOWERS et al., 2014; ABED, THOM e LO PRESTI, 2018).

Figura 34 - Cenários de mistura nula (a), mistura parcial (b) e mistura total (c)



Fonte: Adaptado de Lo Presti et al. (2019)

2.2.3. Agentes rejuvenescedores

Os agentes rejuvenescedores, chamados na literatura de agentes de reciclagem, rejuvenescedores ou agentes de recuperação, são produtos com características químicas e físicas projetadas para restaurar as propriedades químicas, reológicas e de desempenho perdidas pelo ligante com o envelhecimento. O material tem por função melhorar a proporção asfaltenos/maltenos, reduzir o tamanho dos aglomerados de asfaltenos, aumentar o poder dispersivo da fase maltênica e a mobilidade molecular, e a redução da viscosidade e da rigidez

com reestabelecimento da componente viscosa e aumento da ductilidade (MOGHADDAM e BAAJ, 2016; KASEER, MARTIN E ARÁMBULA-MERCADO, 2019).

Em misturas com alto teor de RAP, no qual os efeitos do ligante envelhecido prepondera sobre o comportamento viscoelástico e mecânico, a utilização do agente rejuvenescedor é uma opção promissora. No curto prazo, o AR deve permitir a produção de misturas com alto teor de RAP, se difundir e mobilizar o ligante envelhecido para produzir um concreto asfáltico uniformemente revestido, de fácil trabalhabilidade e compactabilidade. O processo de difusão geralmente é lento, no entanto, deve ocorrer antes da liberação ao tráfego, evitando a redução do atrito e a susceptibilidade à deformação permanente. No longo prazo, deve reconstituir as propriedades químicas e físicas do ligante a fim de manter a estabilidade do material. Além disso, a reologia do ligante deve ser reestabelecida a fim de evitar o trincamento térmico e por fadiga, o dano por umidade e o desgaste (ZAUMANIS, 2014; MOGHADDAM e BAAJ, 2016).

2.2.3.1. *Tipos, dosagem e impacto no comportamento*

No Brasil, o material é classificado em seis graus (ou grupos) quanto a viscosidade cinemática a 60°C, conforme Regulamento Técnico DNC nº 04/97, semelhante a ASTM D 4552 (2016). No entanto, em termos práticos, essa classificação não é eficiente em termos de desempenho para selecionar e dosar o material.

Os agentes rejuvenescedores podem ser produzidos com diferentes matérias-primas, e fornecer uma gama variada de produtos como óleos vegetais, óleos derivados de resíduos, produtos de engenharia, óleos base de refinarias, entre outros. Há vários tipos de agentes rejuvenescedores disponíveis comercialmente de acordo com o *National Center for Asphalt Technology* (NCAT), e separados em 5 categorias (Tabela 1).

A dosagem do agente rejuvenescedor deve ser cuidadosamente selecionada, pois um valor excessivo, além de anti-econômico, irá reduzir significativamente a consistência do ligante RAP e tornar a mistura susceptível à deformação permanente, e ao contrário, pode não ser suficiente para reduzir a rigidez, recompor os componentes químicos, reológicos e de desempenho. Diferentes parâmetros são utilizados para a determinação da concentração ótima: propriedades convencionais como a penetração, o ponto de amolecimento e a viscosidade (YAN et al., 2014; ZAUMANIS, MALLICK e FRANK, 2015; EAPA, 2018); o grau de desempenho, sendo a dosagem mínima determinada para assegurar resistência ao trincamento (PGL) e a dosagem máxima quanto à deformação permanente (PGH) (SHEN, AMIRKHANIAN e MILLER, 2007; TRAN, TAYLOR e WILLIS, 2012; ZAUMANIS,

MALLICK e FRANK, 2015); o parâmetro ΔT_c (diferença nas temperaturas de teste no BBR quando a rigidez de fluência (S) e a taxa de relaxação de tensão -valor m- atingem os limites de especificação PG de 300 MPa e 0,30, respectivamente) e o parâmetro reológico Glover-Rowe (G-R) (ARÁMBULA-MERCADO et al., 2018).

Tabela 1 - Tipos comuns de agentes rejuvenescedores

Categoria	Tipos	Descrição
<i>Paraffinic Oils</i> (óleos parafínicos)	Resíduo de óleo de motor (WEO) Resíduo de óleo de motor fundo (WEOB) Valero VP 165 Storbit	Óleos lubrificantes utilizados;
<i>Aromatic Extracts</i> (Extratos aromáticos)	Hydrolene Reclamite Cyclogen L Valero 130 ^a	Produtos refinados de petróleo com componentes polares de óleo aromático;
<i>Naphthenic Oils</i> (Óleos naftênicos)	SonneWarmix RJ TM Ergon Hyprene	Hidrocarbonetos projetados para modificação de ligantes;
<i>Triglycerides & Fatty Acids</i> (Triglicerídeos e ácidos graxos)	Resíduo de óleo vegetal Resíduo vegetal Graxa Graxa marrom Delta S*	Derivado de óleos vegetais; *Possui outros elementos químicos importantes, além triglicerídeos e ácidos graxos;
<i>Tall Oils</i> (Óleo de pinho)	Sylvaroad RP1000 Hydrogreen	Subprodutos da indústria de papel. Mesma família química de agentes antiderrapantes e emulsificantes líquidos;

Fonte: Adaptado de Arámbula-Mercado et al. (2018)

A utilização dos gráficos de mistura entre o ligante RAP recuperado e diferentes concentrações do agente rejuvenescedor é considerada a melhor abordagem de projeto para determinação da dosagem adequada de acordo com as propriedades citadas anteriormente.

Moghaddam e Baaj (2016) compilaram os tipos, a dosagem e os resultados da utilização de diferentes agentes rejuvenescedores, apresentados na Tabela 2. Além disso, a tabela foi complementada com as propriedades de referência para a dosagem do material. Verifica-se que a propriedade de penetração foi utilizada como parâmetro de dosagem em aproximadamente 55% dos estudos levantados, e correspondem às maiores concentrações com relação aos demais parâmetros. Em contrapartida, nenhum índice baseado no fenômeno de fadiga foi aplicado para determinação da concentração ótima, o que reforça a lacuna quanto aos parâmetros de seleção e dosagem do material fundamentados no principal mecanismo de falha de misturas recicladas.

Tabela 2 - Efeito do tipo e da dosagem dos agentes rejuvenescedores nas propriedades de ligante e misturas

(Continua)

N°	Agente rejuvenescedor (tipo)	Parâmetro de dosagem (% em peso de ligante envelhecido)	RAP (%)	Propriedades				Referências
				Fad ¹	DP ²	DU ³	TT ⁴	
1	Comercial (R1)	Fabricante (0,6%)	19% RAP	V	V	V	N/A	Im et al. (2014)
2	Comercial (R2)	Fabricante (1,5%)	19% RAP	V	V	V	N/A	Im et al. (2014)
3	Comercial (R3)	Fabricante (2%)	19% RAP	V	V	V	N/A	Im et al. (2014)
4	Rejuvenescedor composto (RRA)	Penetração, ponto de amolecimento, viscosidade e ductilidade (10%)	Ligante envelhecido em laboratório	N/A	V	N/A	X	Kuang et al. (2014)
5	Rejuvenescedor comum (CRA)	Penetração, ponto de amolecimento, viscosidade e ductilidade (10%)	Ligante envelhecido em laboratório	N/A	V	N/A	X	Kuang et al. (2014)
6	Comercial (óleo)	Temperatura Crítica (2-3%)	15 a 48% RAP	N/A	V	V	N/A	Shen, Amirkhanian e Miller (2007)
7	Comercial (óleo)	Temperatura Crítica (2-3%)	15 a 40% RAP	N/A	X	X	N/A	Shen, Amirkhanian e Miller (2007)
8	Ligante com alta penetração	Temperatura Crítica (2 e 7,4%)	Ligante envelhecido em laboratório	N/A	X	N/A	V	Shen, Amirkhanian e Tang (2007)
9	Bitutech RAP	Fabricante (0,5%)	40% RAP	X	V	V	X	Mogawer et al. (2013)
10	SonneWarmix RJT	Fabricante (0,5%)	40% RAP	X	V	V	X	Mogawer et al. (2013)
11	SonneWarmix RJ	Fabricante (0,5%)	40% RAP	X	V	V	X	Mogawer et al. (2013)
12	Bitutech RAP	Fabricante (0,5%)	Ligante envelhecido em laboratório	N/A	V	N/A	N/A	Mogawer et al. (2013)
13	SonneWarmix RJT	Fabricante (0,5%)	Ligante envelhecido em laboratório	N/A	V	N/A	N/A	Mogawer et al. (2013)
14	SonneWarmix RJ	Fabricante (0,5%)	Ligante envelhecido em laboratório	N/A	V	N/A	N/A	Mogawer et al. (2013)
15	Óleo WV	Penetração (12%)	100% RAP e RAB	V	V	N/A	V	Zaumanis, Mallick e Frank (2015)
16	Graxa WV	Penetração (12%)	100% RAP e RAB	V	V	N/A	V	Zaumanis, Mallick e Frank (2015)
17	Óleo orgânico	Penetração (12%)	100% RAP e RAB	V	V	N/A	V	Zaumanis, Mallick e Frank (2015)
18	Óleo destilado	Penetração (12%)	100% RAP e RAB	V	V	N/A	V	Zaumanis, Mallick e Frank (2015)
19	Óleo de resíduo de motor (WEO)	Penetração (12%)	100% RAP e RAB	V	V	N/A	V	Zaumanis, Mallick e Frank (2015)

Tabela 2 - Efeito do tipo e da dosagem dos agentes rejuvenescedores nas propriedades de ligante e misturas

(Continua)

20	Extrato aromático	Penetração (12%)	100% RAP e RAB	V	V	N/A	V	Zaumanis, Mallick e Frank (2015)
21	Rejuvenescedor 1	Temperatura crítica (0, 5 e 10%)	25% RAB e 75% LV ⁵	N/A	V	N/A	N/A	Chen et al. (2014)
22	Óleo de semente de algodão	Temperatura crítica (0, 5 e 10%)	25% RAB e 75% LV ⁵	N/A	X	N/A	N/A	Chen et al. (2014)
23	Resíduo de óleo de cozinha	Temperatura crítica (0, 5 e 10%)	25% RAB e 75% LV ⁵	N/A	X	N/A	N/A	Chen et al. (2014)
24	Óleo WV	Penetração (12%)	100% RAP e RAB	V	V	X	V	Zaumanis et al. (2014)
25	Graxa WV	Penetração (12%)	100% RAP e RAB	V	V	V	V	Zaumanis et al. (2014)
26	Óleo orgânico	Penetração (12%)	100% RAP e RAB	V	V	V	V	Zaumanis et al. (2014)
27	Óleo destilado	Penetração (12%)	100% RAP e RAB	V	V	V	X	Zaumanis et al. (2014)
28	Óleo de resíduo de motor	Penetração (12%)	100% RAP e RAB	X	V	V	V	Zaumanis et al. (2014)
29	Extrato aromático	Penetração (12%)	100% RAP e RAB	V	V	V	V	Zaumanis et al. (2014)
30	Óleo destilado	Penetração (12,7%)	100% RAP e RAB	N/A	N/A	N/A	V	Zaumanis, Mallick e Frank (2013)
31	WEO	Penetração (18,2%)	100% RAP e RAB	N/A	N/A	N/A	X	Zaumanis, Mallick e Frank (2013)
32	WEO inferior	Penetração (>20%)	100% RAP e RAB	N/A	N/A	N/A	X	Zaumanis, Mallick e Frank (2013)
33	WEO FT wax	Penetração (>20%)	100% RAP e RAB	N/A	N/A	N/A	X	Zaumanis, Mallick e Frank (2013)
34	Óleo de fluxo naftênico	Penetração (>20%)	100% RAP e RAB	N/A	N/A	N/A	V	Zaumanis, Mallick e Frank (2013)
35	Extrato aromático	Penetração (18,3%)	100% RAP e RAB	N/A	N/A	N/A	V	Zaumanis, Mallick e Frank (2013)
36	Óleo base parafínico	Penetração (18,3%)	100% RAP e RAB	N/A	N/A	N/A	X	Zaumanis, Mallick e Frank (2013)
37	Sebo refinado	Penetração (9,7%)	100% RAP e RAB	N/A	N/A	N/A	V	Zaumanis, Mallick e Frank (2013)
38	Mistura orgânica	Penetração (11,2%)	100% RAP e RAB	N/A	N/A	N/A	V	Zaumanis, Mallick e Frank (2013)
39	Óleo pongamia	Econômico (5, 10 e 15%)	Ligante envelhecido em laboratório	V	V	N/A	N/A	Nayak e Sahoo (2017)

Tabela 2 - Efeito do tipo e da dosagem dos agentes rejuvenescedores nas propriedades de ligante e misturas

(Conclusão)

40	Óleo composto de mamona	Econômico (5, 10 e 15%)	Ligante envelhecido em laboratório	V	V	N/A	N/A	Nayak e Sahoo (2017)
41	Óleo aromático	Fabricante (0,5%)	50% RAP	V	N/A	N/A	N/A	Mogawer et al. (2015)
42	Óleo parafínico	Fabricante (0,5%)	50% RAP	V	N/A	N/A	N/A	Mogawer et al. (2015)
43	Mistura orgânica	Fabricante (0,5%)	50% RAP	V	N/A	N/A	N/A	Mogawer et al. (2015)
44	Rapiol – derivado do petróleo	Penetração (7,5%)	30, 50 e 100% de RAB com LV ⁵	V	N/A	N/A	N/A	Ameri, Mansourkhaki e Daryae (2019)

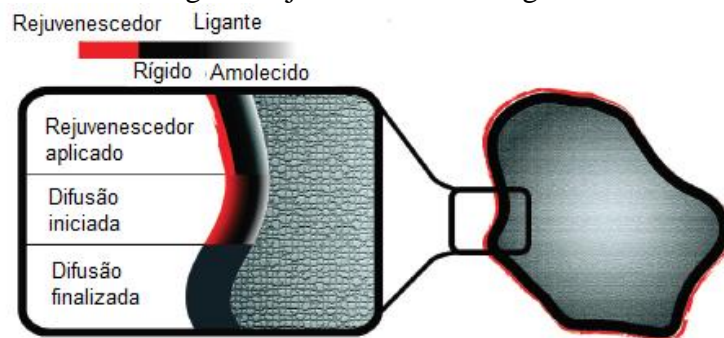
Fonte: Moghaddam e Baaj (2016); ¹Fadiga; ²Deformação permanente; ³Dano por umidade; ⁴Trincamento térmico; ⁵Ligante virgem; V – Passou; X – Falhou; N/A - Não avaliado

2.2.3.2. Difusão e local de adição

Além da dosagem ideal, o uso do agente rejuvenecedor impõe outros desafios, como a distribuição homogênea e boa difusão. A difusão é importante, pois ativa o ligante envelhecido e o torna disponível para misturar com os materiais virgens, a fim de originar um filme homogêneo em torno do agregado.

A velocidade de difusão depende do ligante e do agente rejuvenecedor, ocorrendo mais rapidamente em temperaturas elevadas durante a mistura, armazenamento, transporte e compactação, podendo continuar durante a vida útil até atingir o equilíbrio (KARLSSON e ISACSSON, 2003; KUANG et al., 2011). O processo de difusão, demonstrado na Figura 35, ocorre em quatro etapas segundo Carpenter e Wolosick (1980). Na primeira, o rejuvenecedor forma uma camada de viscosidade muito baixa ao redor do RAP. Na segunda, inicia a penetração no ligante envelhecido. Na terceira, o rejuvenecedor diminui gradualmente a viscosidade nas camadas interna e externa. Por fim, o equilíbrio é atingido.

Figura 35 - Processo de difusão do agente rejuvenecedor no ligante envelhecido



Fonte: Adaptado de Carpenter e Wolosick (1980)

O procedimento de incorporação do agente rejuvenecedor na mistura, tanto em laboratório quanto em usina, afeta a difusão, e conseqüentemente, o comportamento mecânico das RAMs. Existem diferentes metodologias de adicionar o agente rejuvenecedor. As primeiras consistem em misturar o agente com o RAP em altas temperaturas, a frio com pulverização na superfície ou misturado ao ligante virgem. A segunda é chamada de *Rejuvenator Sealer Materials* (RSM), normalmente pulverizada na superfície do revestimento após três anos de construção com o objetivo de reduzir a rigidez do ligante envelhecido e prolongar a vida útil da camada final (SU, 2012; JUNTAO et al., 2014). Por fim, na terceira, o

agente rejuvenecedor é incorporado na mistura asfáltica dentro de cápsulas que se degradam ao longo da vida útil por meio da ação do tráfego (GARCIA et al., 2010; SU, SCHLANGEN).

Zaumanis et al. (2019) analisaram dez locais potenciais para adição do agente rejuvenecedor em usina de asfalto e avaliaram os resultados em termos mecânicos, operação e segurança ambiental. Foram quatro locais a montante e quatro a jusante do secador de RAP, e dois no ligante virgem. Os autores identificaram que a pulverização do agente rejuvenecedor no RAP a frio facilita a difusão do material no ligante RAP, resultando em uma maior resistência à fadiga e ao trincamento térmico.

2.2.4. Comportamento mecânico de misturas recicladas

Todas as alterações nas propriedades químicas, reológicas e de desempenho do ligante com o envelhecimento, descuidadas na seção 2.1.2, são transferidas e refletem no comportamento de misturas recicladas, sendo mais influente à medida que o teor de incorporação aumenta.

A análise de ligantes indicou que o envelhecimento aumenta a rigidez do material, reduzindo sua susceptibilidade térmica. Em misturas recicladas, os resultados foram análogos, pois as características termo susceptíveis são herdadas do material asfáltico. Em West, Willis e Marasteanu (2013), misturas com 55% RAP apresentaram rigidez em diferentes temperaturas e frequências de 25% a 60% maior que misturas virgens. Resultados semelhantes foram encontrados em Shen et al. (2007), Al-Qadi et al. (2012), Mogawer et al. (2012), Norouzi et al. (2014), Boriack et al. (2014), Centofante (2016), Norouzi et al. (2017) e Suzuki (2019).

Em relação à deformação permanente, as análises em ligantes exibiram uma melhor tolerância ao dano com o envelhecimento, com resultado do aumento no PG e redução no Jnr. Em misturas, resultados similares foram identificados. Em West et al. (2013), duas misturas 50% RAP, uma à quente (*Hot Mixture Asphalt - HMA*) e outra morna (*Warm Mixture Asphalt - WMA*), foram comparadas a uma mistura controle (materiais virgens) quanto à deformação permanente por meio do *Asphalt Pavement Analyzer (APA)*, do *Flow Number (FN)* e em trechos experimentais. A mistura 50% RAP HMA e a mistura controle atenderam ao critério de 5,5 mm para tráfego pesado no APA, ao contrário da mistura WMA. Em relação ao FN, todas as misturas atenderam ao critério para um tráfego entre 3 e 10 milhões de ESALs (*Equivalent Single Axle Load*). Em ambos os ensaios, a mistura controle apresentou maior tolerância ao dano que às misturas recicladas, no entanto, foram opostos ao identificado nos trechos

experimentais. A seção controle, 50% RAP HMA e WMA apresentaram afundamento em trilha de roda (ATR) de 7,1 mm, 1,8 mm e 3,7 mm, respectivamente.

Al Qadi et al. (2012) compararam três misturas, uma controle, e outras três, com 30%, 40% e 50% RAP, quanto ao ATR por meio do *Whell Tracking Test*. O ATR diminuiu com o maior teor de RAP. Izaks et al. (2015), com o mesmo equipamento, avaliou quatro misturas: uma controle e três recicladas (duas com 30% e uma com 50% RAP). Os melhores desempenhos foram obtidos pelas misturas recicladas. Boriack, Katicha e Flintsch (2014) determinaram a resistência à deformação permanente de misturas com 0%, 20%, 40% e 100% RAP, e identificaram um aumento no FN de próximo a 2000 (0% RAP) para 10000 ciclos (100% RAP). Centofante (2016), Bohn (2017) e Suzuki (2019) também identificaram um aumento no FN com o maior teor de RAP.

Para a fadiga, os resultados encontrados são divergentes, assim como na análise dos ligantes. No entanto, o teste em mistura possui elementos adicionais que não são encontrados na escala ligante: as características do RAP quanto a variabilidade e o grau de atividade, e o fenômeno de mistura com outros materiais virgens. Além disso, os testes de fadiga em mistura juntamente com as abordagens de análise podem não ser sensíveis aos efeitos do envelhecimento e rejuvenescimento.

Tabakovic et al. (2010) analisaram 4 misturas (0, 10, 20 e 30% RAP) quanto à fadiga por tração indireta. Os resultados indicaram que a mistura com 30% apresentou a melhor tolerância ao dano, enquanto que o pior comportamento foi da mistura com 10%. Al Qadi et al. (2012) investigaram a fadiga de misturas com 0%, 30%, 40% e 50% RAP pelo ensaio de flexão de viga apoiada em quatro pontos, com critério de falha definido pela redução de 50% na rigidez inicial. A inserção de RAP melhorou levemente a vida à fadiga das misturas. Tomlinson (2012), considerando o mesmo ensaio e critério de falha, avaliou misturas com 20% e 40% de RAP, com teor de ligante adicional de 0%, 0,5% e 1% de ligante. O aumento no teor de RAP e no teor de ligante adicional melhorou a vida de fadiga das misturas. West et al. (2013) determinou a vida de fadiga de uma mistura controle, e duas recicladas 50% RAP HMA e WMA, em trechos experimentais e pelo teste de flexão de viga apoiada em quatro pontos. Nas seções experimentais não foi identificado rompimento por fadiga, e os resultados laboratoriais indicaram um melhor comportamento das misturas recicladas.

West et al. (2011) compararam o desempenho do pavimento a longo prazo (20 anos) de uma seção com 30% RAP e outra equivalente com mistura virgem. Foi identificado que a fadiga e o trincamento longitudinal e transversal foram mais acentuados no revestimento reciclado. Bennert e Maher (2013) constataram, em seções do *Long-Term Pavement Performance* (LTPP),

o rompimento do revestimento ao mesmo tempo em misturas convencionais e recicladas, porém, com 30% RAP a evolução do dano foi mais acelerada.

Boriack, Katicha e Flintsch (2014) avaliaram pelo teste de fadiga à flexão, com deformação controlada (400 microstrain), frequência de 10 Hz e temperatura de 20°C, misturas contendo 0%, 20%, 40% e 100% RAP e teor de ligante acima do projeto em 0%, 0,5% e 1% para as três primeiras misturas (PG 70-22 para 0% e 20%, PG 64-22 para 40% e PG 58-28 para 100%). Na mistura 100% RAP foi acrescentado um teor de ligante adicional de apenas 1,5%. Os autores constataram que a incorporação de RAP reduziu a vida de fadiga das misturas em relação à referência. O aumento de 20% para 40% melhorou a tolerância ao dano, e a mistura 100% apresentou a pior resistência. Com a exceção da mistura 40%, a aumento no teor de ligante acima do projeto melhorou a vida de fadiga das demais misturas.

Norouzi et al. (2014) determinaram a vida de fadiga de dois blocos de misturas. Um bloco composto por quatro misturas contendo 0%, 20%, 30% e 40% de RAP e um ligante base de PG 64-28 foram produzidas na usina de Vermont (VT). O segundo bloco, consistia em mais quatro misturas, usinadas em *Manitoba Infrastructure and Transportation* (MIT), com teores 0%, 15% e 50% de RAP e ligante base PG 58-22 (uma outra mistura com 50% RAP e ligante base de PG 52-34 também foi produzida). O teste de fadiga utilizado foi o de tração cíclica e o critério de falha desenvolvido para o modelo S-VECD, baseado na energia de pseudo-deformação (G^R). As misturas VT não apresentaram diferenças significativas na resistência à fadiga com a incorporação de RAP. Já nas misturas MIT, um aumento na porcentagem de RAP diminuiu consideravelmente a vida de fadiga, o que foi mitigado com o uso do ligante PG 52-34.

Norouzi et al. (2017) estudaram a vida de fadiga de misturas com teores de 0%, 25% e 30% de RAP com três ligantes bases, PG 64-22, PG 67-22 e PG 76-22. Teores de ligante adicionais foram incorporados, seguindo a metodologia COAC. O teste de fadiga utilizado foi o de tração cíclica e o critério de falha desenvolvido para o modelo S-VECD, baseado na energia de pseudo-deformação (G^R). O programa LVECD foi utilizado para investigar os efeitos do conteúdo de RAP e do tipo de ligante. As análises S-VECD e LVECD indicaram que a utilização de 30% RAP e o método COAC melhoraram significativamente a resistência à fadiga das misturas, especialmente com ligantes PG 64-22 e 67-22.

Wang, Keshavarzi e Kim (2018a) analisaram misturas recicladas em dois conjuntos de pavimento: as seções da pista de teste NCAT e as pistas de teste FHWA ALF. Cada uma possui seções correspondentes com e sem RAP na mesma base e subleito, submetidas às mesmas

condições climáticas e de tráfego. O dano por fadiga observado foi divergente em cada seção: O pavimento RAP apresentou melhor resistência do que a controle no projeto NCAT, enquanto o oposto foi identificado na FHWA. As misturas foram caracterizadas com o modelo S-VECD, e os pavimentos foram modelados no FlexPave com a utilização das propriedades dos materiais, estruturas das seções, clima e tráfego. Esses resultados foram semelhantes aos observados em campo. Os autores concluíram que o desempenho à fadiga das misturas recicladas diferiu de acordo com a estrutura do pavimento e caracterização a fadiga das misturas.

Luzzi (2019) investigou a fadiga de misturas produzidas em usina com 0%, 10%, 20% e 30% de RAP e sem agente rejuvenescedor pelo teste uniaxial cíclico à tração-compressão, com análise dos dados pelo S-VECD e critério de falha baseado na abordagem energética G^R . As três misturas recicladas apresentaram maior vida de fadiga que à mistura de referência.

Suzuki (2019) determinou a vida de fadiga de misturas com 0% (referência), 25% e 50% de RAP com e sem agente rejuvenescedor, pelo teste de flexão de viga apoiada em quatro pontos, e critério de falha na redução de 50% da rigidez inicial. A mistura 25% RAP sem agente rejuvenescedor apresentou menor tolerância ao dano comparada à mistura de referência. A adição do aditivo melhorou o comportamento da mistura, se aproximando da mistura de referência em um nível mais alto de deformação. O desempenho da mistura 50% RAP sem agente foi similar à mistura de referência, tornando-se superior a partir da incorporação do aditivo. Segundo a autora, o não condicionamento do RAP pode ter influenciado nos resultados.

Por fim, estudos como Shu, Huang e Vukosavljevic (2008), McDaniel et al. (2012), Poulikakos et al. (2014) também indicaram aumento na vida de fadiga de misturas recicladas com 40% RAP em comparação a misturas convencionais.

2.2.5. Misturas 100% RAP

O aumento do teor de incorporação de RAP no concreto asfáltico pode ser uma alternativa ao aumento considerável dos custos do ligante asfáltico e a necessidade de redução de cargas ambientais significativas associadas às emissões de CO_2 . Assim, os impactos ambientais são reduzidos e a demanda de energia pode ser diminuída em alguns casos em 23%, em comparação às misturas convencionais (SONG, HUANG e SHU, 2018; MANTALOVAS, 2020).

Uma das restrições para misturas com altos teores de RAP, com até 100%, é o desempenho não comprovado, como consequência da falta de um sistema assertivo para a seleção de materiais e projetos com base no desempenho (ZAUMANIS, MALLICK e FRANK,

2016). Além disso, a experiência inicial malsucedida pode ser atribuída às usinas de produção não projetadas para lidar com essas misturas.

No entanto, a indústria evoluiu e vem lançando, nos últimos anos, usinas disponíveis para trabalhar de forma eficiente com altos teores de RAP. O modelo RAH 60 da AMMANN, como exemplo, com um sistema de fluxo paralelo para aquecimento do RAP permite a produção de misturas com até 60% de incorporação.

No Modelo RAH100, do mesmo fabricante, que permite trabalhar com 100% RAP, foi desenvolvido um processo de contrafluxo em que o RAP faz uma saída precoce do sistema, assim evitando o superaquecimento dos sistemas tradicionais de contrafluxo. O modelo HRT (Figura 36) consiste em uma usina que posiciona o secador na parte mais alta da estrutura, e assim, o material reciclado desce do secador para dentro de um silo pulmão, para uma balança, e finalmente, na misturadora. Assim, há uma eliminação do sistema de esteiras para condução do RAP aquecido.

Figura 36 - Modelo HRT da AMMANN que permite a utilização de 100% RAP



Fonte: <https://www.ammann.com/pt-br/news-media/news/solucoes-criativas-sempre>

Assim, como as indústrias estão inovando em modelos de usina para produção de misturas recicladas com alto teor, há uma necessidade que a abordagem sobre o desempenho desses materiais “caminhe” na mesma direção. As limitações quanto à fadiga e ao trincamento térmico devem ser abordadas a fim de potencializar o uso do material. Na sequência serão apresentados pesquisas e os resultados mecânicos com misturas 100% RAP.

Mallick et al. (2010) investigaram mistura 100% RAP com adição de 0,9% de rejuvenescedor reclamita, o que permitiu a redução da temperatura de compactação de 150°C para 70°C. O AR reduziu o módulo dinâmico em relação à mistura virgem, e ao comparar com outros trabalhos, os autores constataram que os valores foram muito semelhantes às misturas convencionais, além de melhorar a resistência ao trincamento térmico. Além disso, foram executados trechos experimentais com 100% RAP em grande escala na cidade de Nova York. Após 11 anos de aplicação (2001 a 2012), não foi observado diferenças no desempenho entre os trechos 100% RAP e as seções com materiais virgens.

Silva et al. (2012) avaliaram o potencial de misturas 100% RAP com a incorporação de dois agentes rejuvenescedores em três teores, a fim de obter uma penetração de 20/30 dmm e ponto de amolecimento de 55/63°C para um ligante RAP com 14 dmm de penetração e 68°C de ponto de amolecimento. A dosagem encontrada foi de 5% para ambos os agentes. As misturas com ARs apresentaram melhor trabalhabilidade, e todas as misturas boa resistência ao dano por umidade. Para a deformação permanente, as misturas sem AR exibiram o melhor desempenho, enquanto que as misturas com AR demonstraram comportamento semelhante a mistura de referência com ligante de mesma classe. Por fim, os ARs reduziram a rigidez das misturas, aumentaram o ângulo de fase e melhoraram o comportamento à fadiga. Os autores concluíram que misturas totalmente recicladas podem ser uma boa alternativa, especialmente se forem utilizados agentes rejuvenescedores para reduzir a temperatura de produção e melhorar o desempenho.

Rowe, Barry e Crawford (2016) avaliaram um conjunto de dois pavimentos de teste: um altamente reciclado (próxima a 100%), e outro controle, localizado em Fort Wayne, Indiana/EUA, após um ano de construção. Os autores observaram pouca diferença entre o desempenho da seção reciclada e da controle, o que fornece suporte significativo para projetos de reciclagem com altas porcentagens.

Por fim, Zaumanis et al. (2019) aplicaram um método de projeto baseado no desempenho em misturas 100% RAP. Uma mistura do tipo AC8 foi projetada equilibrando a deformação permanente com o simulador francês e o potencial de trincamento pelo índice de flexibilidade no teste *Semi-Circular Bend* (SCB). Cinco interações com diferentes combinações

de grade e teor de ligante das misturas 100% RAP foram testadas, a fim de atingir um desempenho semelhante a uma mistura AC8 tradicional. A melhor mistura foi simulada e validada no *Model Mobile Load Simulator* (MMLS3). Os resultados mostraram que um revestimento 100% RAP pode sustentar 2,5 vezes mais aplicação de carga em comparação à mistura tradicional antes da fissuração. Além disso, a resistência à derrapagem e a abrasão de partículas devido aos pneus também foram equivalentes.

Essa metodologia de balanceamento do desempenho será aplicada como base para análise do Capítulo 5, uma vez que procedimentos de projeto baseados nas propriedades volumétricas podem não garantir um desempenho adequado para misturas com alto teor de RAP. Isso se deve a variáveis não convencionais, uso de agentes rejuvenescedores, mistura e difusão de ligantes, entre outros.

2.3. CORRELAÇÃO DO DANO POR FADIGA ENTRE LIGANTE E MISTURAS ASFÁLTICAS

O trincamento por fadiga é um dos principais mecanismos de falha em misturas com alto teor de RAP, resultado do comportamento frágil do material associado ao dano acumulado devido ao tráfego em temperaturas intermediárias (SUBHY et al., 2019). O desempenho à fadiga do pavimento é afetado pelas espessuras e propriedades dos materiais que compõem a estrutura do pavimento. No entanto, o ligante asfáltico pode alterar significativamente o comportamento do concreto asfáltico, uma vez que as fissuras por fadiga normalmente iniciam e propagam-se nas fases de ligante e mastic. Por isso, a capacidade de caracterizar e modelar a fadiga de ligantes é o primeiro passo para projetar misturas não susceptíveis a desenvolver falha prematura por fadiga (SAFAEI, CASTORENA e KIM, 2016; SAFAEI, 2017).

Em projetos de misturas recicladas com alto teor de RAP, o uso de agentes rejuvenescedores é uma alternativa testada para restaurar as propriedades do material. A avaliação da eficiência destes aditivos e, também, a determinação da sua dosagem são baseadas em propriedades físicas que pouco se relacionam com a fadiga do material - penetração, ponto de amolecimento e viscosidade. Por vezes, o PG de alta e baixa temperatura também são utilizados, no entanto, se relacionam bem com o dano por deformação permanente e ao trincamento térmico, respectivamente.

A seguir estão descritos os trabalhos de pesquisas que correlacionaram o comportamento à fadiga de ligantes e misturas asfálticas, a fim de dar sustentação teórica para

um dos principais objetivos deste programa experimental: avaliar e determinar parâmetros de fadiga sensíveis ao envelhecimento e rejuvenescimento, principalmente na escala ligante, para selecionar e dosar o agente rejuvenecedor com base no principal mecanismo de falha de misturas recicladas.

As teorias dos modelos de fadiga não estão descritas, visto que o foco principal desta parte são os resultados obtidos. A teoria completa acerca dos critérios e definições utilizados no programa experimental são tratadas nas seções 4.5.4.2 e 5.5.3 para os ligantes e misturas, respectivamente.

Mannan, Islam e Tarefder (2015) examinaram os efeitos do RAP, frequências de carregamento e níveis de deformação na vida de fadiga de ligantes (LAS – 1 Hz, 5 Hz e 10 Hz e 1 a 30% de deformação com análise VECD; e TS – 1 Hz, 5 Hz e 10 Hz e 4%, 6%, 8% e 10% de deformação) e misturas (flexão de viga apoiada em quatro pontos, com 400, 600, 800 e 1000 *microstrains* de deformação e 1 Hz, 5 Hz e 10 Hz), além de determinar a correlação entre as duas escalas de trabalho. A definição de falha para as duas escalas foi a perda de 50% da rigidez inicial LVE. Duas misturas foram analisadas, uma com 35% RAP e outra sem RAP, além dos dois ligantes extraídos e recuperados. Os resultados de mistura indicaram uma maior tolerância ao dano da mistura não RAP independente da deformação aplicada e a vida de fadiga aumenta com a diminuição da deformação aplicada. No TS e no LAS, o ligante RAP mostrou maior vida de fadiga em relação ao ligante não RAP, e ambos reduzem a tolerância com o aumento no nível de deformação aplicada. Os autores justificaram a divergência entre os resultados das duas escalas pela fraca interação entre o ligante virgem e o ligante RAP na RAM.

No entanto, ao correlacionar a vida de fadiga das misturas com TS e com o LAS, uma forte correlação foi encontrada (R^2 acima de 0,98 para ambos os testes), apesar das diferenças entre os ensaios (na mistura é aplicada uma carga de flexão, enquanto que nos ligantes uma carga de cisalhamento; o LAS utiliza uma taxa de carregamento crescente e o TS uma taxa de carregamento constante). Os autores concluíram que é possível determinar a vida de fadiga de misturas sendo conhecida a vida de fadiga dos ligantes.

Ameri et al. (2016) correlacionaram a vida de fadiga de oito ligantes (ligante base 60/70 de penetração com 0%, 2%, 4% e 6% de Nanoclay e ligante AMP por polietileno com 0%, 2%, 4% e 6% de Nanoclay) e de oito misturas asfálticas correspondentes, com agregados de graduação 0-19 mm e teores de projeto determinados pela metodologia Marshall. Adicionalmente, os autores compararam o desempenho dos ligantes em termos de seus parâmetros VECD, realizaram testes em misturas sob diferentes amplitudes, investigaram o papel da integridade dos ligantes na resistência à fadiga das misturas asfálticas em múltiplas

taxas de carregamento e desenvolveram um modelo fenomenológico de fadiga para misturas asfálticas em termos dos parâmetros VECD dos ligantes.

A caracterização dos ligantes foi realizada pelo LAS na temperatura de 20°C e envelhecimento de curto prazo (RTFOT). O principal resultado do teste é o parâmetro A35, que representa a integridade do material com o carregamento cíclico por fadiga (redução de 35% no valor inicial de $|G^*|. \sin \delta$). O teste de fadiga das misturas foi conduzido pela flexão de viga apoiada em quatro pontos, com critério de falha na redução de 50% da rigidez inicial. A frequência de ensaio foi de 10 Hz na temperatura de 20°C, e as amostras foram submetidas a deformações de 400, 600, 800 e 1000 *microstrains*. Os resultados indicaram que a modificação melhorou a vida de fadiga dos ligantes com base no parâmetro A35. Tendência semelhante foi obtida para as misturas.

Para desenvolvimento do modelo fenomenológico, o primeiro passo foi comparar o A35 dos ligantes com a vida de fadiga das misturas em diferentes taxas de deformação, todas com R^2 acima de 0,85. Também foi comparada a energia dissipada acumulada (CDE) até a falha das misturas (redução de 50% da rigidez inicial) versus A35 dos ligante sob diferentes taxas de deformação, todas com R^2 acima de 0,92. O modelo fenomenológico de fadiga utilizando as propriedades VECD do ligante apresentou R^2 de 0,97, e com isso, constatou-se que é possível estimar a vida da fadiga das misturas em qualquer nível de tensão com utilização do teste LAS.

Os autores concluíram que as propriedades VECD podem ser bem correlacionadas com a vida a fadiga das misturas, e existe uma relação linear entre o parâmetro A35 do ligante e a resistência à fadiga das misturas, sendo que o modelo de fadiga proposto apresentou forte correlação entre as propriedades do ligante e das misturas.

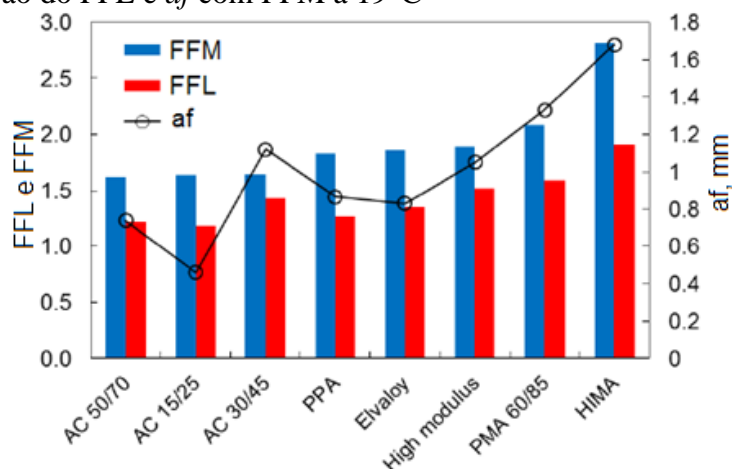
Nascimento (2015) verificou se o modelo S-VECD associado ao critério de falha de G^R é preciso nas previsões de vida de fadiga de misturas brasileiras, ensaiadas à tração-compressão, quando se utilizam diferentes ligantes asfálticos. Além disso, foi verificado se a caracterização de fadiga dos ligantes pelo teste LAS, modelados de acordo com a teoria VECD, se correlaciona com os resultados obtidos nas misturas asfálticas. O teste LAS foi conduzido a 19°C, com uma varredura linear de deformação de 0,1% a 30% em 310 segundos e 10 Hz de frequência. O critério de falha baseia-se na abordagem proposta por Hintz e Bahia (2013), no qual se utiliza a redução na pseudo rigidez para estimar o crescimento da trinca (af).

O autor propôs dois índices para avaliar o dano por fadiga em ligantes e misturas. O primeiro índice é o Fator de Fadiga de Ligantes (FFL), que corresponde a área sob a curva de fadiga (N_f versus deformação em escala log-log) entre dois pontos (1,25% a 2,5%). Para as

misturas, o índice é denominado Fator de Fadiga de Misturas (FFM), que também consiste em calcular a área sob a curva de fadiga entre dois pontos (100 a 200 *microstrains*). Deste ponto de vista, quanto maior o FFL e FFM, maior a tolerância ao dano.

A Figura 37 apresenta a correlação entre *af* e FFL dos ligantes com o FFM de oito misturas correspondentes. Nota-se, com exceção da AC 30/45, o FFL e o *af* se correlacionaram bem com o FFM. Com isso, o autor concluiu que o teste LAS, modelado pela teoria VECD, apresentou forte correlação com o comportamento à fadiga de misturas asfálticas.

Figura 37 - Comparação do FFL e *af* com FFM a 19°C



Fonte: Adaptado de Nascimento (2016)

Safei, Castorena e Kim (2016) adaptaram o modelo S-VECD, desenvolvido para misturas, aos ligantes asfálticos testados sob torção cíclica em um DSR. Quatro ligantes com diferentes graus de desempenho foram testados no LAS teste e no TS sob diferentes condições (temperatura, modo de controle e deformação), conforme a Tabela 3. O critério de falha foi baseado na abordagem energética G^R .

Tabela 3 - Plano experimental proposto pela autora

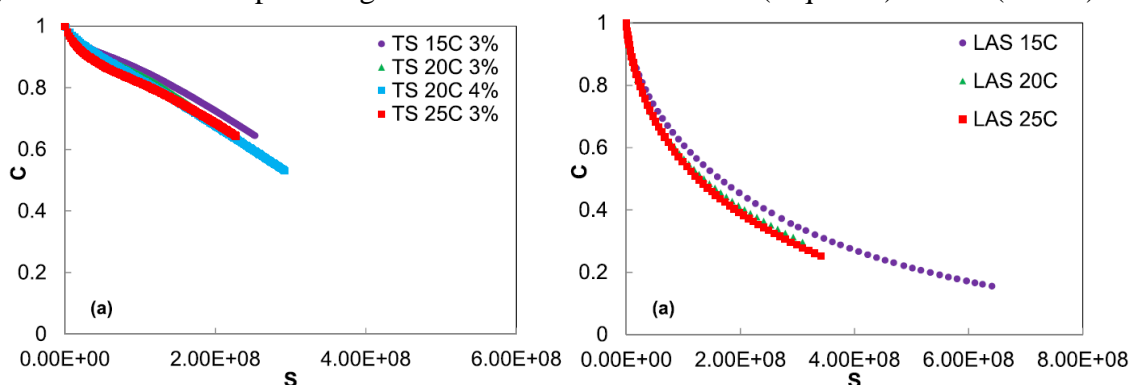
Ligante (PG)	Método de Teste				
	LAS	TS – deformação controlada 3%	TS – deformação controlada 4%	TS – Tensão controlada	Varredura de frequência
	Temperatura de teste (°C)				
70-22	15, 20, 25	15, 20, 25	25	20 (700 kPa)	5, 20, 35
64-22	10, 15, 20	10, 15, 20	15	-	5, 20, 35
64-22	15, 20, 25	15, 20, 25	20	20 (500 kPa)	5, 20, 35
58-28	10, 15, 20	10, 15, 20	20	-	5, 20, 35

Fonte: Adaptado de Safei, Castorena e Kim (2016)

As curvas características de dano oriundas do LAS e TS para os quatro ligantes colapsaram independente da temperatura e do histórico de carregamento (amplitude de

deformação e modo de carregamento), mostrando a aplicabilidade da modelagem S-VECD aos ligantes. No entanto, as curvas características de dano geradas no LAS diferem levemente das geradas no TS (a posição relativa entre os diferentes ligantes foram as mesmas), sendo as curvas no TS mais lineares e superior às curvas de dano no LAS. A razão pela qual as curvas do LAS caem abaixo é devido a não linearidade do material imposta pelas amplitudes de alta tensão no teste, que contribui para a perda de integridade do material além dos danos. A Figura 38 apresenta a C versus S do ligante com PG 64-22, no qual podem ser visualizadas as observações acima.

Figura 38 - C versus S para o ligante PG 64-22 oriunda do TS (esquerda) e LAS (direita)



Fonte: Adaptado de Safaei, Castorena e Kim (2016)

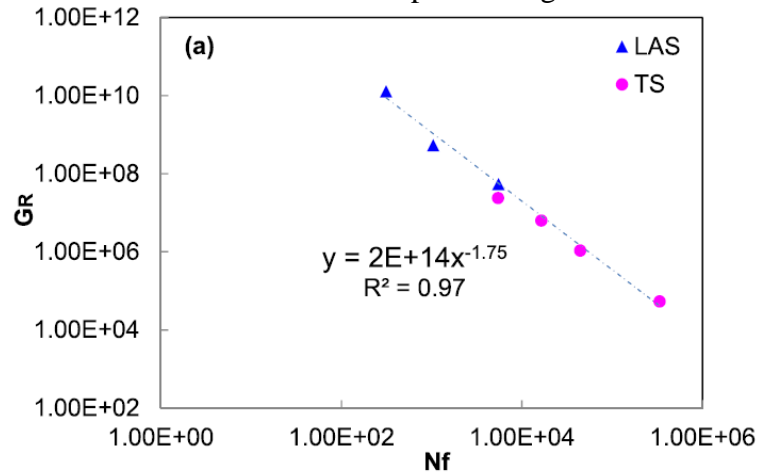
O critério de falha G^R versus N_f , derivado de ambos os testes, mostraram uma relação única independente do histórico de carregamento e da temperatura. Segundo os autores, esses resultados sugerem que G^R versus N_f é uma relação fundamental para um determinado material, mesmo com leve diferença entre as curvas características de dano entre ambos os testes. A Figura 39 apresenta o resultado para o ligante PG 64-22.

Os autores analisaram a correlação entre resultados de ligantes e misturas com base em dois estudos. Foram comparados os ligantes e as misturas correspondentes à HMA, Foam e Evotherm de Safaei et al. (2015). As curvas características de dano dos ligantes e das misturas mostraram forte concordância em cada nível de envelhecimento avaliado (curto e dois níveis a longo prazo). Os ligantes e misturas de Wang et al. (2015) também mostraram classificação similar.

A correlação entre os resultados de ligante e o desempenho em campo foi avaliado. Com base no estudo de (a) Safaei et al. (2015) e (b) Wang et al. (2015), a Figura 40 apresenta a correlação entre as previsões de vida à fadiga de ligantes e misturas utilizando a modelagem S-

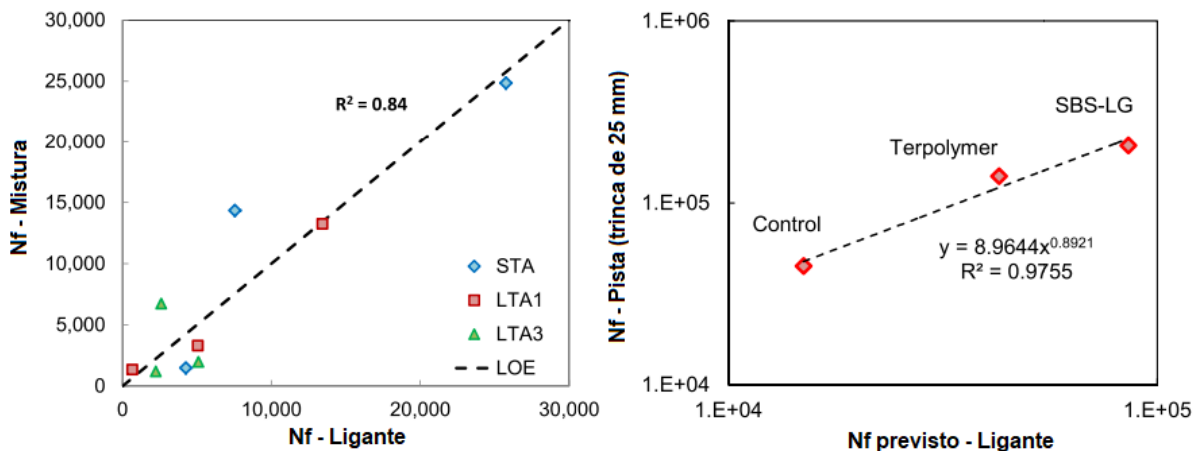
VECD. Os resultados demonstram concordância boa (R^2 de 0,84) e excelente (R^2 de 0,97) nas análises de regressão.

Figura 39 - GR versus Nf obtidos no teste LAS e TS para um ligante PG 64-22



Fonte: Adaptado de Safei, Castorena e Kim (2016)

Figura 40 - Comparação entre previsão de vida de fadiga entre mistura e ligante de (a) Safei et al. (2015) e (b) Wang et al. (2015)



Fonte: Adaptado de Safei, Castorena e Kim (2016)

Mirhosseini et al. (2017) investigaram a possibilidade de utilizar três tipos de aditivos (cinza de semente de tâmara, silício e calário) em três porcentagens (3%, 6% e 9%) como modificadores de um ligante base (PG 58-22), e para isso, compararam o comportamento à fadiga do ligante (LAS teste com abordagem VECD e critério de falha no pico da tensão cisalhante) com a mistura (tração indireta). Equações de correlação foram desenvolvidas para vincular o comportamento à fadiga de ligantes com as misturas correspondentes. Os resultados mostraram concordância aceitável entre os ligantes e as misturas, e com os modelos previstos,

foi possível identificar a contribuição do ligante na resistência à fadiga das misturas. Entretanto, não foi observada uma boa correlação entre as amostras modificadas com cinza.

Hasaninia e Haddadi (2018) estudaram os efeitos da modificação por nanosílica em 2%, 4%, 6% e 8% na fadiga de um ligante e buscaram correlacioná-los com as misturas. O ligante foi ensaiado no LAS com aplicação de uma rampa linear de deformação de 0,1% a 30% em 310 segundos, e os dados experimentais foram analisados pela abordagem VECD com critério de falha correspondente a redução de 35% da rigidez inicial (A35). As misturas foram avaliadas pelo teste de flexão em viga apoiada em quatro pontos com aplicação 600, 800 e 1000 microstrain até perda de 50% da rigidez.

O teste LAS indicou uma maior tolerância ao dano à medida que aumenta o teor de modificação. Nas misturas foram identificados desempenhos semelhantes. Foi realizada uma regressão linear para cada nível de deformação com os resultados de A35. A vida de fadiga obtida para as misturas com 600, 800 e 1000 *microstrains* apresentaram uma correlação boa a excelente (R^2 de 0,81, 0,91 e 0,87, respectivamente) com a tolerância ao dano dos ligantes.

Cao et al. (2018) avaliaram a resistência à fadiga de ligantes em relação a sua composição e estabeleceram a correlação de suas propriedades com as de misturas utilizando a abordagem viscoelástico linear do dano contínuo. As misturas asfálticas foram coletadas durante a construção de pistas de teste em grande escala, no total de 10, no qual incluíram HMA, WMA, espuma de asfalto, diferentes teores de RAP (20% e 40%) e RAS (20%) (*Reclaimed Asphalt Single*), ligantes bases com variados graus de desempenho, todas com granulometria constante. O teste de fadiga à tração direta foi utilizado para caracterizar as misturas, sendo utilizado para análise o parâmetro denominado sensibilidade à fadiga do material (*Material Fatigue Sensitive* – MFS), desenvolvido por Cao et al. (2017). O MFS é independente das condições de ensaio (temperatura, frequência, amplitude de deformação) e do Sf ou Cf (pseudo-módulo normalizado na falha), e representa o valor absoluto da inclinação log-log do envoltório de falha no gráfico N_f e ϵ_0 . Um menor valor de MFS indica maior resistência à fadiga.

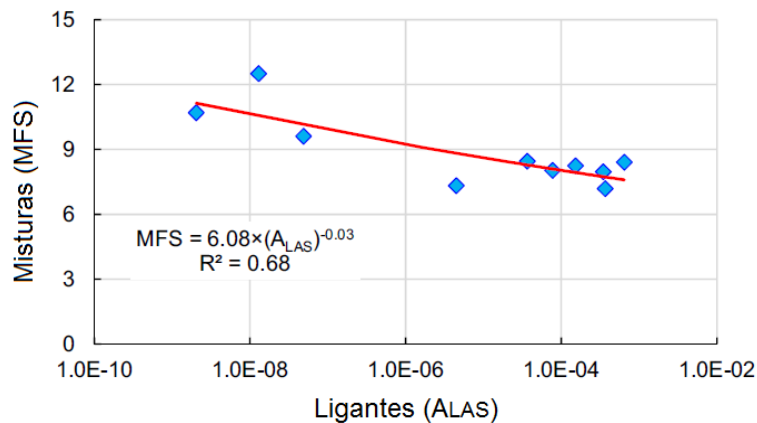
Os ligantes foram extraídos destas amostras ensaiadas, e avaliadas pelo teste LAS, com 100 ciclos a uma amplitude linear de 1% a 30% e taxa de 1% por etapa. O indicador de resistência à fadiga foi um parâmetro formulado pelos autores, A_{LAS} . Quanto maior o valor de A_{LAS} , maior a vida de fadiga.

A Figura 41 exibe a correlação da vida de fadiga entre as misturas (MFS) e os ligantes (A_{LAS}). Observa-se que os dois parâmetros são inversamente correlacionados, pois um menor

MFS representa maior resistência à fadiga dos ligantes. A relação entre os dois parâmetros é descrita razoavelmente através de uma lei de potência ($R^2=0,68$).

Os autores concluíram que o parâmetro A_{LAS} é um indicador razoável para caracterizar a resistência à fadiga de ligantes, com boa correlação com as misturas. Os dois parâmetros (A_{LAS} e MFS) indicaram uma tendência de menor vida de fadiga ao se incorporar maiores teores de RAP e RAS.

Figura 41 - Correlação entre os parâmetros de fadiga de ligantes e misturas



Fonte: Adaptado de Cao et al. (2018)

Pires (2018) comparou diversos parâmetros de fadiga de ligantes e misturas recicladas. Os ligantes foram caracterizados pelo teste LAS (varredura de frequência de 0,1 a 30 Hz com deformação de 0,1% e varredura de amplitude de 0,1 a 30% com 10 Hz), com os resultados calculados e interpretados pela abordagem VECD. O critério de falha corresponde à redução no $|G^*|$ inicial no pico da tensão cisalhante. As misturas foram ensaiadas pelo teste de fadiga à tração indireta, com níveis de tensão selecionados para obter uma falha por fadiga com uma variação de 1 a 100000 ciclos. A condição de falha é determinada como número total de aplicações de carga que causam a fratura completa da amostra ou deformação vertical maior que 9 mm.

O autor correlacionou o G-R, R-Value, Alfa (α), Nf x Strain Slope e Nf – LAS Strain dos ligantes com o Nf de 1.000.000 de ciclos, Nf de 100 microstrain e Nf x Strain Slope das misturas. As melhores correlações foram encontradas entre o R-Value e Nf de 100 microstrain ($R^2 = 0,75$), Nf x Strain Slope para ligantes e misturas ($R^2 = 0,96$) e Nf - LAS Strain e Nf de 100 microstrain ($R^2 = 0,87$).

Zhang et al. (2018) investigaram a aplicabilidade do teste MSCR em determinar a vida de fadiga de seis ligantes com diferentes tipos de modificação (SBS, borracha, e misturas

mornas – Sasobit, Evotherm M1 e 3G) e teores (1%, 2%, 3%, 5%, 10% e 15% para Sasobit e borracha; 4,5% para SBS e 0,6% para M1 e 3G), e também verificaram a sensibilidade do ensaio quanto ao tipo de ligante e diferentes condições de envelhecimento (TFOT e PAV). O teste no MSCR foi conduzido em dois níveis de tensão, 0,1 kPa por 20 ciclos seguido de 3,2 kPa por 10 ciclos, com um *creep* de 1s e *recovery* de 9s, a cada temperatura de 20°C, 25°C e 30°C. Somente o R3,2 foi analisado, pois é um nível de tensão mais crítico para o trincamento. Testes de fadiga em misturas, incluindo o índice de flexibilidade de flexão semi-circular – Illinois e resistência à tração indireta foram conduzidos utilizando um ligante base controle e AMP SBS.

A comparação entre os resultados de ligantes e misturas foram realizadas em três etapas: comparar os resultados de MSCR entre ligante base e ligante SBS em diferentes temperaturas e envelhecimento e obter-se um ranking (ligante base > SBS ou ligante base < SBS, seis comparações); comparar o desempenho das misturas com ligante base e SBS em diferentes condições de envelhecimento e obter um ranking (base > SBS ou base < SBS, 12 comparações); e por fim comparar os resultados de ligante e mistura. Adotou-se como critério de diferença o percentual de 20% (sem diferença significativa entre os pares). Quatro de seis pares de ligante mostram diferença percentual acima de 20% e para as misturas 11 de 12 também apresentaram valores acima de 20%.

Os autores concluíram que o teste de MSCR pode ser conduzido em temperaturas intermediárias (>20°C) com curvas de dados suaves e boa repetitividade, e o teste mostrou sensibilidade para diferenciar os aditivos e condições de envelhecimento. Além disso, o teste indicou um ranqueamento similar ao teste de fadiga das misturas.

Bessa et al. (2019) utilizaram parâmetros viscoelásticos lineares, o teste TS e LAS para classificar três ligantes (30/45 de penetração, um AMP por SBS e um AMP HiMA) em termos de fadiga. Uma mistura asfáltica densa preparada com o ligante 30/45 foi caracterizada em termos de diferentes abordagens do teste de fadiga e correlacionado aos testes de ligante. O parâmetro viscoelástico é baseado no $|G^*| \cdot \text{sen}\delta$. O TS foi conduzido à 20°C, 10 Hz e diferentes níveis de deformação (2%, 4% e 6% para o ligante 30/45 e 6%, 8% e 10% para os AMP), com critério de falha na perda de 50% da rigidez inicial. O teste LAS foi conduzido à 20°C, com análise dos resultados baseada na teoria S-VECD e o critério de falha foi o pico da tensão cisalhante. Para os ligantes, a ordem crescente de tolerância ao dano foi do ligante 30/85, AMP SBS e HiMA, com um R^2 de 0,96 entre os resultados dos dois testes.

A mistura com ligante 30/45 foi testada à tração indireta, flexão em viga de quatro pontos e no tração-compressão cíclico. Os resultados no teste de flexão em viga foram

analisados em diferentes abordagens: clássica que considera a diminuição da rigidez e no valor de pico do módulo normalizado; e na redução de 50% da rigidez inicial. Ambos apresentaram previsão de fadiga semelhante, pois os valores de N_f ficaram próximos da linha de igualdade. Os dados do teste de tração-compressão cíclico foram caracterizados em termos do modelo S-VECD. Foram geradas as curvas características de dano (C versus S) e as envoltórias de ruptura (G^R versus N_f). A vida de fadiga foi simulada pelo modelo proposto por Nascimento (2015) e pelo modelo do *Asphalt Institute*. A vida de fadiga devido à perda de 50% da rigidez foi maior que na simulada pelo modelo S-VECD, e a correlação entre ambos foi com um R^2 de 0,99.

Na comparação entre os resultados de ligante e mistura, os autores utilizaram o Fator de Fadiga de Ligantes (FFL – no teste LAS) e o Fator de Fadiga de Misturas (FFM – no teste tração-compressão cíclico). Foram utilizados nove ligantes e nove misturas de Martins (2014), e mais a mistura 30/45 dos autores. A correlação entre FFL e FFM apresentou R^2 de 0,75, porém um pouco afastada da linha de igualdade.

Também foram correlacionados os resultados do LAS (deformação de 2%, 4% e 6%) com o teste de flexão de vida em 4 pontos (400, 800 e 1200 microstrain e critério de falha em 50% da rigidez inicial). Foi suposto que a amplitude de deformação que um ligante está submetido em um pavimento real é de 50 vezes às amplitudes de deformação nas misturas asfálticas. Essa análise evidenciou uma equação linear com R^2 de 0,99, muito próxima a linha de igualdade, indicando que as vidas de fadiga de misturas podem ser previstas a partir dos ligantes.

Subhy et al. (2019) apresentaram os resultados de fadiga de diferentes misturas e seus ligantes recuperados. Duas fontes de RAP (RAa e RAb) foram utilizadas. Os ligantes foram avaliados pelo TS e as misturas pelo teste de fadiga à tração indireta. Os dados de fadiga foram avaliados com base na abordagem de energia dissipada acumulada (*Dissipated Energy Ratio* – DER), além da análise tradicional de fadiga. Cinco diferentes misturas recicladas (RAa1 – 30% RAP e 70% AMP; RAa2 - 60% RAP e 40% AMP; RAa3 - 60% RAP, 40% AMP e agente rejuvenescedor; RAb1 - 30% RAP, 70% 50/70 e agente rejuvenescedor; RAb1 - 60% RAP, 40% 50/70 e agente rejuvenescedor) e duas misturas de controle (RAa0 – com AMP, RAb0 – com 50/70), todas produzidas em usina, e seus respectivos ligantes extraídos foram utilizados para as análises. A tolerância (N_f) ao dano dos ligante foi em ordem crescente: RAb0, RAb1, RAb2, RAa2, RAa3, RAa1 e RAa0. Para as misturas, em ordem crescente foi: RAb0, RAb1, RAb2, RAa0, RAa3, RAa1 e RAa2. Observa-se uma tendência semelhante entre ligantes e misturas com o RAb, no entanto, foram diferentes para o RAa.

3 CALIBRAÇÃO DO PROCESSO DE RECUPERAÇÃO DE LIGANTES ASFÁLTICOS NO EVAPORADOR ROTATIVO ATRAVÉS DE ANÁLISE REOLÓGICA E DE DESEMPENHO

3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A determinação das propriedades reológicas e de desempenho de ligantes asfálticos é essencial para o desenvolvimento de misturas asfálticas duráveis, pois suas propriedades contribuem para a tolerância a mecanismos de danificação de acordo com a temperatura, velocidade e cargas do tráfego (DI BENEDETTO et al., 2002; SAFEI, 2017; BEHNOOD, 2019; BEHNOOD e GHAREHVERAN, 2019). Esses testes podem ser realizados em diferentes estágios: em ligantes virgens, após usinagem, compactação e ao final da vida de serviço da camada asfáltica. Após a produção em usina, a análise ou testes no ligante asfáltico é possível somente a partir de sua extração e recuperação da massa asfáltica.

A extração e a recuperação do ligante podem ser exploradas para diferentes finalidades: para investigação forense ou como forma de verificar se o ligante correto foi utilizado durante a produção (WAKEFIELD et al., 2018); desenvolvimento de novos materiais (CAVALLI et al., 2018; BLANC et al., 2019; MANKE et al., 2019; ZHOU et al. 2019); desenvolvimento e calibração de métodos experimentais para simulações de campo/laboratório (TRAN et al., 2017; SAFI et al., 2019; ZAUMANIS et al., 2019; QIAN et al., 2020); análise da influência do envelhecimento nas propriedades dos materiais (ZHANG, YU e WU, 2010; SIRIN et al., 2017; RAHBAR-RASTEGAR et al., 2019; SALEH, et al., 2020) e, finalmente, para a reciclagem do material RAP (ZHANG et al., 2019; GUDURU et al., 2020; SUBHY et al., 2020).

Durante a usinagem, transporte, espalhamento, compactação e vida de serviço da mistura asfáltica, o ligante sofre um processo de envelhecimento termo-oxidativo associado aos seguintes mecanismos: oxidação, volatilização, polimerização, foto-oxidação, tixotropia e sinérese (AIREY, 2003; LESUEUR, 2009; HU et al., 2018; NIE et al., 2018; TAUSTE et al., 2018). A velocidade de reação desses mecanismos depende de fatores como as características dos agregados, o volume de vazios, a composição química do ligante, as condições ambientais e climáticas, e resultam em mudanças na composição química, reológica e na performance do material (SOENEN et al., 2016; MORENO- NAVARRO et al., 2018; SIRIN et al. 2019; JING et al., 2020). A volatilização de frações leves de asfalto, o aumento da rigidez e da elasticidade levam ao desenvolvimento falhas prematuras por trincamento térmico e por fadiga (ELWARDANY et al. 2016; RAD et al. 2017). Neste caso, a investigação do envelhecimento

e a calibração do procedimento para simulação em laboratório envolve a extração e a recuperação do ligante asfáltico a partir da massa asfáltica.

Além disso, a extração e a recuperação também são essenciais para projetar misturas asfálticas com alto teor de *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP) (ALI et al., 2016; IM, KARKI e ZHOU, 2016; MANGIAFICO et al., 2017; NAYAK e SAHOO, 2017). As características do ligante envelhecido exercem influência no comportamento e no desempenho da mistura reciclada (NOROUZI et al., 2017; ZAUMANIS, CAVALLI e POULIKAKOS, 2019; ROJA, MASAD e MOGAWER, 2020), que requer a determinação das propriedades do ligante RAP para prever o comportamento quando combinado com o ligante virgem e o agente rejuvenescedor (WALTHER, BUCHLER e FALCHETTO, 2019; HOSSAIN, ROY e RASHID, 2020; GUDURU et al., 2021).

Diferentes métodos para extração e recuperação de ligantes asfálticos podem ser encontrados na literatura. Os três principais métodos de extração (que separam o aglutinante dos agregados) são centrifugação, refluxo e vácuo. Para a recuperação, que separa o solvente do ligante, os procedimentos mais conhecidos são o método Abson e o processo realizado em evaporador rotativo. Um procedimento adicional de filtração ou centrifugação é realizado entre a extração e a recuperação para remoção dos finos (<0,063 mm). Finalmente, os solventes utilizados para remover o ligante dos agregados são: tricloroetileno, tolueno, monoetileno e diclorometano (MIKHAILENKO, ATAEIAN e BAAJ, 2020).

Diversas pesquisas relatam problemas no processo de recuperação do ligante asfáltico ou alterações nas propriedades devido à ação dos solventes para justificar resultados não esperados na determinação da propriedade real do material (NCHRP 09-12, 2000; NOESLER, TANGHE e SONEN, 2008; HOSPODKA et al., 2018; RODEZNO e JULIAN, 2018; WAKEFIELD et al. 2018; GUDURU, TAVVA e KUNA, 2020). Assim, uma caracterização incorreta do material pode comprometer projetos conduzidos para as diferentes finalidades citadas anteriormente, pois pode levar à subestimação ou superestimação da rigidez real do material e do seu nível de envelhecimento.

Três fatores principais no processo de recuperação do ligante podem comprometer a análise do material: a alteração nas propriedades químicas dos ligantes em contato com os solventes, a presença de solvente residual e, por fim, o envelhecimento adicional devido ao processo (BURR et al., 1990; BURR et al., 1991; PETERSON et al., 1999; DIEFENDERFER, 2014; ZIYANI et al., 2017; MIKHAILENKO, ATAEIAN e BAAJ, 2019).

As normas ASTM D 5404 (2017) e BS EN 12697-3 (2018) que fornecem as diretrizes do processo e os estudos relatados na literatura não consideram os efeitos das diferentes

características dos ligantes quanto a presença de modificação e o nível de envelhecimento na condução e na determinação do tempo necessário para finalização do processo. A observação e a experiência do operador por si só não são suficientes para garantir que todo o solvente seja removido durante o processo de recuperação. Os testes reológicos, de deformação permanente e de fadiga em ligantes podem fornecer resultados e comparações numéricas que aumentem a confiabilidade quanto a eliminação total do solvente sem envelhecimento adicional, além do teste químico de *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR), amplamente utilizado para avaliar a presença de solventes residuais (DIEFENDERFER, 2014; MIKHAILENKO, WEBBER e BAAJ, 2019).

Assim, o objetivo geral deste capítulo foi avaliar se os testes reológicos, de deformação permanente e de fadiga em ligantes asfálticos podem ser aplicados como ferramenta para calibração da recuperação de diferentes tipos de ligantes no evaporador rotativo, com a aplicação de parâmetros pré-definidos (rotação, vácuo, temperatura de banho e fluxo de nitrogênio) e diferentes tempos de destilação. Para isso, os seguintes objetivos específicos foram definidos:

- a) Analisar se o tipo, modificação e grau de envelhecimento do ligante asfáltico influenciam no tempo de destilação do Tricloroetileno (TCE) no evaporador rotativo por meio de análises químicas, reológicas e de desempenho;
- b) Verificar a influência do solvente residual nas propriedades dos ligantes asfálticos após a recuperação;
- c) Determinar se testes reológicos e de desempenho em ligantes asfálticos são eficientes para calibrar um procedimento de recuperação que resulte na evaporação completa do solvente sem promover envelhecimento adicional.

A calibração do procedimento de recuperação permitiu a recuperação dos ligantes asfálticos dos materiais RAP para o desenvolvimento do programa experimental do Capítulo 4.

3.2. MATERIAIS

Quatro ligantes asfálticos foram selecionados para atingir os objetivos do estudo: dois ligantes virgens e dois ligantes extraídos e recuperados de duas fontes de RAP. Os ligantes

virgens são um não modificado (denominado de Neat) e um modificado pelo polímero estireno-butadieno-estireno (denominado de SBS), cujas propriedades estão na Tabela 4.

Tabela 4 – Caracterização dos ligantes asfálticos Neat e SBS

Testes	Norma	Ligante	
		Neat	SBS
Penetração	DNIT ME 155 (2010)	56 dmm	48 dmm
Ponto de amolecimento	NBR 6560 (2016)	49°C	60°C
Recuperação elástica	DNER ME 382 (1999)	0%	86%
Performance Grade (PG)	AASHTO M 320 (2017)	58S-16	64V-22
PG contínuo	-	63,9	68,3
Nomenclatura utilizada na condição RTFOT		Neat REF	SBS REF

Duas fontes de materiais RAP foram obtidas nas rodovias brasileiras (RS 400 e BR 290) após a fresagem de uma camada superficial de pavimentos flexíveis ao fim de sua vida de serviço (aproximadamente 10 anos), compostos por um ligante não modificado (Neat) e modificado com SBS, respectivamente. Os ligantes RAPs possuem mesma classificação dos ligantes do primeiro estágio, no entanto, não possuem a mesma origem. O procedimento de extração foi realizado de acordo com o Procedimento A da ASTM D 2172 (2017), procedendo com decantação e filtração de alta qualidade. Os dados de caracterização dos materiais RAP estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Características das duas fontes de material RAP

Propriedades	Normas	Fonte RAP	
		RS 400 Neat	BR 290 SBS
Teor de ligante	ASTM D 2172 (2017)	5,38%	5,76%
Gmm	ASTM D 2726 (2017)	2,674 g/cm ³	2,542 g/cm ³
DoA ¹	Pires et al. (2020)	170°C	170°C
ITT no DoA ²	DNIT ME 136/2010	2,37 MPa	2,04 MPa
Nomenclatura		RAP Neat	RAP SBS

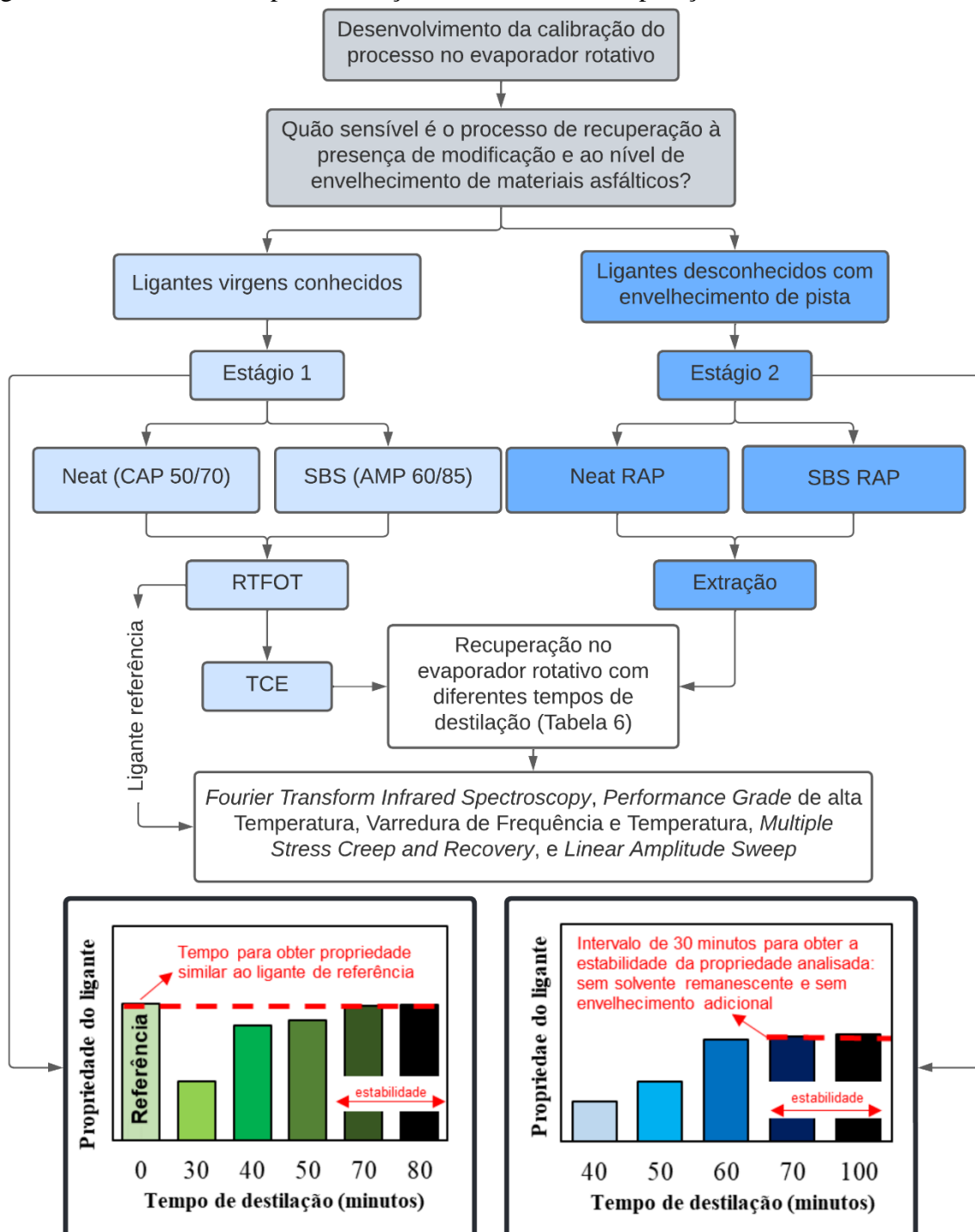
¹ Temperatura de máximo grau de ativação (DoA); ² Resistência à tração indireta na temperatura de máximo DoA.

O TCE foi o solvente utilizado neste estudo, pois apresenta um bom desempenho na extração com os maiores teores de aglutinante para asfalto modificado com polímero e RAP, explicando sua popularidade na indústria (MIKHAILENKO e BAAJ, 2017; MIKHAILENKO, WEBBER e BAAJ, 2019).

3.3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

O método experimental foi dividido em duas etapas para atingir os objetivos propostos: um primeiro estágio com os ligantes conhecidos e um segundo estágio com os ligantes desconhecidos, conforme plano apresentado na Figura 42.

Figura 42 – Plano de teste para avaliação do sistema de recuperação



No primeiro estágio, dois ligantes virgens foram envelhecidos no curto prazo pelo *Rolling Thin Film Oven Test* (RTFOT) (ASTM D 2872, 2019) e misturados em uma proporção de 1/12 gramas de ligante por ml de TCE (semelhante a quantidade de solvente necessária para extrair a mesma quantidade de aglutinante de uma mistura de asfalto usando uma centrífuga). As amostras (solvente + ligante) foram submetidas a um processo de recuperação por um período inicial de 30 min em evaporador rotativo, com aumento no tempo de destilação até a obtenção das propriedades do ligante original e estabilização dentro de um intervalo de 10 minutos.

Na segunda etapa, os ligantes asfálticos extraídos de duas fontes de RAPs foram submetidos ao mesmo processo iterativo para verificar se materiais com maiores níveis de envelhecimento exigem maiores tempos de destilação no evaporador rotativo. Foram dados incrementos no tempo de destilação até obtenção da estabilização das propriedades analisadas em um intervalo de 30 minutos. Por não se conhecer as propriedades atuais desses ligantes, pressupõe-se que a estabilização das propriedades em um intervalo de 30 minutos é suficiente para garantir a completa evaporação do solvente sem promover envelhecimento adicional nos materiais. Para efeito comparativo, os dois ligantes RAPs também foram recuperados conforme procedimento da ASTM D 5404 (2017), com paralização do processo por meio de uma análise visual.

3.4. PROCEDIMENTO DE RECUPERAÇÃO E TESTES

As condições de extração volumétrica aplicadas no evaporador rotativo foram definidas como 600 mL de solução em um frasco de 2.000 mL. Os demais parâmetros associados a este processo e os tempos de destilação para cada ligante estão detalhados na Tabela 6.

Todos os testes foram conduzidos após recuperação no evaporador rotativo. Os materiais foram avaliados por meio de testes no FTIR, varredura de frequência e temperatura dentro do domínio LVE, *Performance Grade* de alta (*PGH*), *Multiple Stress Creep and Recovery* (MSCR), e *Linear Amplitude Sweep* (LAS).

3.4.1. Fourier Transform Infrared Spectroscopy

Fourier transform infrared spectroscopy é utilizado para identificar ligações químicas moleculares e quantificar a concentração de grupos funcionais em ligantes asfálticos, o que explica diferentes fenômenos comportamentais e, principalmente, a presença de solvente

residual no material após o processo de recuperação (Bowers, et al., 2014; Ge et al., 2017). O teste foi realizado em espectrômetro FTIR Spectrum 400, com faixa de espectro de 650–4000 cm^{-1} . A partir dos resultados dos testes, os grupos funcionais do TCE na área do pico em torno do número de onda de 837 cm^{-1} e 928 cm^{-1} foram usados para avaliar a existência de solvente nos ligantes asfálticos recuperados.

Tabela 6 - Parâmetros adotados no processo de recuperação e designações dos ligantes

Parâmetro	Procedimento			
Temperatura do banho	140 \pm 3°C			
Rotação do balão	40 rpm			
Fluxo de nitrogênio	500 mL/min			
Vácuo	<ul style="list-style-type: none"> ● 0 a 5 minutos: 600 mm Hg; ● 5 a 10 minutos: redução gradual do vácuo até abaixo de 100 mmHg com uma taxa de evaporação que evite o refluxo da solução na serpentina; Restante do processo: abaixo de 100 mmHg.			
Tempo de destilação no evaporador rotativo	Designação dos ligantes			
	Primeiro estágio		Segundo estágio	
	Neat	SBS	Neat RAP	SBS RAP
0 minutos (referência)	Neat REF	SBS REF	-	-
30 minutos	Neat 30	SBS 30	-	-
40 minutos	Neat 40	SBS 40	-	-
50 minutos	Neat 50	SBS 50	Neat RAP 50	-
60 minutos	-	-	Neat RAP 60	-
70 minutos	-	SBS 70	Neat RAP 70	SBS RAP 70
80 minutos	-	SBS 80	-	SBS RAP 80
90 minutos	-	-	-	SBS RAP 90
100 minutos	-	-	Neat RAP 100	SBS RAP 100
ASTM 5404 (2017) ¹	-	-	Neat RAP ASTM	SBS RAP ASTM

¹ Tempo de destilação entre 40 e 45 minutos.

3.4.2. Performance Grade de alta temperatura

O PGH foi obtido pela determinação do módulo de cisalhamento dinâmico $|G^*|$ e do ângulo de fase δ no Reômetro de Cisalhamento Dinâmico - DSR (Anton Paar MCR 502) sob diferentes condições de teste. Os ligantes de primeiro estágio foram testados de acordo com a AASHTO M 320 (2017) ($|G^*|/\text{sen } \delta \geq 1$ kPa na condição original e $|G^*|/\text{sen } \delta \geq 2,2$ kPa na condição RTFOT), e os ligantes de segundo estágio de acordo com a AASHTO M 332 (2019) ($|G^*|/\text{sen } \delta \geq 1$ kPa na condição original).

3.4.3. Caracterização viscoelástica linear

As propriedades reológicas dos ligantes foram avaliadas no DSR de acordo com a AASHTO T 315 (2016). Os testes foram realizados em uma faixa de temperatura (-5 a 65 °C)

em incrementos de 10 ° C nas seguintes condições: geometria da placa de 8 mm e gap de 2 mm (5 a 35 ° C) e geometria de 25 mm com gap de 1 mm (35 a 65 ° C); em frequência de rampa logarítmica ascendente (0,1 a 30 Hz), em um modelo controlado por deformação dentro da faixa viscoelástica linear dos materiais. Os valores do módulo de cisalhamento dinâmico $|G^*|$ e ângulo de fase δ foram obtidos a partir do ensaio. As curvas mestras de módulo de cisalhamento dinâmico e ângulo de fase foram construídas aplicando o princípio de superposição tempo-temperatura (TTSP) em uma temperatura de referência de 25 ° C.

3.4.4. Multiple Stress Creep and Recovery

Os materiais foram submetidos a 20 ciclos de fluência (1s) e recuperação (9s) com tensão de cisalhamento constante (0,1 kPa), seguidos de 10 ciclos com tensão de cisalhamento constante de 3,2 kPa. Os valores de J_{nr} e $R\%$ foram determinados. A partir dos resultados de J_{nr} (3.2), os ligantes foram classificados quanto ao nível de tráfego de acordo com AASHTO M 332 (2019) como extremamente pesado ($J_{nr3.2} < 0,5$), muito pesado ($0,5 < J_{nr3.2} < 1,0$), pesado ($1,0 < J_{nr3.2} < 2,0$) e padrão ($2,0 < J_{nr3.2} < 4,5$). Os ligantes do primeiro estágio foram testados na temperatura PGH, enquanto os ligantes do segundo estágio foram testados a 82 °C, 88 °C e 94 °C.

3.4.5. Linear amplitude sweep

O teste LAS foi conduzido em duas etapas. Na primeira, o teste de varredura de frequência foi ministrado a fim de obter informações sobre as propriedades do material não danificado, sendo determinada a taxa de evolução do dano α (Equação 3).

$$\alpha = \frac{1}{1 + m} \quad (3)$$

Onde, m : valor absoluto da inclinação log-log máxima do módulo de relaxação viscoelástico linear.

Na segunda etapa, os materiais foram submetidos a uma varredura de deformação com amplitude linear (0,1 a 30%) em 310 ciclos de carregamento e frequência constante de 10 Hz. Duas temperaturas de testes foram utilizadas, 19°C para os ligantes do primeiro estágio e 25°C para os ligantes do segundo estágio, pois os ligantes RAPs ensaiados à 19°C apresentaram um

mecanismo de falha por baixa adesão devido à alta rigidez. Este fato está relatado em Safaei e Castorena (2016), que recomendou o limite de 12 a 60 MPa para uma fratura coesiva do teste.

Os resultados do teste forneceram os parâmetros necessários para estimativa do dano por fadiga utilizando o modelo viscoelástico linear de dano contínuo simplificado (S-VECD). A relação característica de dano, que descreve a perda de integridade do material como resultado do acúmulo de dano, foi determinada pela Equação 4.

$$C_i = \frac{|G^*|_i}{|G^*|_{LVE} \cdot DMR} \quad (4)$$

Onde, C: módulo de cisalhamento dinâmico normalizado; i: número de ciclo; $|G^*|_i$: é o módulo danificado obtido do teste LAS como a razão da amplitude de tensão e amplitude de deformação; $|G^*|_{LVE}$: módulo de cisalhamento dinâmico viscoelástico linear (LVE) nas condições específicas de temperatura e frequência do teste LAS; DMR: faixa de módulo dinâmico na faixa de 0,9 a 1,1.

O acúmulo de dano induzido por cisalhamento oscilatório no teste foi determinado pela Equação 5.

$$\Delta S_i = \left[\frac{DMR}{2} (\gamma_i^R)^2 (C_{i-1} - C_i) \right]^{\frac{\alpha}{1+\alpha}} \cdot [t_i - t_{i-1}]^{\frac{1}{1+\alpha}} \quad (5)$$

Onde, ΔS_i : incremento na intensidade do dano; t: tempo reduzido; γ^R : amplitude de pseudo-deformação dado pela Equação 6.

$$\gamma_i^R = \gamma_i \cdot |G^*|_{LVE} \quad (6)$$

As curvas características de dano dos materiais (C vs S) foram ajustadas pelo modelo de potência dado pela Equação 7.

$$C = 1 - C_1 (S)^{C_2} \quad (7)$$

Onde, C_1 e C_2 são os coeficientes da regressão. A definição de falha utilizada foi o pico de $C^2 \cdot N \cdot (1-C)$, o qual é sensível em captar a modificação e o nível de envelhecimento do material, compatível com as variáveis aqui analisadas (CAO e WANG, 2018).

Análises de fadiga podem fornecer índices confiáveis para avaliar qualitativamente o processo de recuperação no evaporador rotativo, pois a presença de solvente residual, a modificação e o envelhecimento alteram a rigidez dos ligantes, e conseqüentemente, a tolerância ao dano que pode ser verificada tanto no ciclo de falha do material ou pelas curvas C vs S.

3.5. RESULTADOS

3.5.1. Fourier Transform Infrared Spectroscopy

O TCE é um solvente eficaz para extração de aglutinante. A presença remanescente de TCE após o processo de recuperação foi avaliado pelo teste de FTIR a partir da identificação da onda de pico em 837 cm^{-1} e 928 cm^{-1} . As Figura 43 e Figura 44 exibem os resultados da espectroscopia dos ligantes de primeiro e segundo estágios, respectivamente. Cada figura inclui o espectro de TCE e, nos ligantes de primeiro estágio, os espectros dos ligantes de referência (ligante sem e com SBS) são apresentados. A espectroscopia de TCE indicou picos entre as seguintes bandas: 3060–3110 cm^{-1} (alceno = C-H); 1600–1540 cm^{-1} (alceno C = C); 700-1000 cm^{-1} (alceno = C-H); 650-800 (haleto de alquil C-Cl). A análise química indica que os tempos iniciais de destilação foram suficientes para promover a evaporação completa do TCE, pois não foram identificados picos correspondentes ao solvente, principalmente entre ondas e 820-860 cm^{-1} e 900–960 cm^{-1} .

Diefenderfer (2014) comparou as três espectroscopias de ligantes bases com as dos mesmos ligantes misturados com brometo de n-propil (nPB) e recuperados por um evaporador rotativo e pelo método Abson. Ambos os métodos alteraram significativamente as propriedades do ligantes verificadas pela comparação de bandas de ligantes recuperados e ligantes bases não recuperados. No entanto, o autor também não identificou a presença de solvente residual pelo teste de FTIR, indicando que o solvente pode estar presente em concentrações tão baixas que os picos de ligante os ultrapassam na varredura infravermelha.

Figura 43 –FTIR dos ligantes Neat (a) and SBS (b) do primeiro estágio

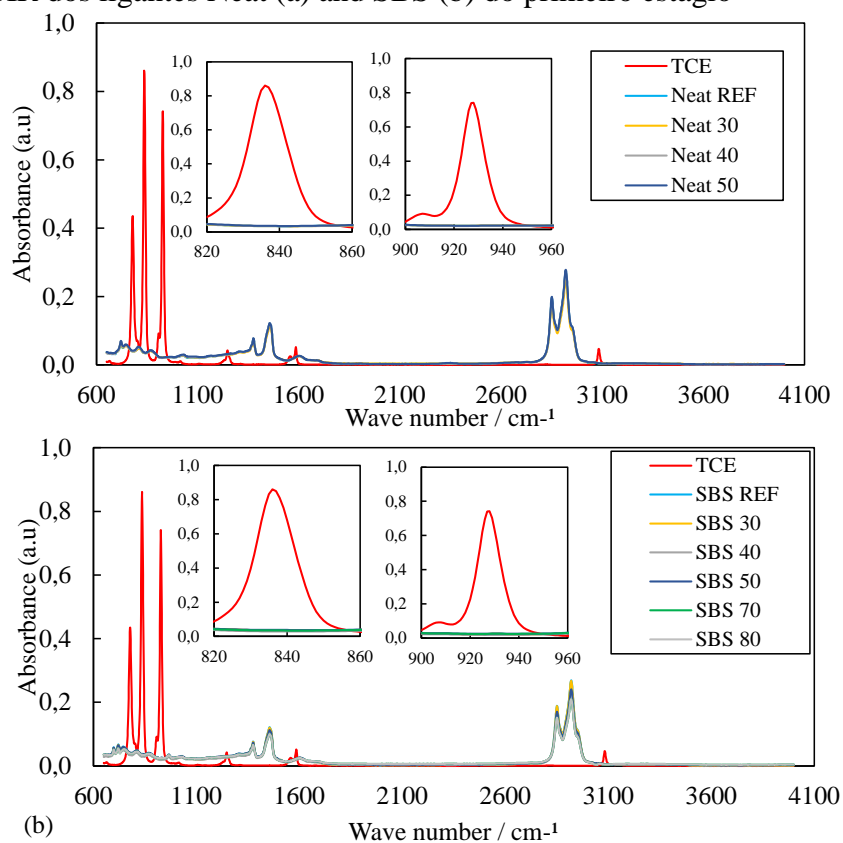
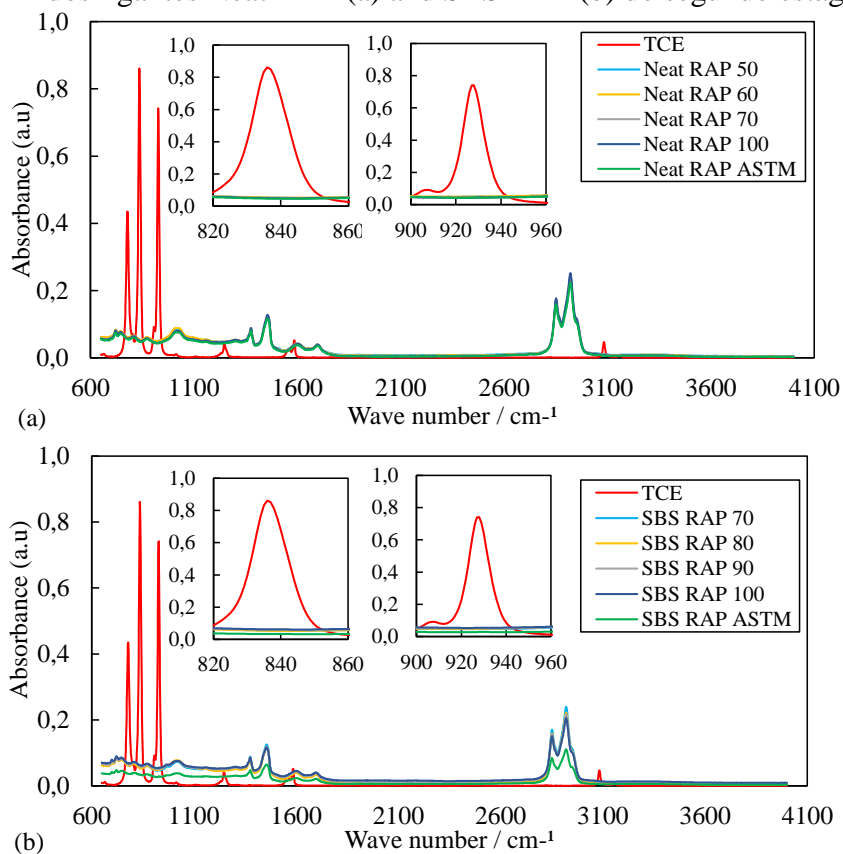


Figura 44 –FTIR dos ligantes Neat RAP (a) and SBS RAP (b) do segundo estágio



Ge et al. (2019) analisaram os espectros de dois ligantes PG 58-28 (virgem e envelhecido em PAV) com a adição de 1%, 2%, 3%, 4%, 5% e 6% de TCE. Os autores identificaram um aumento na onda de pico nas bandas de 820–860 cm^{-1} e 900-960 cm^{-1} com maior conteúdo de solvente. No entanto, a extração de uma mistura asfáltica não é representada com a relação aglutinante/solvente aplicada na pesquisa dos autores. Os teores de 1% a 6% de TCE podem ser maiores do que a quantidade restante após a recuperação, pois uma diminuição da ordem de 39% a 89% no valor de $|G^*|/\text{sen } \delta$ (58 °C) é observada com o aumento do conteúdo de TCE. Os resultados que estão apresentados na seção 3.5.2, os ligantes do primeiro e segundo estágios que indicam ter solvente remanescente reduziram o $|G^*|/\text{sen } \delta$ na ordem de 34% (SBS 30 @58 °C) para 46% (Neat RAP ASTM @ 88 °C), respectivamente.

Noesler, Tanghe e Sonen (2008) identificaram que 1% de solvente remanescente em uma amostra de ligante altera significativamente as propriedades físicas e reológicas do material. Além disso, os autores relatam que a reologia é muito sensível à presença de pequenas quantidades de solvente.

Portanto, a análise química do FTIR para calibrar o procedimento de recuperação pode não fornecer resultados confiáveis, pois, nos estudos que tratam do assunto, a presença do solvente é capturada apenas em altas concentrações no ligante asfáltico. Além disso, mesmo em baixas concentrações, o solvente altera as propriedades reológicas e de desempenho, conforme discutido nas seções a seguir.

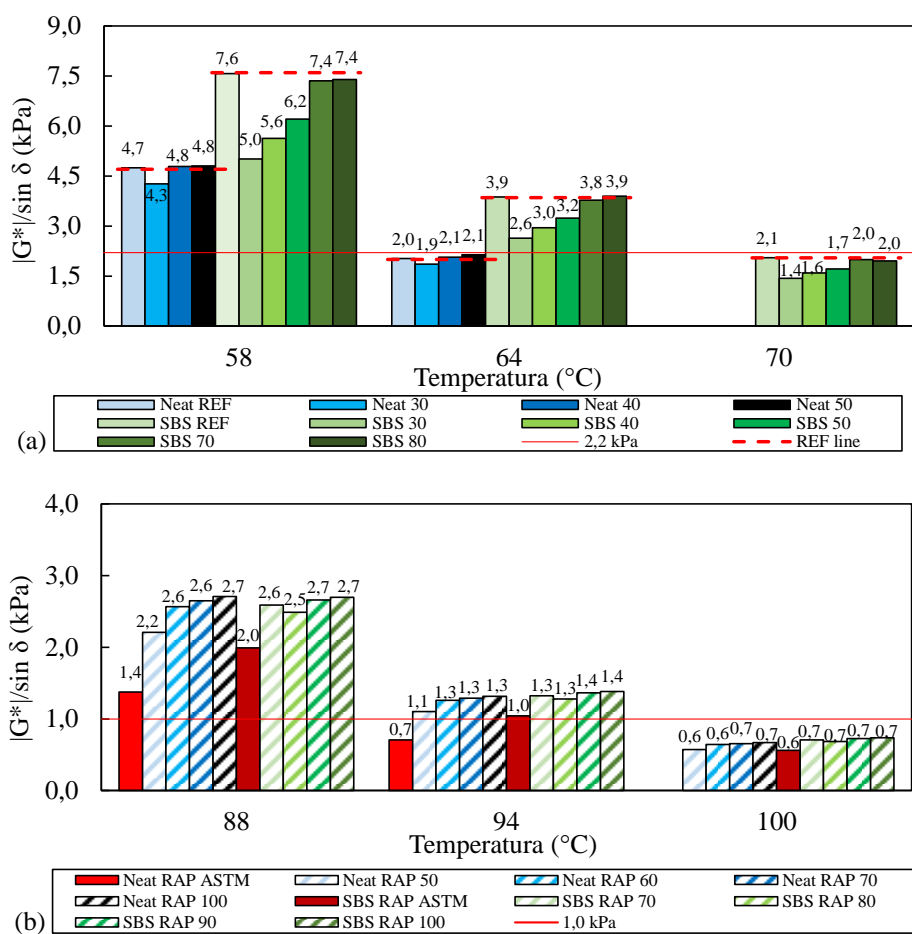
3.5.2. Performance Grade de alta temperatura

As relações $|G^*|/\text{sen } \delta$ nas temperaturas de teste até a falha estão apresentadas na Figura 45 para os ligantes do primeiro (a) e do segundo estágio (b). A presença de SBS no ligante exigiu um tempo de destilação mais longo do que o ligante sem modificação para atingir as condições do aglutinante original em termos de $|G^*|/\text{sen } \delta$, com 40 e 70 min sendo o mais adequado para aglutinantes puros e modificados, respectivamente. O processo de recuperação e o TCE não resultaram em envelhecimento adicional ou alteração de $|G^*|/\text{sen } \delta$ após estes tempos de destilação. Em amostras com o solvente remanescente, o TCE reduziu o valor de $|G^*|/\text{sen } \delta$ em 8% a 10% para o ligante Neat 50 e de 16% a 34% para os ligantes SBS 50 e 70, respectivamente.

A diferença no tempo de processamento promovida pelo polímero não foi identificada nas duas fontes de RAP, possivelmente devido à degradação do material com o envelhecimento em campo, afetando sua cadeia polimérica que proporciona mais elasticidade ao ligante

asfáltico. Considerando um intervalo de processamento de 30 min (70 e 100 min), existe uma relação constante entre $|G^*|/\sin \delta$ de ambos os ligantes RAP, indicando evaporação completa do TCE sem promover envelhecimento adicional nas amostras. Porém, em comparação com a metodologia da ASTM, uma diferença mais significativa foi encontrada devido ao solvente remanescente, com redução em $|G^*|/\sin \delta$ de 46% para Neat RAP ASTM e 26% para SBS RAP ASTM (@ 88°C) em comparação aos ligantes nos tempos de destilação de 70 minutos.

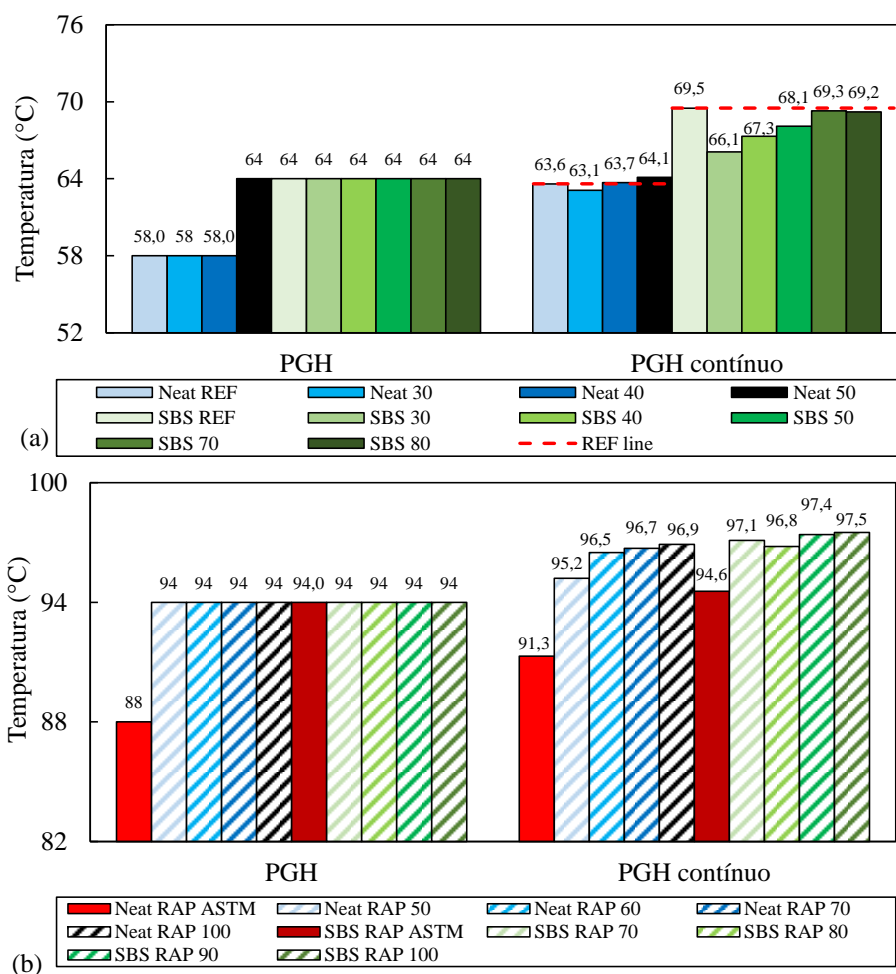
Figura 45 - $|G^*|/\sin \delta$ em diferentes temperaturas para os ligantes do primeiro estágio (a) e segundo estágio (b)



A Figura 46 exibe o PGH e o PGH contínuo para os ligantes do primeiro (a) e segundo estágio (b). A partir do PGH não se identifica a variação entre os tempos de destilação, com exceção do ligante Neat RAP ASTM, que reduz o valor de PGH de 94 °C para 88 °C. O PGH contínuo (Figura 5b) permite diferenciar os ligantes como resultado do solvente remanescente. Os tempos de destilação de 40 min e 70 min para os ligantes Neat e SBS, respectivamente, foram suficientes para se obter as propriedades dos ligantes originais, indicando a evaporação

completa do solvente. Nos ligantes de segundo estágio, o PGH contínuo permaneceu praticamente inalterado no intervalo entre os tempos de 70 e 100 minutos (coeficiente de variação menor que 0,3% entre os dados), indicando a ausência de solvente e a não existência de envelhecimento adicional no processo. O procedimento pela ASTM resultou em redução no PGH contínuo na ordem de 5,4°C para o Neat RAP ASTM e 2,5°C para o SBS RAP ASTM em relação aos ligantes com 70 minutos de destilação.

Figura 46 – PGH e PGH contínuo para os ligantes do primeiro estágio (a) e segundo estágio (b)



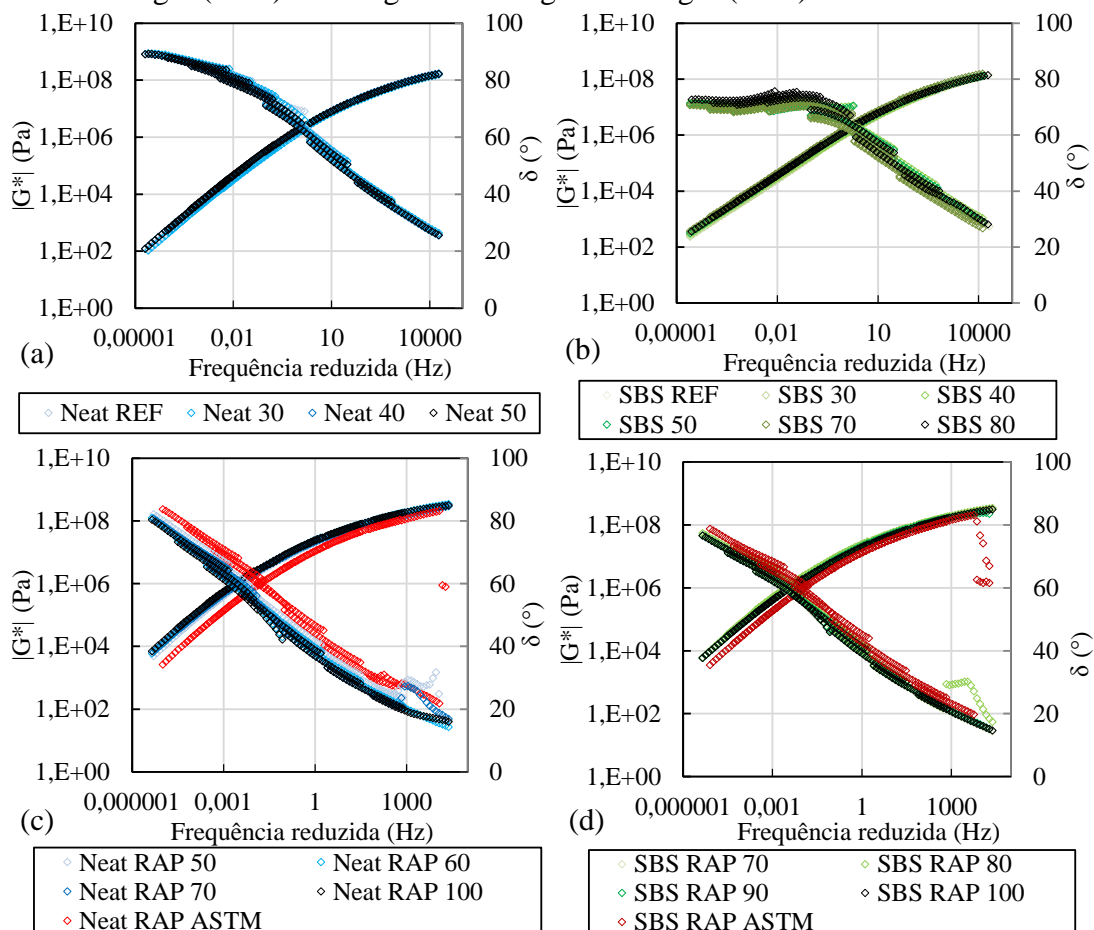
De modo geral, a relação $|G^*|/\text{sen } \delta$ e o PGH contínuo exibiram sensibilidade na análise das variáveis estudadas: o solvente remanescente e o envelhecimento adicional dos ligantes. Estudos reportam alteração no PGH contínuo durante o processo de recuperação. Abuhassan et al. (2019) observaram redução de 4 °C até 10,9 °C em PGH contínuo após a recuperação de quatro ligantes asfálticos misturados com TCE. Hossain et al. (2012) atribuíram o efeito do TCE a um aumento no PGH dos ligantes recuperados do RAP. Assim, incertezas quanto a finalização do processo padronizado e a real caracterização do material recuperado podem

comprometer o desempenho da mistura reciclada, pois de acordo com a AASHTO M 323 (2017), a dosagem do agente rejuvenescedor e a escolha do ligante são baseadas no gráfico de mistura PGH entre o novo ligante e o ligante RAP.

3.5.3. Caracterização viscoelástico linear

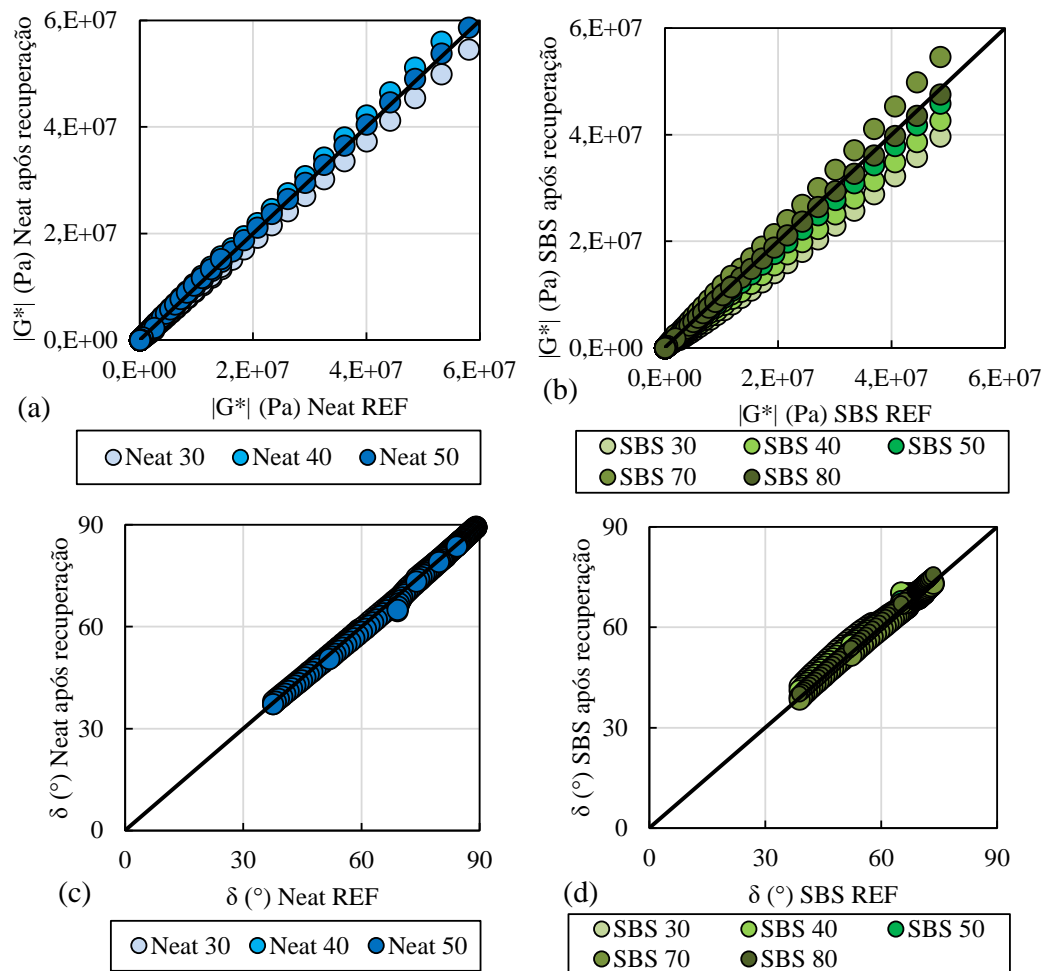
As curvas mestras do módulo de dinâmico e ângulo de fase foram construídas a partir da aplicação do TTSP em torno da temperatura de 25 °C. A Figura 47 apresenta os resultados para os ligantes Neat (a) e SBS (b) do primeiro estágio, e ligantes RAP Neat (c) e SBS RAP (d) do segundo estágio, em seus diferentes tempos de destilação. Uma análise direta dos dados não permite identificar diferença entre os tempos de processamento, exceto para os dois ligantes RAP ASTM. O solvente residual já identificado no $|G^*|/\text{sen } \delta$ e no PGH contínuo reduziu a viscosidade desses ligantes asfálticos, resultando em redução da rigidez e aumento do ângulo de fase na faixa de frequências e temperaturas do ensaio.

Figura 47 - Curvas mestras do módulo de cisalhamento dinâmico e ângulo de fase dos ligantes do primeiro estágio (a e b) e dos ligantes do segundo estágio (c e d).



Uma análise comparativa dos valores absolutos de rigidez (a e b na Figura 48) e ângulo de fase (c e d na Figura 48) foi realizada entre os ligantes de referência (REF Neat e SBS REF) e ligantes recuperados com diferentes tempos de destilação (ligantes do primeiro estágio). O aumento no tempo de processamento aproxima a rigidez dos ligantes recuperados aos seus respectivos ligantes de referência. Os valores do ângulo de fase convergem sobre a linha de igualdade; ou seja, a presença de um solvente não resultou em desvios significativos nos valores do ângulo de fase dos ligantes analisados.

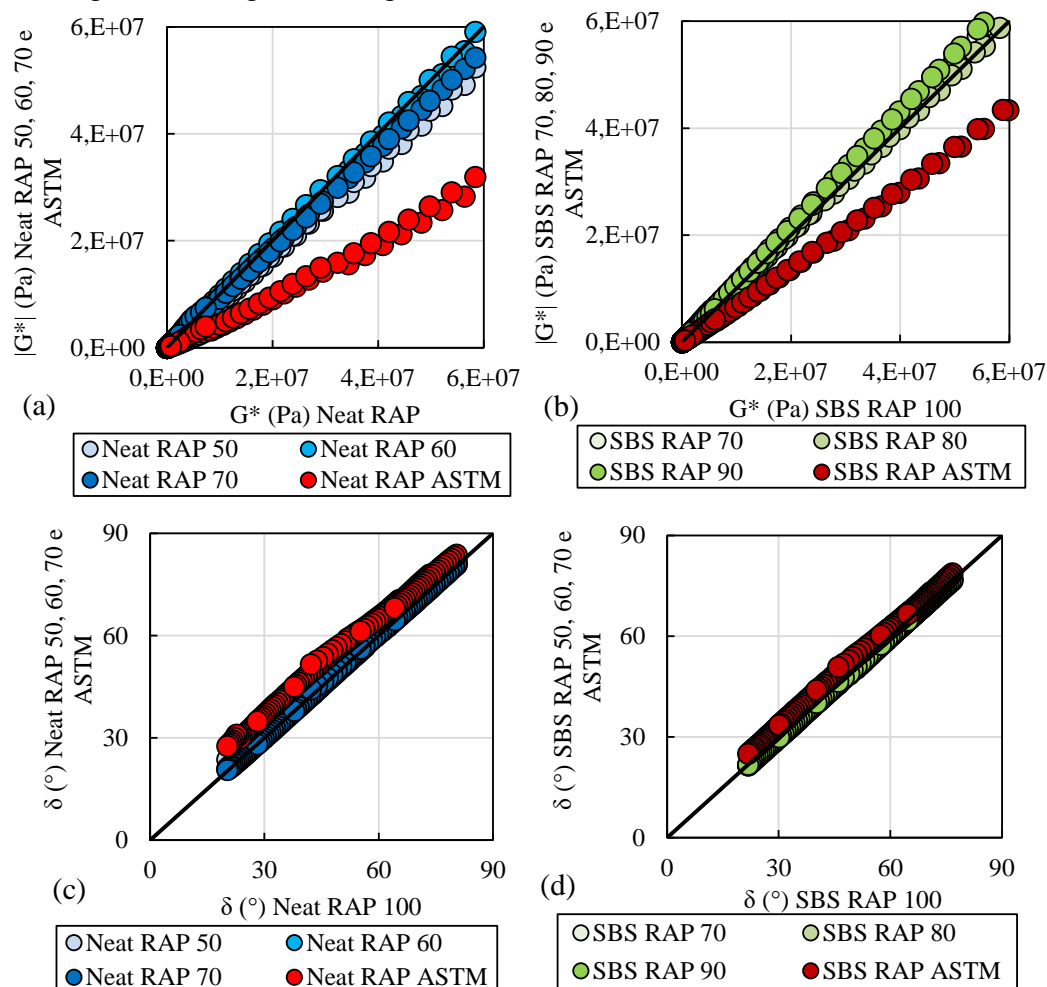
Figura 48 - Gráficos de igualdade do módulo de cisalhamento dinâmico (a e b) e ângulo de fase (c e d) dos ligantes do primeiro estágio.



Uma análise similar foi realizada para os ligantes de segundo estágio, adotando como referência o tempo de 100 min de destilação. Com exceção dos ligantes recuperados conforme a ASTM, identifica-se a partir da Figura 49 que os dados experimentais de $|G^*|$ (a e b) e δ (c e d) convergem sobre a linha de igualdade entre os tempos 70 e 100 minutos, o que indica ausência de solvente residual e envelhecimento adicional. Os dois ligantes ASTM exibem um

desvio considerável das linhas de igualdade principalmente em termos de $|G^*|$, sendo resultado do efeito amolecedor do solvente remanescente.

Figura 49 - Gráficos de igualdade do módulo de cisalhamento dinâmico (a e b) e ângulo de fase (c e d) dos ligantes do segundo estágio.



Estudos reportam a influência em $|G^*|$ e δ devido ao processo e efeito do solvente sobre a recuperação de ligantes asfálticos. Abuhassan et al. (2019) observou uma redução em $|G^*|$ na ordem de 30% a 66% e um aumento em δ de 0% a 121% ao testar quatro ligantes de asfalto (PG 58-28, 64-22, 64-28 e 70-22 nas condições virgem, RTFOT e PAV), após misturados com TCE e recuperados pelo método de Abson (AASHTO R59, 2011). Dois outros solventes (nPB e tolueno) foram testados nas mesmas condições, e resultados semelhantes foram obtidos. Os autores atribuem as mudanças nas propriedades reológicas aos efeitos do TCE.

No entanto, é possível observar a partir dos dados que os ligantes de maior PG e maior nível de envelhecimento apresentaram maior redução nos valores de $|G^*|$ com aplicação do procedimento normativo. A desconsideração do tipo de ligante e o nível de envelhecimento

também pode ser uma variável resposta não explorada no trabalho dos autores como causa da redução significativa da rigidez dos ligantes após recuperação.

Piérard e Vanelstrarte (2009) reportam um aumento da $|G^*|$ a 52°C (1,6 e 10 Hz) após a recuperação do ligante modificado com SBS com um evaporador rotativo nas condições descritas na norma. De acordo com os autores, isso significa que o aglutinante se tornou mais duro após a dissolução com TCE. Hospodka et al. (2018) descobriram que 1% p/p de solvente residual pode levar a uma redução do módulo dinâmico em 10%. Nosler, Tanghe e Soenen (2008) mencionam que ligantes modificados com polímeros prendem as partículas do solvente e, assim, amolecem os ligantes recuperados, reduzindo sua rigidez. Além disso, os autores identificaram aumento do ângulo de fase nos ligantes recuperados, possivelmente relacionado ao efeito do solvente e método de recuperação. Ashqar (2015) obteve propriedades físicas e reológicas inconsistentes devido à variação do ângulo de fase após a recuperação no evaporador rotativo.

3.5.4. MSCR

A Figura 50 exibe os últimos dez ciclos de fluência e recuperação a uma tensão de 3,2 kPa (200 a 300 s) para os ligantes no primeiro estágio (a) e no segundo estágio (b) nas temperaturas de PGH determinadas pelo teste na Seção 3.5.2. Os ligantes do primeiro estágio apresentam redução do nível de deformação com o aumento do tempo de destilação, aproximando-se do comportamento de fluência e recuperação do ligante original. Nos ligantes de segundo estágio, exceto para os ligantes ASTM, as respostas de fluência e recuperação foram semelhantes para os diferentes tempos de destilação em um mesmo tipo de ligante RAP. A baixa recuperação após a fluência dos ligantes SBS RAP resulta da degradação das cadeias poliméricas como resultado do envelhecimento no campo.

A Figura 51 contém os valores de J_{nr} em 0,1 kPa e 3,2 kPa para os ligantes do primeiro estágio (a) e do segundo estágio (b) testados nas temperaturas de PGH. Verifica-se que para os ligantes sem e com modificação do primeiro estágio foram necessários tempos de destilação de 40 e 70 minutos, respectivamente, para atingir os valores dos ligantes originais. No ligante com modificação, o J_{nr} foi mais sensível a presença de solvente residual, com aumento na ordem de 100%, 71% e 29% para os tempos de 30, 40 e 50 minutos em comparação ao ligante original. Nos ligantes RAPs, identifica-se pouca variação entre 70 e 100 minutos, porém ocorre um aumento no J_{nr} 3,2 kPa na ordem de 20% a 52% com o procedimento conduzido pela ASTM em relação aos ligantes com 70 minutos de destilação.

Figura 50 - Ciclos de fluência e recuperação dos ligantes do primeiro estágio (a) e do segundo estágio (b) em 3,2 kPa.

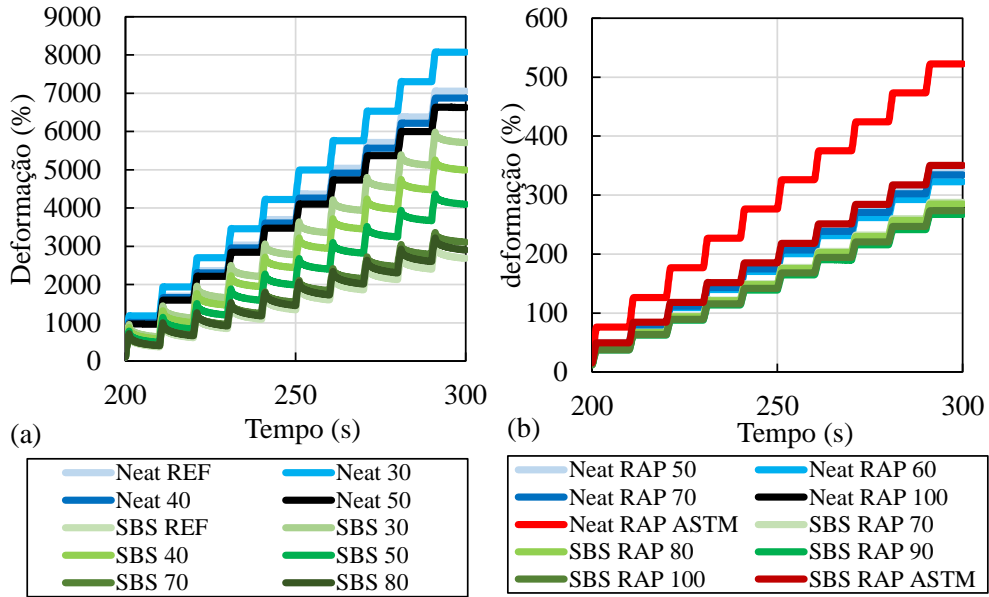
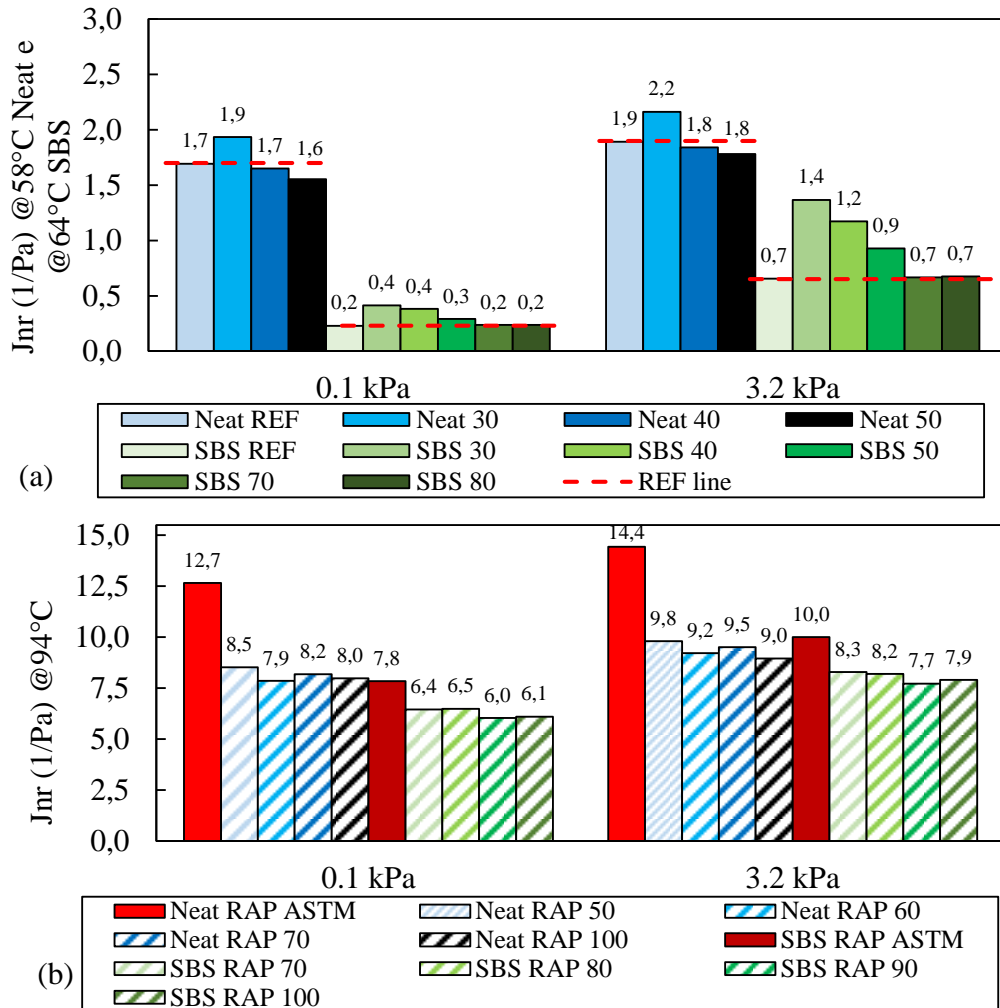


Figura 51 - Jnr dos ligantes de primeiro estágio (a) e segundo estágio (b) em 0,1 kPa e 3,2 kPa.



Uma análise mais precisa dos limites de variação aceitos pela ASTM D 7405 (2020) e aplicados aos resultados obtidos é apresentada na Tabela 7. As variações identificadas por todos os ligantes Neat do primeiro estágio seguem os limites estabelecidos, enquanto apenas os ligantes SBS 70 e SBS 80 atendem aos limites em ambos os níveis de tensão. O PGH nos diferentes tempos de destilação foi equivalente aos ligantes de referência, o que não se manteve para a classificação quanto ao nível de tráfego pelo Jnr em 3,2 kPa. A equivalência quanto ao nível de tráfego foi obtida somente após 40 e 50 minutos de destilação para os ligantes Neat e SBS, respectivamente.

Os ligantes do segundo estágio estão de acordo com os limites de variação fornecidos na normativa, exceto para os ligantes Neat RAP 50, Neat RAP ASTM e SBS RAP ASTM.

Tabela 7 - Classificação PGH quanto ao nível de tráfego e análise da variação do Jnr dos ligantes de acordo com os limites permitidos pela ASTM D 7405 (2020).

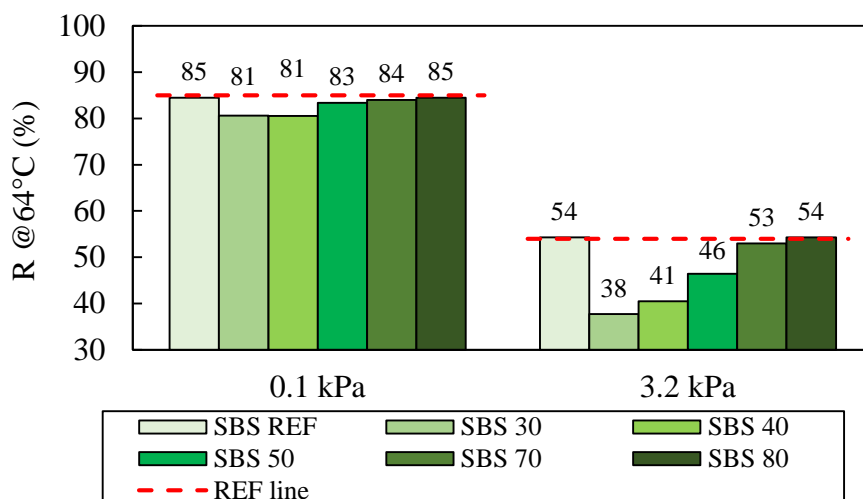
Ligantes asfálticos	PGH	$\frac{Jnr^1(kPa^{-1})}{0,1 \text{ kPa}}$	CV (%)	Limite ASTM	$\frac{Jnr^1(kPa^{-1})}{3,2 \text{ kPa}}$	CV (%)	Limite ASTM
Neat REF	58H	1,69	Ref	12,8%	1,89	Ref	16,0%
Neat 30	58S	1,94	9,4	Aceito	2,16	9,5	Aceito
Neat 40	58H	1,65	1,8	Aceito	1,84	1,9	Aceito
Neat 50	58H	1,56	6,0	Aceito	1,78	4,2	Aceito
SBS REF	64V	0,23	Ref	38,3%	0,65	Ref	15,30%
SBS 30	64H	0,41	40,4	Não aceito	1,37	49,9	Não aceito
SBS 40	64H	0,38	35,0	Aceito	1,17	40,2	Não aceito
SBS 50	64V	0,29	16,6	Aceito	0,93	24,6	Não aceito
SBS 70	64V	0,24	2,1	Aceito	0,67	1,5	Aceito
SBS 80	64V	0,24	2,1	Aceito	0,67	1,5	Aceito
Neat RAP 50	94S	8,52	14,1	Não aceito	9,80	14,7	Aceito
Neat RAP 60	94S	7,85	8,4	Aceito	9,21	10,3	Aceito
Neat RAP 70	94S	8,17	11,1	Aceito	9,51	12,6	Aceito
Neat RAP 100	94S	6,98	Ref	12,8%	7,96	Ref	16%
Neat RAP ASTM	94S	7,84	8,2	Não aceito	14,43	40,9	Não aceito
SBS RAP 70	94S	6,45	3,6	Aceito	8,28	3,4	Aceito
SBS RAP 80	94S	6,49	4,3	Aceito	8,19	2,6	Aceito
SBS RAP 90	94S	6,02	0,9	Aceito	7,72	1,6	Aceito
SBS RAP 100	94S	6,10	Ref	15,2%	7,90	Ref	16%
SBS RAP ASTM	88S ²	7,84	17,7	Não aceito	9,99	16,6	Não aceito

¹ Jnr foi determinado na temperatura PGH; ² Embora o PGH seja 88 °C, os valores são apresentados para uma temperatura de 94 °C para efeito comparativo.

Por fim, a Figura 52 apresenta apenas o R% dos ligantes SBS, pois os outros materiais não exibiram recuperação em suas temperaturas de PGH. Os resultados demonstram que o solvente residual nos tempos de destilação de 30, 40 e 50 minutos reduziram o percentual de recuperação em 30%, 24% e 15%, respectivamente, no nível de tensão de 3,2 kPa. Com 70

minutos, as condições de recuperação pós deformação foi equivalente ao ligante original, se mantendo estável no intervalo subsequente.

Figura 52 – R% dos ligantes SBS



Diferentes estudos reportam a perda da resposta elástica de ligantes modificados após o processo de recuperação no evaporador rotativo. Hossain et al. (2012) relataram que o TCE diminuiu a recuperação elástica dos ligantes. Nosler, Tanghe e Soenen (2008) identificaram recuperação elástica reduzida de ligantes asfálticos modificados e degradação do polímero após a recuperação. No entanto, o procedimento conduzido com a avaliação da reologia e do desempenho permitiu obter as condições de recuperação do ligante original, evidenciando que:

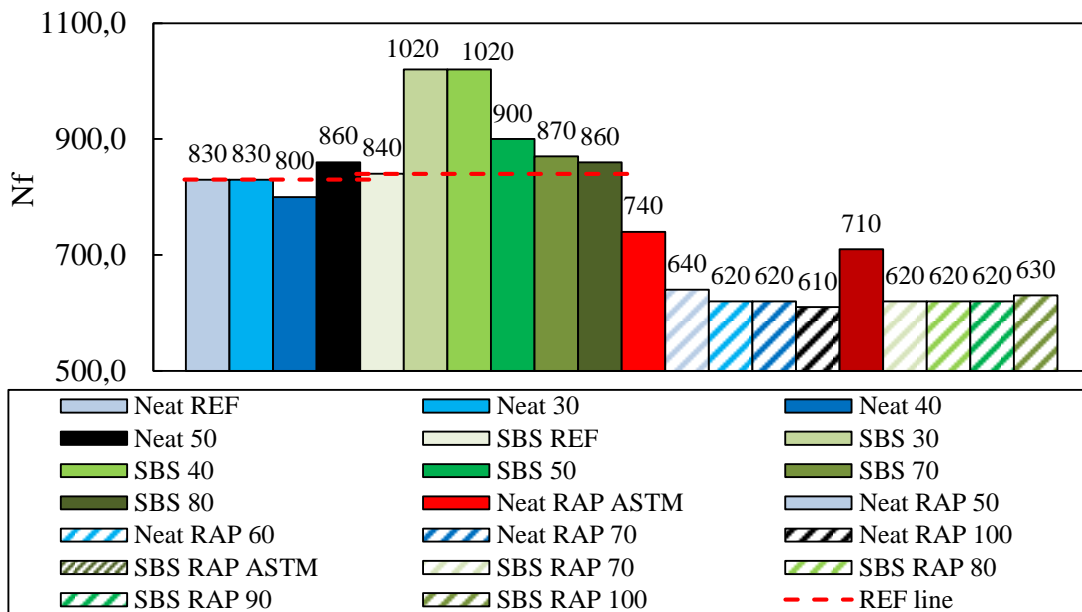
- O processo não resultou no envelhecimento adicional dos ligantes, pois o envelhecimento do ligante modificado com polímero resulta em redução de R%. Ao contrário, para ligantes não modificados, o envelhecimento confere um maior R% devido ao aumento de rigidez resposta elástica, o que não foi identificado;
- O TCE não causou degradação do polímero SBS durante o tempo total de exposição do ligante ao solvente associado ao protocolo estabelecido, pois também resultaria em perda de recuperação na resposta do ligante aos ciclos de deformação.

3.5.5. Linear Amplitude Sweep

A Tabela 8 apresenta os dados obtidos para todos os ligantes asfálticos analisados. Além disso, a Figura 53 exibe o Nf dos ligantes de primeiro estágio a 19 ° C e os ligantes de segundo estágio a 25 ° C, conforme definido por C². N. (1-C) (CAO e WANG, 2018).

Tabela 8 – Parâmetros de fadiga de acordo com os ligantes analisados

Ligantes asfálticos	LVE MC <i>slope</i>	α	aT	Fitting C vs S		
				C11	C12	Sf
Neat REF	0,65	2,53	4,95	0,54	0,43	0,91
Neat 30	0,65	2,55	4,95	0,51	0,43	0,93
Neat 40	0,65	2,54	4,77	0,55	0,41	0,84
Neat 50	0,67	2,49	4,77	0,56	0,42	0,86
SBS REF	0,66	2,51	4,77	0,54	0,42	0,89
SBS 30	0,71	2,42	4,77	0,64	0,41	0,65
SBS 40	0,69	2,45	4,77	0,63	0,41	0,65
SBS 50	0,66	2,50	4,77	0,60	0,42	0,71
SBS 70	0,65	2,55	4,77	0,55	0,42	0,85
SBS 80	0,66	2,51	4,77	0,54	0,43	0,90
Neat RAP 50	0,45	3,23	0,45	0,33	0,47	2,49
Neat RAP 60	0,43	3,33	0,45	0,35	0,47	2,10
Neat RAP 70	0,42	3,38	0,51	0,30	0,46	2,93
Neat RAP 100	0,42	3,38	0,45	0,31	0,47	2,74
Neat RAP ASTM	0,51	2,97	0,64	0,43	0,44	1,53
SBS RAP 70	0,44	3,26	0,45	0,33	0,46	2,51
SBS RAP 80	0,45	3,20	0,45	0,31	0,46	2,73
SBS RAP 90	0,45	3,24	0,45	0,32	0,46	2,62
SBS RAP 100	0,46	3,16	0,45	0,33	0,47	2,44
SBS RAP ASTM	0,49	3,06	0,57	0,38	0,44	1,99

Figura 53 - Ciclo de fala dos ligantes de acordo com $C^2.N.(1-C)$ 

Em termos de tolerância aos danos por fadiga, os dados evidenciam que a presença de modificação e o maior nível de envelhecimento também exigem maiores tempos de destilação para a completa evaporação do TCE. Nos ligantes do primeiro estágio, o tempo de 30 minutos foi suficiente para reestabelecer a mesma vida de fadiga do ligante original Neat. No entanto, os tempos de 30, 40 e 50 minutos aumentaram a vida de fadiga do ligante SBS em 21%, 21% e 7%, respectivamente, como resultado do efeito amolecedor do solvente residual.

A manutenção dos valores de Nfs entre os intervalos de 70 e 100 minutos para os ligantes do segundo estágio reforçam a evidência de ausência de solvente residual e envelhecimento adicional após o processo. No entanto, a presença de solvente residual nas amostras recuperadas pela normativa da ASTM resultou em maior vida de fadiga (19% e 15% para os ligantes Neat RAP ASTM e SBS RAP ASTM, respectivamente, quando comparados aos respectivos ligantes com 70 minutos), indicando que materiais com maiores níveis de envelhecimento exigem condições mais severas em termos de aplicação de vácuo e tempo de destilação.

As curvas características de dano podem fornecer bons indicativos quanto a qualidade do processo de recuperação, pois segundo a teoria do S-VECD, o dano corresponde a uma propriedade fundamental do material e independe das condições de teste, ou seja, se os ligantes em seus diferentes tempos de destilação não apresentam solvente remanescente, envelhecimento adicional ou alteração das propriedades, as C vs S devem sobrepor entre elas. A Figura 54 exibe a perda de integridade com o acúmulo de dano dos ligantes do primeiro estágio (a e b) e do segundo estágio (c e d).

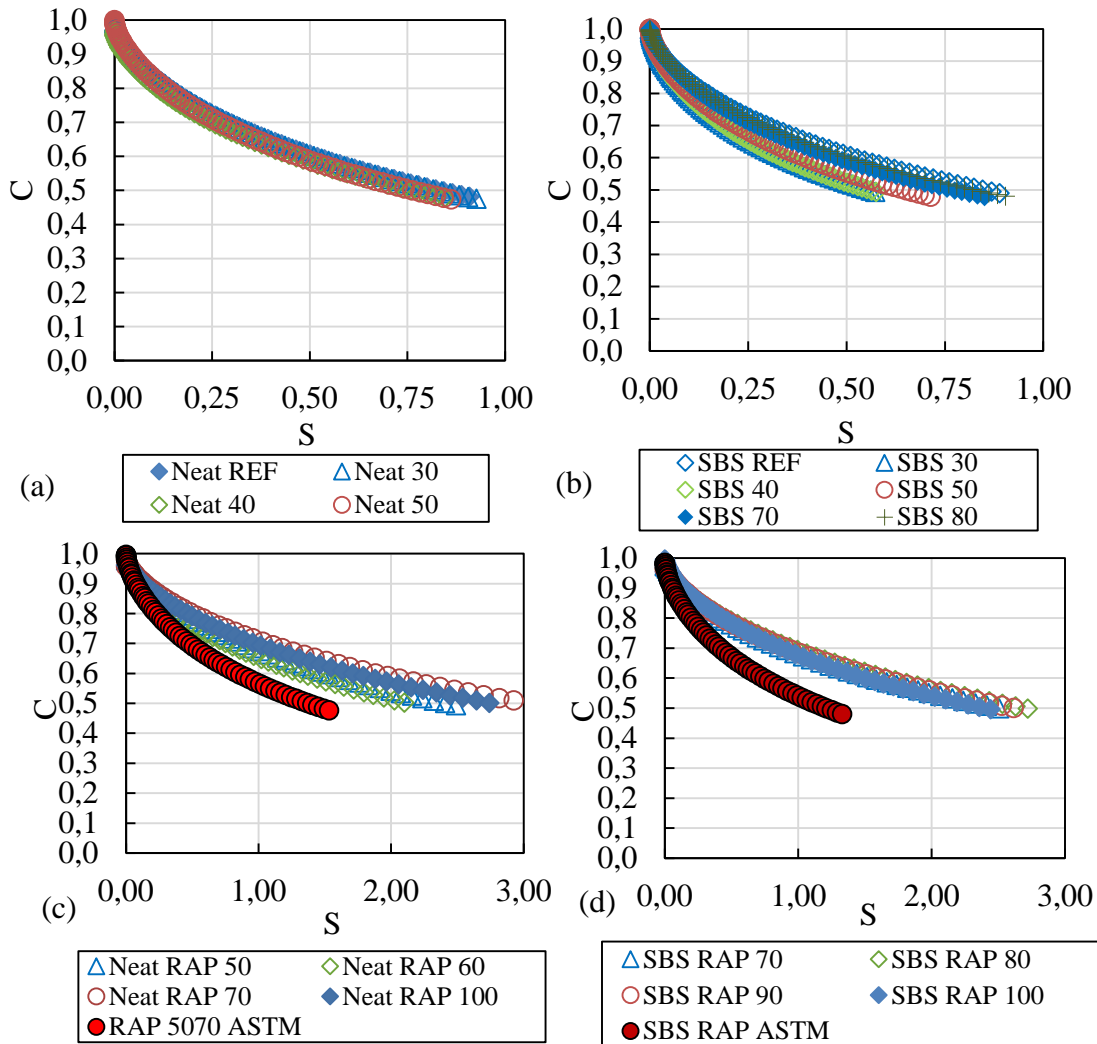
A posição relativa da curva C (S) é controlada pela rigidez do material, dado o papel de $|G^*|$ na composição do dano S. Uma rigidez mais baixa produz uma curva mais baixa, e uma rigidez mais alta produz uma curva mais alta (NOROUZI e KIM, 2017; CAO e WANG, 2019; CAO, WANG e WANG, 2019). Portanto, a presença de solvente remanescente produz curvas mais baixas como resultado da redução da rigidez, enquanto o envelhecimento adicional produz curvas mais altas devido ao aumento da rigidez.

Todos os ligantes sem modificação do primeiro estágio têm C vs. S que colapsam sobre o ligante de referência. Para os ligantes com modificação, os ligantes SBS 70 e SBS 80 colapsam sobre o ligante original, sendo que os tempos de 30, 40 e 50 minutos produziram curvas mais baixas como resposta a presença de solvente residual. Nos ligantes do segundo estágio, os tempos de processamento de 70 e 100 minutos produziram a mesma perda de integridade com acúmulo de dano para ambos os ligantes RAP. No entanto, a condução da recuperação pelo procedimento da ASTM resultou em curvas mais baixas, também como resposta ao solvente residual.

Assim, a presença de solvente residual também compromete a análise com relação a tolerância dos ligantes ao fenômeno de fadiga. O LAS teste forneceu indicativo dos melhores tempos de processamento de acordo com o tipo de ligante os diferentes níveis de

envelhecimento. Ademais, a resposta foi similar aos resultados de teste quanto ao $|G^*|/\sin \delta$, PGH contínuo e o MSCR.

Figura 54 - C vs S dos ligantes do primeiro (a e b) e segundo (c e d) estágios.



3.6. PROPOSTA DE PROCEDIMENTO GENÉRICO DE CALIBRAÇÃO

De acordo com os resultados obtidos, o tipo de ligante, a presença de polímero e o grau de envelhecimento influenciam na evaporação completa do solvente sem alterar as propriedades dos materiais. Além disso, o teste de FTIR, utilizado para análise qualitativa do processo, não foi sensível ao solvente residual nos ligantes após a recuperação, conforme evidenciado pelas análises reológicas e de desempenho. A Figura 55 apresenta uma proposta genérica em duas etapas para calibração do processo de recuperação para ser aplicado independente de

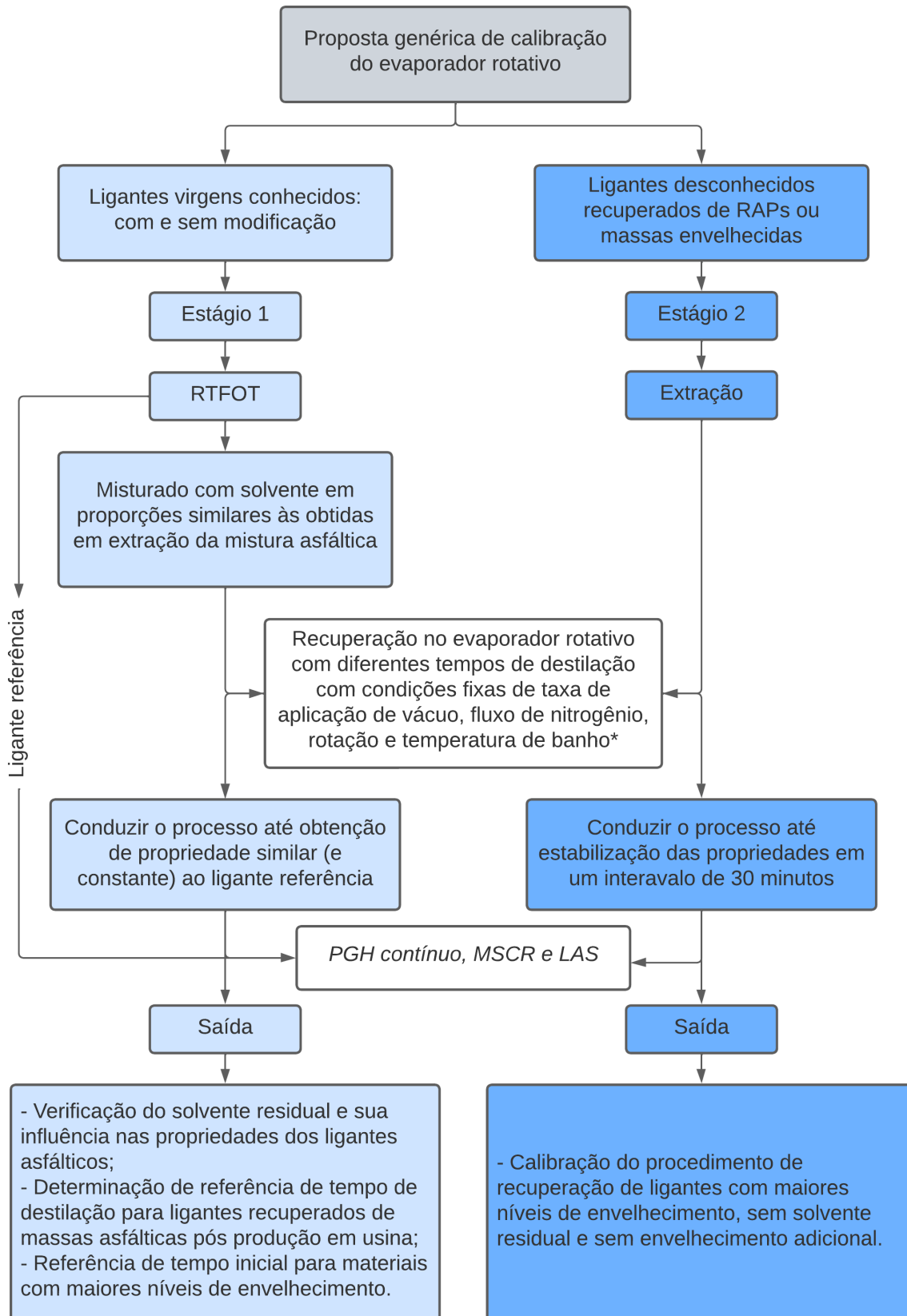
parâmetros pré-definidos (temperatura de banho, taxa de rotação do balão, fluxo de nitrogênio e vácuo) e tipos de solvente.

A primeira etapa consiste em trabalhar com ligantes de propriedades conhecidas misturados com solvente em proporções similares às obtidas no processo de extração do ligante a partir da mistura asfáltica. Esta etapa busca controlar a influência do solvente nas propriedades do ligante e determinar o tempo de destilação para atingir a condição do ligante original e estabilização em um intervalo de 10 minutos, que são dependentes da temperatura de banho, taxa de rotação do balão, fluxo de nitrogênio, taxa de aplicação de vácuo e tipo de solvente. Além disso, conforme as condições aplicadas, os tempos resultantes podem ser distintos dos identificados para os ligantes deste trabalho. Assim, é possível identificar o tempo de partida para ligantes com maiores níveis de envelhecimento.

A segunda etapa é indicada para materiais com origem desconhecida e com maior grau de envelhecimento. Apesar de não se conhecer as propriedades do ligante original, a obtenção da constância de propriedades em um intervalo sugestivo de 30 min garante a ausência de solvente residual e de envelhecimento adicional.

Os ensaios mais sensíveis para calibração do processo em termos de rigidez e danos são o $|G^*|/\sin \delta$, o PGH contínuo, o MSCR (Jnr e R% a 3,2 kPa) e o LAS teste (ciclo de falha e C vs S), pois forneceram respostas semelhantes em termos de determinação do tempo de destilação para aos materiais utilizados.

Figura 55 – Procedimento genérico proposto para calibração da recuperação no evaporador rotativo a partir da análise reológica e de desempenho.



* A utilização de outros tipos de solvente, de variados pontos de ebulição, e condições pré-definidas distintas das utilizadas nesta pesquisa de acordo com a capacidade de cada equipamento, pode exigir tempos de destilação diferentes dos encontrados nesta pesquisa. Assim, o primeiro estágio é importante para controle do processo e a definição de tempos de partida a partir das particularidades de cada ligante asfáltico, solvente e equipamentos.

3.7. CONCLUSÕES

A caracterização reológica e o desempenho dos ligantes no DSR foram testados para a calibração do processo de recuperação no evaporador rotativo em duas etapas com finalidades distintas: a primeira com ligantes conhecidos misturados com TCE e a segunda com ligantes extraídos e recuperados do RAP. Portanto, esta abordagem incluiu ligantes em diferentes níveis de envelhecimento e modificação. A partir dos resultados, pode-se concluir que:

- Os espectros de FTIR não identificaram alterações químicas devido à presença de solvente residual nos ligantes após o processo de recuperação. Verificou-se que o teste não é sensível a baixas concentrações do TCE;

- A presença de modificação e o grau de envelhecimento dos ligantes asfálticos influenciaram no tempo de destilação para completa evaporação do TCE sob aplicação fixa de condições pré-definidas (temperatura de banho, taxa de rotação do balão, fluxo de nitrogênio e vácuo). A presença de modificação e maiores níveis de envelhecimento exigiram maiores tempos de destilação. Para os ligantes de propriedades conhecidas do primeiro estágio foram necessários 40 e 70 minutos para obtenção de propriedades similares aos materiais sem e com modificação, respectivamente. Para os ligantes de propriedades desconhecidas, independente da presença ou não de modificação, o tempo de destilação foi de 70 minutos. A garantia quanto a ausência de TCE e de envelhecimento adicional foi evidenciada a partir da estabilização das propriedades analisadas em um intervalo de 30 minutos (entre 70 e 100 minutos);

- Os ligantes RAPs recuperados pelo procedimento da ASTM D 5404 (2017) exibiram aumentos na ordem de 26% a 46% em $|G^*|/\text{sen } \delta$, de 2,5°C e 5,4 °C no PGH contínuo, de 20% a 52% no Jnr à 3,2 kPa e 15% a 19% na vida de fadiga como resultado de solvente remanescente quando comparados aos ligantes com 70 minutos de destilação. Assim, a condução e a interrupção do processo por simples análise visual sem considerar as particularidades dos materiais (presença de modificação e o nível de envelhecimento) resultou em subestimação da rigidez e do nível de envelhecimento desses materiais;

- O TCE remanescente promoveu um amolecimento dos ligantes asfálticos, resultando nas seguintes alterações em termos reológicos e de desempenho: maiores valores de ângulo de fase, $Jnr_{3,2}$, e vida de fadiga; menor rigidez, PGH contínuo, $R\%_{3,2}$ e uma pior classificação quanto a tolerância à deformação permanente;

- O $|G^*|/\text{sen } \delta$, o PGH contínuo, o MSCR (Jnr e R% em 3,2 kPa) e o teste LAS (ciclo de falha e C vs S) apresentaram resultados similares quanto ao tempo de destilação para a completa

evaporação do TCE. Assim, os parâmetros exibiram consistência para calibrar a recuperação dos ligantes testados no evaporador rotativo.

A calibração da recuperação com o uso de testes reológicos e de desempenho mostrou-se promissora em considerar as condições particulares dos ligantes asfálticos, como a presença de modificação e o seu nível de envelhecimento. Cabe ressaltar que os tempos de destilação determinados a partir dos parâmetros pré-definidos são aplicáveis aos materiais aqui avaliados. Assim, esse estudo é um bom ponto de partida e busca fornecer diretrizes para mais pesquisas na área com a aplicação de uma gama robusta de ligantes, fontes de RAP e solventes, e assim, no futuro, fornecer maior base de conhecimento para uma possível normatização por meio de testes reológicos e de desempenho.

4 AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DE LIGANTES COM O ENVELHECIMENTO E O REJUVENESCIMENTO

4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Conforme apresentado no capítulo 2, um dos fatores restritivos para misturas recicladas com alto teor de RAP é resultado das propriedades do ligante envelhecido presente no material, que se caracteriza por alta rigidez, maior elasticidade, e baixa propriedade coesiva, resultando em misturas susceptíveis ao trincamento.

Nesse sentido, os agentes rejuvenescedores são uma das principais alternativas testadas para restaurar as propriedades do material perdidas com o envelhecimento. Esses materiais não restauram os componentes químicos ao nível de um ligante virgem, mas melhoram a proporção asfaltenos/maltenos, reduzem o tamanho dos aglomerados de asfaltenos, aumentam o poder dispersivo da fase maltênica e a mobilidade molecular, resultando na redução da viscosidade, da rigidez e no reestabelecimento parcial da componente viscosa.

A dosagem desse material é determinada por diferentes metodologias, as quais buscam restaurar alguma propriedade do ligante a uma condição próxima da virgem, como a penetração, o ponto de amolecimento, a viscosidade, o grau de desempenho, ou algum parâmetro de trincamento térmico. Entretanto, com base na literatura, essas propriedades não apresentam correlação direta com o comportamento à fadiga das misturas asfálticas, além de que uma concentração em excesso pode resultar em prejuízos financeiros. Além disso, a potencialidade dos agentes rejuvenescedores em recuperar o desempenho à fadiga de misturas recicladas ainda carece de estudos.

Diante disso, este capítulo aborda um estudo laboratorial em ligantes, com a finalidade de identificar parâmetros de seleção e dosagem dos agentes rejuvenescedores com base no fenômeno de fadiga. Para isso, a vida de fadiga dos ligantes foram investigadas com diferentes definições, critérios de falha e equações de previsão de desempenho com o objetivo de determinar quais são sensíveis ao envelhecimento e ao rejuvenescimento. Os teores ótimos com base no fenômeno de fadiga são comparados aos teores determinados por outros critérios baseados na penetração, na caracterização LVE e na deformação permanente.

O programa experimental está dividido em duas etapas. A primeira verifica o efeito do envelhecimento de ligantes em laboratório e recuperados de RAPs nas propriedades reológicas e de desempenho. Assim, busca-se comparar o grau de modificação em propriedades de alta e intermediária temperatura e seu possível impacto no teor de dosagem. A segunda etapa

investiga os efeitos de diferentes concentrações de agentes rejuvenescedores nas propriedades reológicas e de desempenho de ligantes recuperados de RAPs.

O objetivo de trabalhar com ligantes envelhecidos em laboratório e recuperados de RAP refere-se aos diferentes mecanismos atuante em cada material. Conforme será evidenciado nas análises e discussões dos resultados, o envelhecimento de laboratório pode não ser efetivo para avaliar os materiais asfálticos quanto ao envelhecimento, e por consequência, o rejuvenescimento.

A seguir estão apresentados o programa experimental, os materiais, o projeto de ligantes, os métodos de teste e os resultados.

4.2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

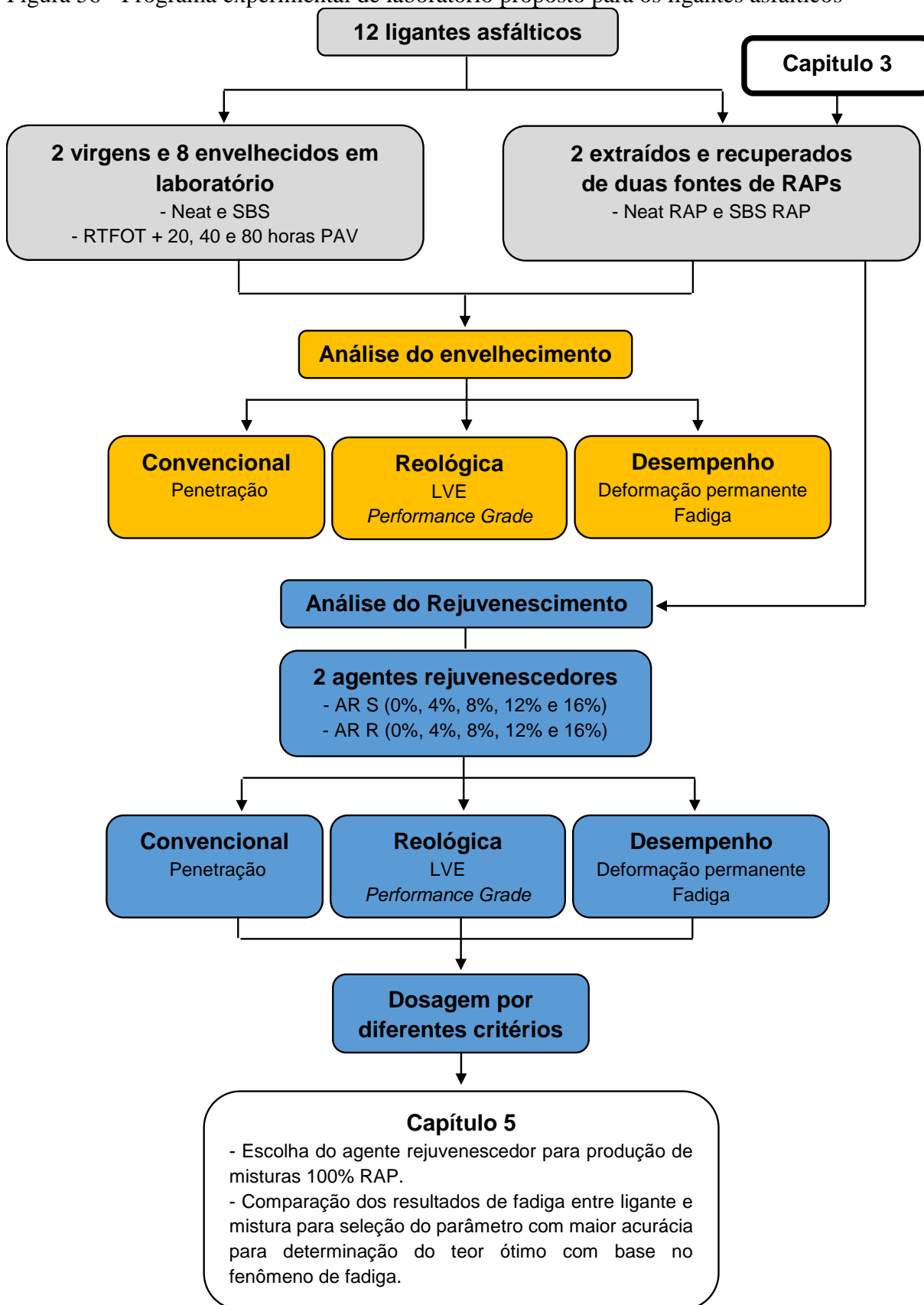
A Figura 56 detalha o programa experimental elaborado para os ligantes asfálticos, subdividido em análises quanto ao envelhecimento e ao rejuvenescimento.

Para avaliação do efeito do envelhecimento nas propriedades reológicas e de desempenho, dois ligantes virgens, um sem modificação classificado como 50/70 (penetração) e chamado como Neat, e um asfalto modificado por polímero AMP 60/85 (ponto de amolecimento/retorno elástico) e designado como SBS, foram envelhecidos em RTFOT, RTFOT + 20, 40 e 80 horas de PAV, resultando em 8 ligantes envelhecidos artificialmente. Adicionalmente, foram extraídos e recuperados ligantes de duas fontes de RAP, um composto por ligante sem modificação (chamado de Neat RAP) e outro composto por ligante AMP 60/85 (designado como SBS RAP).

Para avaliação do efeito do rejuvenescimento nas propriedades reológicas e de desempenho, os dois ligantes recuperados de RAP foram misturados com dois agentes rejuvenescedores comerciais a base de óleo vegetal nas concentrações de 0%, 4%, 8%, 12% e 16%.

O agente rejuvenescedor com melhor resposta em restaurar a vida de fadiga de ligantes foi utilizado para produção de mistura 100% RAP no Capítulo 5. Além disso, os resultados do teste de fadiga determinados nessa seção foram correlacionados aos danos acumulados simulados no FlexPAVETM, também no Capítulo 5, com a finalidade de comparar e validar os parâmetros para seleção e dosagem dos agentes rejuvenescedores com base neste mecanismo de danificação.

Figura 56 - Programa experimental de laboratório proposto para os ligantes asfálticos



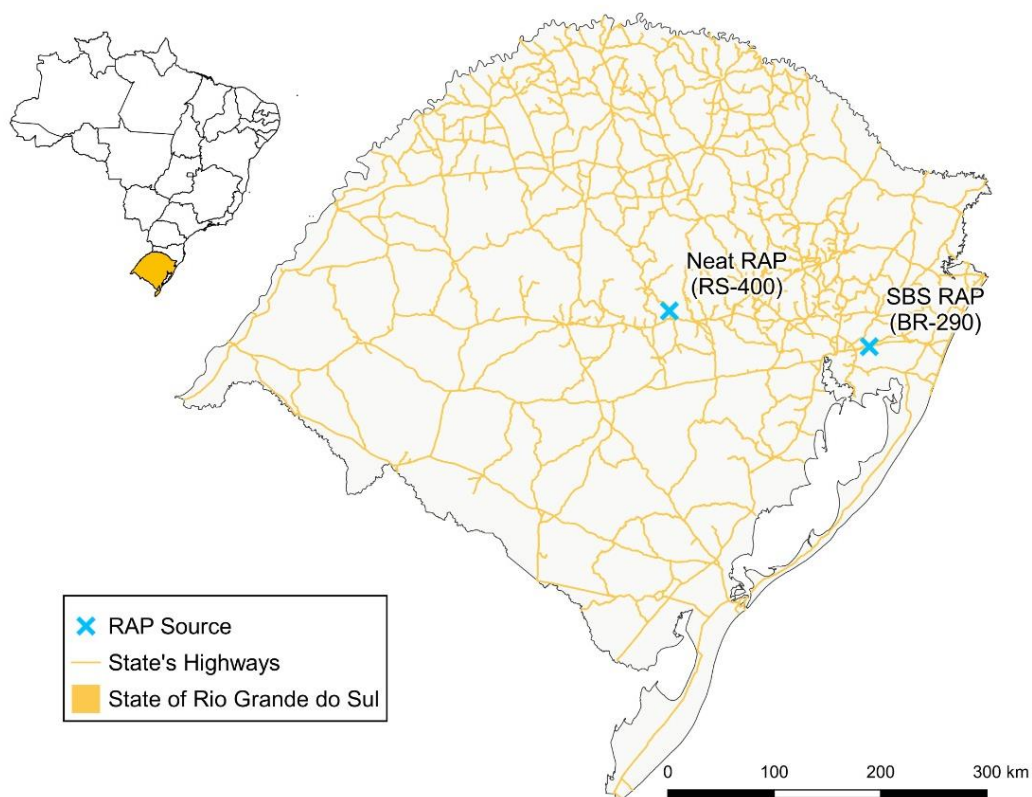
4.3. MATERIAIS

Nesta seção, os materiais utilizados no desenvolvimento da pesquisa estão descritos, no qual incluem 2 ligantes extraídos e recuperados de RAPs, 2 ligantes virgens utilizados para produção dos ligantes envelhecidos artificialmente em laboratório, e dois agentes rejuvenescedores comerciais.

4.3.1. Ligantes RAPs

Duas fontes de materiais RAP foram obtidas nas rodovias brasileiras RS 400 e BR 290, conforme exibido na Figura 57, após a fresagem da camada superficial de pavimentos flexíveis ao fim de vida de serviço, designados por Neat RAP e SBS RAP, respectivamente. Os materiais RAPs possuem diferentes origens quanto ao tipo de ligante, agregados e nível de envelhecimento.

Figura 57 – Origem das fontes de RAP



O Neat RAP foi coletado no Km 8 da RS 400, junto ao município de Candelária, e corresponde a fresagem de um concreto asfáltico com CAP 50/70 executado no ano de 2009,

segundo o Departamento Autônomo de Estrada de Rodagem (DAER/RS), submetido ao envelhecimento de campo e ao tráfego de veículos. Na Figura 58 está apresentada a operação de fresagem do trecho e o estado avançado de danificação por fadiga do revestimento.

Figura 58 - Fresagem e estado visual do revestimento que deu origem ao Neat RAP



O SBS RAP tem origem na fresagem da BR 290, próxima à cidade de Porto Alegre, com uma minifresadora que gera um material de composição granulométrica mais fina em relação às fresadoras convencionais. Não se tem dados sobre o período de campo deste material e seu estado visual no momento do processo de fresagem. O material tem em sua composição um AMP SBS 60/85.

Os RAPs coletados foram conduzidos e armazenados em laboratório, sendo homogeneizados e reduzidos por quarteamento em amostras menores para caracterização segundo DNER-PRO 199 (1996). Os materiais passaram na peneira 3/4", sendo descartado o conteúdo retido. O material passante permaneceu em estufa por 72 horas à 40°C. A partir disso, os ligantes foram extraídos e recuperados (conforme Capítulo 3) para análise dos efeitos do envelhecimento e do rejuvenescimento. O restante do material RAP foi utilizado para produção de misturas asfálticas do Capítulo 5.

4.3.2. Ligantes asfálticos

Dois ligantes asfálticos virgens foram utilizados para produção de ligantes envelhecidos artificialmente em laboratórios. Primeiro, um ligante convencional 50/70 (penetração, designado como Neat) comumente empregado como ligante em revestimentos asfálticos no Brasil. Segundo, um ligante de alta performance modificado por polímero SBS AMP 60/85E

(ponto de amolecimento/retorno elástico, designado por SBS), utilizado em práticas de reciclagem nos países europeus.

Para produção dos ligantes envelhecidos artificialmente em laboratório, os ligantes virgens foram envelhecidos em laboratório no RTFOT, RTFOT + 20, 40 e 80 horas de PAV. O envelhecimento em RTFOT seguiu a ASTM D 2872 (2019), com o ligante submetido a 163 °C por 75 minutos, a uma rotação de 15 rpm e um fluxo de ar de 4000 mL/min. O envelhecimento em PAV foi conforme a ASTM D 6521 (2019), após RTFOT, com o ligante submetido à 100 °C e pressão de 2,10 MPa por nos diferentes intervalos definidos.

A Tabela 9 apresenta a caracterização convencional do ligante 50/70 e do AMP 60/85 na condição virgem.

Tabela 9 - Resultados de caracterização convencional do ligante 50/70 e do AMP 60/85

Caracterização	Ligantes	
	CAP 50/70	AMP 60/85
Penetração (100g, 5s, 25 °C)	55	58
Ponto de Amolecimento (°C)	49,6	67
Recuperação elástica (%)	-	86
Viscosidade Brookfield a 135°C (cp)	304,2	919
Viscosidade Brookfield a 150°C (cp)	160,1	437
Viscosidade Brookfield a 177°C (cp)	61,3	153
Densidade relativa a 25°C (g/cm ³)	1,000	1,010

4.3.3. Agentes rejuvenescedores

Dois agentes rejuvenescedores comerciais foram testados para recuperar as propriedades reológicas e de desempenho dos ligantes extraídos e recuperados de RAPs. O primeiro, designado por S, é um éster de polioliol, originário de um subproduto da indústria do papel (base biológica da química de pinus), e encontra-se na categoria de *Tall Oils*. O segundo, designado por R, é classificado como *green rejuvenator* por ser constituído por uma mistura de bio-óleos.

A Tabela 10 apresenta os resultados de caracterização do AR S e a Tabela 11 os resultados de caracterização do AR R, ambos cedidos pelos fornecedores. Os agentes rejuvenescedores foram misturados nas concentrações de 0%, 4%, 8%, 12% e 16% em peso dos ligantes extraídos e recuperados de RAP. O AR que melhor recuperou vida de fadiga dos ligantes foi utilizado para produção de misturas 100% RAP no Capítulo 5.

Tabela 10 – Caracterização das propriedades do AR S

Família química	Ester de Poliol
Ponto de ignição	>280°C
Tipo	Líquido
Odor	Suave
Ponto de ebulição	>300°C
Ponto de fusão	Não avaliado
Peso específico	0,927 a 20°C
Solubilidade em água	0,6 mg/l OECD 105 a 20°C
Estabilidade e reatividade	O produto é estável
Incompatibilidade	Agentes oxidantes fortes

Fonte: Dados do fornecedor

Tabela 11 – Caracterização das propriedades do AR R

Família química	Mistura de bio-óleos
Ponto de ignição	>250°C
Tipo	Líquido
Odor	Baixo
Ponto de ebulição	N/A
Ponto de fusão	Não avaliado
Peso específico	0,918 (água = 1)
Solubilidade em água	Insolúvel em água fria
Estabilidade e reatividade	O produto é estável
Incompatibilidade	Reativo com agentes oxidantes

Fonte: Dados do fornecedor

A seguir estão descritos os projetos de ligantes a partir da incorporação dos aditivos e os ensaios de avaliação laboratorial.

4.4. PROJETO DE LIGANTES ASFÁLTICOS

A primeira etapa consiste na avaliação dos efeitos do envelhecimento nas propriedades reológicas e de desempenho dos ligantes asfálticos. Para isso, dois ligantes virgens, 50/70 e AMP 60/85, foram utilizados para produção de oito ligantes com diferentes níveis de envelhecimento em laboratório, e dois ligantes extraídos e recuperados de duas fontes de RAP, de acordo com o apresentado na Tabela 12. Assim, dois ligantes controles na condição virgem e dez ligantes envelhecidos foram investigados.

Tabela 12 – Ligantes utilizados para análise do envelhecimento

Ligantes	Nível de envelhecimento	Nomenclatura
RAP 50/70	Campo	Neat RAP
RAP 60/85	Campo	SBS RAP
	Virgem	Neat
	RTFOT	Neat RTFOT
50/70	RTFOT + 20 horas de PAV	Neat 20PAV
	RTFOT + 40 horas de PAV	Neat 40PAV
	RTFOT + 80 horas de PAV	Neat 80PAV
	Virgem	SBS
	RTFOT	SBS RTFOT
AMP 60/85	RTFOT + 20 horas de PAV	SBS 20PAV
	RTFOT + 40 horas de PAV	SBS 40PAV
	RTFOT + 80 horas de PAV	SBS 80PAV

Os dois ligantes extraídos e recuperados RAP foram utilizados em uma segunda etapa para análise do processo de rejuvenescimento por dois agentes rejuvenescedores. O procedimento consistiu na adição de quatro diferentes concentrações do aditivo em peso de ligante, 4%, 8%, 12% e 16%, totalizando dezesseis ligantes rejuvenescidos conforme exibido na Tabela 13.

Tabela 13 – Resumo das misturas entre ligantes RAP e agentes rejuvenescedores

Ligantes	Agente Rejuvenescedor		Nomenclatura
	AR S (Teor %)	AR R (Teor %)	
	0%	0%	Neat RAP
	4%	-	Neat RAP + 4% S
	8%	-	Neat RAP + 8% S
	12%	-	Neat RAP + 12% S
Neat RAP	16%	-	Neat RAP + 16% S
	-	4%	Neat RAP + 4% R
	-	8%	Neat RAP + 8% R
	-	12%	Neat RAP + 12% R
	-	16%	Neat RAP + 16% R
	0%	0%	SBS RAP
	4%	-	SBS RAP + 4% S
	8%	-	SBS RAP + 8% S
	12%	-	SBS RAP + 12% S
SBS RAP	16%	-	SBS RAP + 16% S
	-	4%	SBS RAP + 4% R
	-	8%	SBS RAP + 8% R
	-	12%	SBS RAP + 12% R
	-	16%	SBS RAP + 16% R

O protocolo de mistura entre os ligantes RAPs e os agentes rejuvenescedores seguiu a recomendação da norma ASTM D 4887 (2016), conforme descrito a seguir:

- Aquecimento do ligante em uma temperatura máxima de 140°C por 30 minutos, e homogeneização com um bastão de vidro;
- Adicionar o ligante em um recipiente na temperatura entre 100 °C e 135 °C, e incorporar a quantidade de aditivo desejada;
- Colocar o recipiente com ligante e aditivo em uma estufa a 135 °C por 15 minutos, sendo misturado por um bastão de vidro por 30 segundos a cada 5 minutos;
- Finalmente, a amostra encontra-se pronta para os testes.

Os testes utilizados para avaliar a resposta dos ligantes aos efeitos do envelhecimento e rejuvenescimento, considerando seus diferentes domínios de análise (LVE, deformação permanente e fadiga), estão descritos a seguir.

4.5. CARACTERIZAÇÃO E TESTES DE LIGANTES

A indústria do asfalto avalia as propriedades dos ligantes asfálticos por meio de diferentes testes, que vão desde os testes convencionais de especificação aos reológicos e de desempenho. A seguir, todos os testes e procedimentos utilizados para análise do envelhecimento e rejuvenescimento para atingir os objetivos propostos estão descritos.

Primeiramente, está apresentada a propriedade convencional de penetração, os testes reológicos para obtenção das propriedades LVE e os parâmetros de desempenho oriundos desta análise, a determinação do *Performance Grade*, e os testes de desempenho a deformação permanente pelo MSCR e à fadiga pelo teste LAS.

Os testes reológicos e de desempenho foram conduzidos no *Dynamic Shear Rheometer* (Figura 59), fabricado pela Anton Paar, modelo EC-Twist 502. As propriedades quanto ao trincamento térmico não foram conduzidas devido a um problema técnico no *Bending Beam Rheometer* que o deixou fora de operação durante o período experimental.

Figura 59 - *Dynamic Shear Rheometer*

4.5.1. Propriedade Convencional

A maioria dos países adotam medidas físicas como dureza e resistência ao escoamento, de fácil obtenção em laboratório, para especificar os ligantes asfálticos. Essas propriedades são a penetração e a viscosidade. Outras propriedades são utilizadas quando os ligantes são modificados por polímeros, como o ponto de amolecimento e a recuperação elástica. Esses parâmetros de caracterização não necessariamente apresentam relação direta com o desempenho e os principais tipos de dano em pavimentos de concreto asfáltico. O teste tradicional de penetração, no qual classifica os ligantes asfálticos brasileiros sem modificação, está descrito a seguir.

4.5.1.1. Penetração

Os ligantes foram avaliados quanto à penetração conforme descrito na norma DNIT 155 (2010). O ensaio fornece uma medida de rigidez e de consistência do material, com o resultado

expresso em décimos de milímetro (dmm). A partir dos dados experimentais, o *Retained Penetration ageing index* (RP) (Equação 8) foi determinado como medida numérica em % da queda da penetração dos ligantes envelhecidos em relação à condição virgem. Adicionalmente, a taxa de variação da penetração em relação a condição de envelhecimento anterior também foi calculada.

$$RP = \frac{\text{Penetração ligante envelhecido}}{\text{Penetração ligante virgem}} \quad (8)$$

4.5.2. Propriedades Reológicas

A reologia é a ciência que estuda o fluxo ou deformação de materiais e avalia sua resposta com relação ao tempo e à temperatura, e pode ser utilizada para entender propriedades plásticas, elásticas, viscosas ou intermediárias a alguns destes domínios devido a uma variação de temperatura ou carregamento (DI BENEDETTO et al., 2004). Para os materiais elásticos, a relação tensão-deformação pode ser descrita pela Lei de Hooke, ou seja, a tensão é proporcional a deformação dividida pelo módulo de elasticidade e o material é afetado apenas pela tensão ou deformação momentânea. Desta forma, se dobrar a tensão, a deformação dobra, e ao cessar a tensão a deformação retorna a zero. Já para os materiais viscosos, a taxa de deformação é proporcional a tensão dividida pelo coeficiente de viscosidade.

Os materiais viscoelásticos apresentam um comportamento mais complexo e dependente da temperatura, taxa e histórico de carregamento, sendo o caso dos materiais asfálticos. O material asfáltico apresenta um comportamento não tão sólido ideal que corresponde à Lei de Hooke, e nem de um líquido viscoso ideal (Newtoniano), mas sim uma combinação entre materiais elásticos e viscosos, dependendo da aplicação de carga e da temperatura, chamado de viscoelástico. Quando submetidos a carregamentos rápidos (altas frequências) exibem um comportamento próximo a sólidos elásticos, e quando sujeitos a carregamentos lentos (baixas frequências), o material assemelha-se aos fluídos viscosos.

Os efeitos reológicos do envelhecimento e rejuvenescimento foram avaliados a partir do módulo de cisalhamento dinâmico ($|G^*|$) e do ângulo de fase (δ) dos materiais submetidos a uma varredura de frequência em rampa linear de 0,1 a 30 Hz e uma varredura de temperatura de -5 a 75 °C sob deformação controlada de 0,1%. O teste foi conduzido com a geometria de 8 mm e gap de 2 mm para as temperaturas de -5 a 35°C, e com a geometria de 25 mm e gap de 1

mm para as temperaturas de 35°C a 75°C. O δ corresponde a razão entre a resposta elástica e viscosa durante o processo de cisalhamento, ou seja, é um indicador da quantidade relativa de deformação recuperável e não recuperável. O $|G^*|$ é uma medida de resistência total do material à deformação quando exposto a pulsos repetidos de deformações cisalhantes.

Com as respostas dos materiais sob diferentes temperaturas e frequências de carregamento, as curvas mestras de módulo de cisalhamento dinâmico e ângulo de fase foram construídas a partir do Princípio da Superposição Tempo-Temperatura (PSTT) para uma T_{ref} de 25°C. Os fatores de translação (aT) foram obtidos por meio da Equação 9 e ajustados pelo Williams-Landel-Ferry (WLF) (Equação 10) e pelo modelo polinomial (Equação 11). Os espaços Cole Cole e diagramas black também foram construídos.

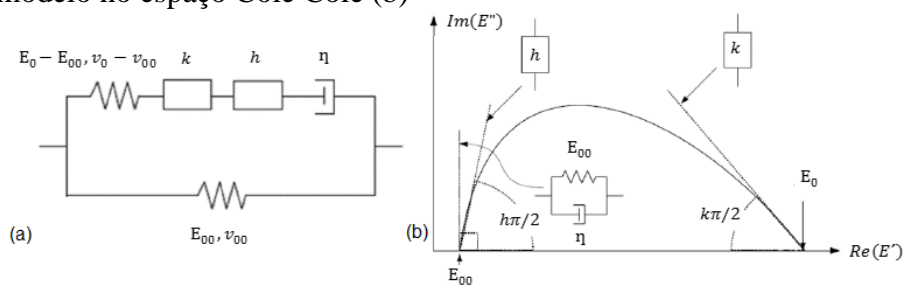
$$aT(T) = \frac{f(T)}{f(T_{ref})} \rightarrow aT(T_{ref}) = 1 \tag{9}$$

$$\log(aT) = \frac{-C1(T - T_{ref})}{C2 + (T - T_{ref})} \tag{10}$$

$$\log(aT) = a_1.T^2 + a_2.T + a_3 \tag{11}$$

As curvas mestras foram modeladas por meio de uma combinação de molas (comportamento elástico) e amortecedores (comportamento viscoso newtoniano) que simulam a resposta mecânica de materiais viscoelásticos lineares e fornecem uma aproximação matemática do comportamento real do material. O modelo utilizado é o 2S2P1D (2 Springs, 2 Parabolic elements, 1 Dashpot), proposto por Olard e Benedetto (2003) e apresentado na Figura 60.

Figura 60 – Representação analógica do modelo 2S2P1D (a) e representação gráfica dos parâmetros do modelo no espaço Cole Cole (b)



Fonte: Adaptado de Cardona et al. (2015)

O modelo apresenta um espectro de relaxamento contínuo e depende de 7 parâmetros para formulação em 2D: E_{00} (módulo estático) que está associado ao comportamento em baixas frequências ou altas temperaturas; E_0 (módulo vítreo) que está associado às altas frequências ou baixas temperaturas; k e h (parâmetros adimensionais relacionados aos dois elementos parabólicos, com $0 < k < h < 1$); δ (parâmetro adimensional – constante de calibração); τ (tempo característico que depende da temperatura); e β (parâmetro adimensional relacionado à viscosidade newtoniana η do amortecedor); e ω é a pulsação $2\pi \cdot f$; Outros dois parâmetros para extensão 3D: ν_{00} e ν_0 (valores estáticos e vítreos do coeficiente de Poisson, respectivamente); E por fim, do C_1 e C_2 da equação WLF. O módulo complexo, parâmetro β , ν_{00} e ν_0 são definidos pela Equação 12, 13 e 14, respectivamente.

$$E^*(\omega) = E_{00} + \frac{E_0 - E_{00}}{1 + \delta(i\omega\tau)^{-k} + (i\omega\tau)^{-h} + (i\omega\beta\tau)^{-1}} \quad (12)$$

$$\eta = (E_0 - E_{00})\beta\tau \quad (13)$$

$$\nu^*(\omega) = \nu_{00} + (\nu_0 - \nu_{00}) \frac{E^*(\omega) - E_{00}}{E_0 - E_{00}} \quad (14)$$

A partir da análise das curvas mestras, verificou-se que os efeitos do envelhecimento e rejuvenescimento possuem diferentes intensidades de acordo com a temperatura e frequência reduzida. Assim, as mudanças reológicas foram quantificadas de duas formas: uma utilizando os dados experimentais e outra por meio das curvas mestras modeladas pelo 2S2P1D:

- Para avaliação do envelhecimento foram calculados os aumentos percentuais de $|G^*|$ e de reduções do δ dos ligantes envelhecidos em relação aos ligantes virgens nas temperaturas de 5 a 75°C e frequência de 11,6 Hz. Para o rejuvenescimento, foram determinadas as reduções percentuais de $|G^*|$ e de aumento do δ dos ligantes com diferentes concentrações de AR em relação aos ligantes RAPs;

- O envelhecimento e o rejuvenescimento foram avaliados a partir do cálculo da diferença entre as áreas sob as curvas mestras de $|G^*|$ envelhecidas e não envelhecidas, e entre envelhecidas e rejuvenescidas, respectivamente, dentro faixas pré-definidas de frequências reduzidas. O resultado de área entre as curvas fornece um índice denominado de *Rheological Ageing Index* (RAI). Foram definidas três faixas de frequência reduzida que compreendem as baixas frequências – RAI_{DP} (correspondem ao domínio das altas temperaturas e a deformação

permanente), altas e intermediárias frequências – RAI_{FAD} (domínio das temperaturas intermediárias e baixas e ao trincamento por fadiga), e uma considerando o domínio completo - RAI_{TOTAL} (baixas a altas temperaturas).

Com o comportamento LVE dos ligantes modelados pelo 2S2P1D, diferentes parâmetros reológicos foram determinados e que também permitiram avaliar as respostas dos materiais quando submetidos ao processo de envelhecimento e rejuvenescimento.

O primeiro parâmetro corresponde ao Glover-Rowe (G-R), proposto por Rowe (2011), que combina o módulo dinâmico e o ângulo de fase a 15°C e 0,005 rad/s, sendo obtido pela Equação 15. O parâmetro define um limite, no diagrama black, de aviso de quebra no valor de 0,18 MPa, e de falha no valor de 0,60 MPa

$$G - R = \frac{G^*(\cos \delta)^2}{\text{Sen } \delta} \quad (15)$$

Outros três parâmetros foram obtidos do ponto onde $G'=G''$, que corresponde ao $\delta = 45^\circ$: frequência de cruzamento (Crossover frequency - ω_c), o módulo de cruzamento ($|G^*|_c$) e a temperatura de cruzamento ($T_{\delta=45^\circ}$). Um quinto parâmetro denominado *Rheological Index* (R-value) definido como a diferença entre o módulo vítreo e o $\log |G^*|$ na frequência de cruzamento também foi avaliado.

As seguintes correlações entre os parâmetros foram testadas: G-R vs $T_{\delta=45^\circ}$, R-value vs ω_c ((ROWE et al., 2016; RAHBAR-RASTEGAR et al., 2017), e o recentemente proposto por Farrakhzade, Sabouri e Tabatabaee (2022) G-R vs R-value/ ω_c .

Assim, os diferentes parâmetros foram utilizados para rastrear os efeitos do envelhecimento e rejuvenescimento nos ligantes. Além disso, a partir da análise verificou-se quais são sensíveis em captar os diferentes níveis de envelhecimento e quais apresentam potencial para determinar a dosagem dos agentes rejuvenescedores a partir da construção dos gráficos de mistura.

4.5.3. Caracterização *Superpave*

Os ligantes asfálticos foram classificados de acordo com a especificação *Superpave*, conforme a AASHTO M 320 (2017) e a AASHTO M 332 (2019). Nesta classificação, foram determinados os PG (*Performance Grade*) de alta e intermediária temperatura, que estabelecem a faixa de temperatura de desempenho adequado do ligante em relação à deformação

permanente e ao trincamento por fadiga, respectivamente, sendo determinadas com base nas temperaturas críticas do material.

A temperatura crítica de alta, denominada *High Performance Grade* (PGH), está relacionada à máxima temperatura que o ligante não é susceptível à deformação permanente, sendo indicada pelo parâmetro $|G^*|/\text{sen } \delta$, ou seja, este defeito é atribuído à insuficiência de rigidez em altas temperaturas de serviço. O PGH foi obtido com a determinação do módulo dinâmico $|G^*|$ e ângulo de fase (δ) no *Dynamic Shear Rheometer* (Figura 59) em amostras (25 mm de diâmetro e 1 mm de gap) virgens e envelhecidas no curto prazo (RTFOT). O PGH corresponde a menor temperatura entre os valores de $|G^*|/\text{sen } \delta \geq 1$ kPa na condição virgem e $|G^*|/\text{sen } \delta \geq 2,2$ kPa na condição de envelhecimento no RTFOT.

A temperatura crítica intermediária, chamada de *Intermediate Performance Grade* (PGI), refere-se a temperatura mínima que o parâmetro $|G^*|/\text{sen } \delta$ (chamado de módulo de perda) resulte em valor máximo de 5000 Pa sob frequência de 10 rad/s. O PGI foi obtido com a determinação do módulo dinâmico $|G^*|$ e ângulo de fase (δ) no *Dynamic Shear Rheometer* (Figura 59) em amostras de 8 mm de diâmetro e 2 mm de gap.

Dessa forma, os efeitos do envelhecimento e rejuvenescimento sobre as temperaturas críticas de alta e intermediária foram avaliados. Por fim, a letra que classifica o ligante quanto à deformação permanente foi obtida no teste *Multiple Stress Creep and Recovery*, descrito na seção 4.5.4.1.

4.5.4. Propriedades de Desempenho

Esta seção descreve os procedimentos de teste para avaliação dos efeitos do envelhecimento e do rejuvenescimento nas propriedades de deformação permanente e de fadiga dos ligantes asfálticos.

4.5.4.1. Deformação permanente: Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR)

A deformação permanente é um dos mecanismos de falha mais comum em pavimentos asfálticos, que se relaciona principalmente com as propriedades de alta temperatura do ligante. Para isso, a seleção de um ligante asfáltico adequado às condições de tráfego e clima potencializa uma maior durabilidade ao pavimento. Quando se avalia esta propriedade de danificação em misturas recicladas (principalmente em altos teores), observa-se um aumento

na resistência em virtude da maior rigidez do ligante, resultado do envelhecimento, e, portanto, não seria um problema a ser investigado.

Entretanto, a incorporação de agentes rejuvenescedores reduz a rigidez do ligante envelhecido, o que pode tornar a mistura susceptível se a redução for excessiva. Uma vez que o principal objetivo desta pesquisa é recuperar a fadiga do material, o monitoramento da resistência à deformação permanente com o rejuvenescimento torna-se importante para não resultar em misturas susceptíveis a outro tipo de danificação.

Assim, o teste *Multiple Stress Creep e Recovery* foi utilizado para avaliar a resistência à deformação permanente dos ligantes em diferentes condições de envelhecimento e rejuvenescimento, de acordo com a AASHTO T 350 (2019). O teste foi conduzido no DSR (Figura 59) com a geometria de 25 mm de diâmetro e 1 mm de gap, nas temperaturas de 58°C a 88°C para análise do envelhecimento, e na temperatura de 64°C para análise do rejuvenescimento (considerando um PGH de pavimento para o estado do RS (FACCIN et al., 2021) e também para efeitos comparativo).

O esquema de fluência e recuperação do teste com 20 ciclos em 0,1 kPa seguidos de mais 10 ciclos em 3,2 kPa está apresentado na Figura 61. Cada ciclo tem duração de 10 s, sendo 1 s de deformação cisalhante e outros 9 s de repouso. O menor nível de tensão (primeiros 20 ciclos) está no domínio LVE enquanto o maior nível de tensão (últimos 10 ciclos) encontra-se no domínio da danificação.

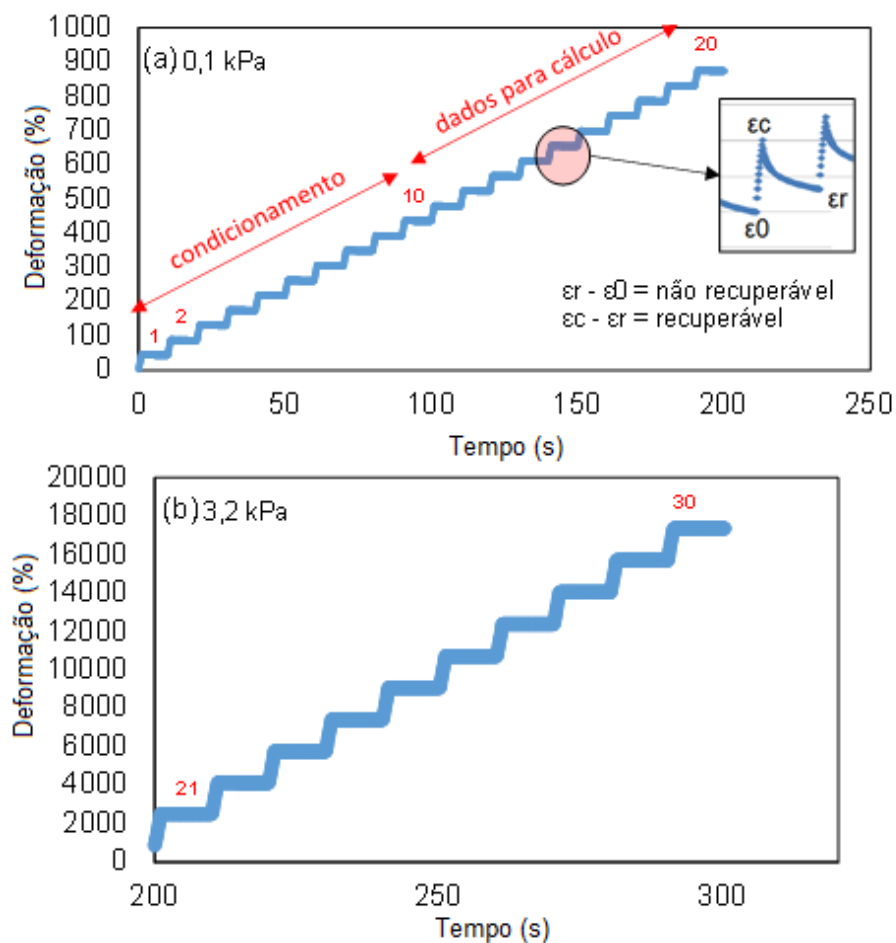
A parcela recuperável relaciona-se a uma variável denominada R% (percentual de recuperação). A parcela não recuperável é denominada de Jnr (compliance não recuperável), ou seja, corresponde ao dano permanente acumulado pós-deformação. Os dados experimentais foram utilizados para determinação dessas duas variáveis nos dois níveis de tensão. Os primeiros 10 ciclos na tensão 0,1 kPa são para condicionamento da amostra, enquanto os últimos 10 ciclos na tensão 0,1 kPa e os 10 ciclos na tensão de 3,2 kPa são utilizados para determinação dos seguintes parâmetros: $Jnr_{0,1}$, $Jnr_{3,2}$ e $R_{0,1}$, $R_{3,2}$.

O $Jnr_{0,1}$ e o $Jnr_{3,2}$ foram calculados pelas Equações 16 e 17, respectivamente. O $Jnr(0,1, N)$ e o $Jnr(3,2, N)$ são a compliance não-recuperável a 0,1 kPa e 3,2 kPa no ciclo N, respectivamente. O Jnr no ciclo N é calculado pela relação entre a deformação não recuperável ($\epsilon_r - \epsilon_0$) e a tensão em kPa.

$$Jnr_{0,1} = \frac{\sum_{N=11}^{20} [Jnr(0,1,N)]}{10} \quad (16)$$

$$Jnr_{3,2} = \frac{\sum_{N=1}^{10} [Jnr(3,2,N)]}{10} \quad (17)$$

Figura 61 - Esquema de fluência e recuperação com 20 ciclos a 0,1 kPa (a) e 10 ciclos a 3,2 kPa (b)



O $R_{0,1}$ e o $R_{3,2}$ foram calculados pelas Equações 18 e 19, respectivamente. O $R_r(0.1, N)$ e o $R_r(3.2, N)$ são o percentual de recuperação em 0,1 kPa e 3,2 kPa no ciclo número N , respectivamente. O R_r em cada ciclo é dado pela relação entre deformação recuperável ($\epsilon_c - \epsilon_r$) e a tensão em kPa.

$$R_{0.1} = \frac{\sum_{N=1}^{20} [R_r(0.1, N)]}{10} \quad (18)$$

$$R_{3.2} = \frac{\sum_{N=1}^{10} [R_r(3.2, N)]}{10} \quad (19)$$

O $Jnr_{3,2}$ serviu para para classificar os ligantes quanto ao nível de tráfego como padrão – Standard Traffic “S” ($2,0 < Jnr < 4,5$), pesado – Heavy Traffic “H” ($1,0 < Jnr < 2,0$), muito pesado – Very Heavy Traffic “V” ($0,5 < Jnr < 1,0$) ou extremamente pesado – Extremely Heavy Traffic “E” ($Jnr < 0,5$), de acordo com a AASHTO M 332 (2019). Assim, os efeitos do envelhecimento

e do rejuvenescimento no Jnr e no R% foram avaliados, assim como a construção dos gráficos de mistura.

4.5.4.2. Fadiga: *Linear Amplitude Sweep (LAS)*

Fadiga é um dos principais mecanismos de falha em pavimentos asfálticos, sendo resultado do dano acumulado devido às cargas cíclicas (tráfego) em uma faixa intermediária de temperatura. O principal fator que afeta o desempenho à fadiga do pavimento é o projeto estrutural: as espessuras e as características das camadas que compõem o sistema. No entanto, alguns fatores relacionados ao ligante asfáltico (teor, propriedades químicas, reológicas e de envelhecimento) podem alterar significativamente o comportamento do material, pois as fissuras por fadiga normalmente iniciam e propagam-se nas fases de ligante e mastic, uma vez que são os pontos mais fracos dentro do concreto asfáltico. Portanto, a seleção e o comportamento do material poderão ser melhorados se for viável quantificar a resistência à fadiga dos ligantes. Para isso, a capacidade de caracterizar e modelar a fadiga de ligantes é o primeiro passo para projetar misturas não susceptíveis a desenvolver falha prematura por fadiga (SAFEI, 2017).

Diferentes testes foram propostos para avaliar a fadiga dos ligantes. A especificação *Superpave* tem por referência o limite máximo de 5000 kPa para $|G^*| \cdot \sin \delta$ como indicador à fadiga. No entanto, possui a restrição de ser determinado em teste LVE (BAHIA, et al. 2001). O teste *Time Sweep (TS)* foi introduzido durante o NCHRP 9-10 para seguir meios experimentais comuns à fadiga, que é a perda de integridade do material sob carga repetida. O teste é considerado um método confiável, porém, a incerteza na duração para induzir e quantificar o dano não o favorece como um teste de rotina para a especificação *Superpave* (ANDERSON et al., 2001; MARTONO, BAHIA e D'ANGELO, 2007; BONNETTI, NAM e BAHIA, 2002).

Em resposta a esse problema, o teste *Linear Amplitude Sweep (LAS)* foi proposto. Neste teste, o processo de dano é acelerado através de uma amplitude de deformação sistematicamente crescente, o que reduz a duração de várias horas para minutos, e apresentou resultados que se correlacionaram razoavelmente bem com os dados de fadiga de campo (JOHNSON, 2010; HINTZ et al., 2011; NASCIMENTO, 2015). Além disso, os resultados do LAS foram unificados aos do TS a partir da interpretação dos dados pelo modelo S-VECD em pesquisas como Safaei (2017), Safaei, Castorena e Kim (2016), e Cao e Wang (2019).

Assim, a resistência à fadiga dos ligantes foi avaliada pelo teste LAS. Os resultados experimentais foram interpretados pelo modelo S-VECD, com diferentes definições de falhas, critérios de ruptura e equações de previsão de desempenho para identificar quais são sensíveis ao envelhecimento e ao rejuvenescimento. A partir disso, e do comparativo com os resultados de fadiga em misturas da seção 5.6.5.1, foi possível identificar as abordagens e os parâmetros para seleção e dosagem do agente rejuvenescedor com base no fenômeno de fadiga.

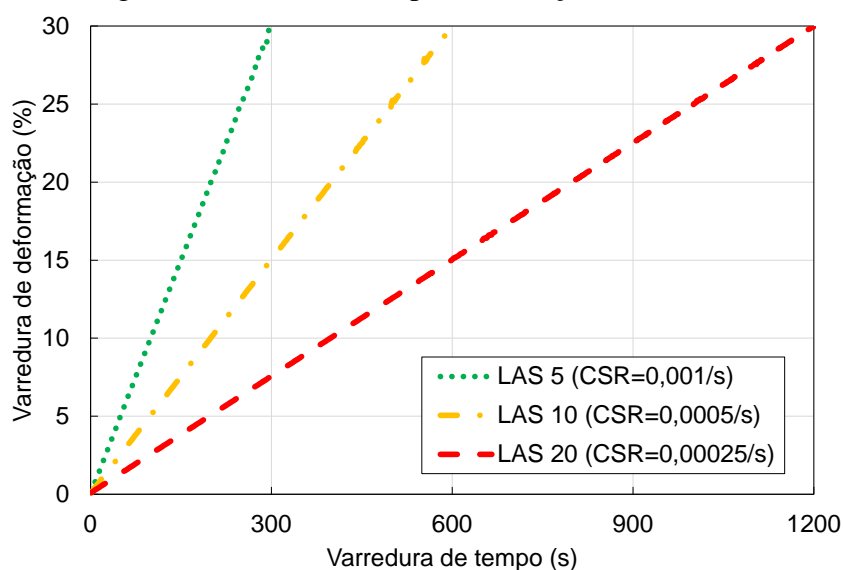
O ensaio foi conduzido no DSR com a geometria de 8 mm, gap de 2 mm em duas amostras por ligante, na temperatura de 19°C. O teste consistiu em duas etapas:

a) uma varredura de frequência foi realizada em uma amplitude de deformação de 0,1% para determinação da resposta do material não danificado, a taxa de evolução de dano (α) de acordo com a Equação 20, onde m é o valor absoluto da inclinação log-log do módulo de relaxamento viscoelástico linear;

$$\alpha = 1 + \frac{1}{m} \quad (20)$$

b) uma varredura de amplitude de deformação de cisalhamento oscilatória em rampa linear de 0,1 a 30% em três perfis de carregamento para aplicação do modelo S-VECD: 300 segundos (LAS 5), 600 segundos (LAS 10) e 1200 segundos (LAS 20). O perfil de carregamento é também chamado de incrementos da amplitude de deformação por ciclo (Cyclic Strain Rate - CSR), que correspondem aos períodos anteriores a CSR = 0,001/s, CSR = 0,0005/s e CSR = 0,00025/s, respectivamente, conforme exibido na Figura 62.

Figura 62 – Perfis de carregamento no teste LAS para utilização do S-VECD



Os resultados forneceram os parâmetros necessários para estimar o dano por fadiga utilizando o S-VECD. Detalhes completos sobre a teoria do modelo são fornecidos em Underwood, Kim e Guddati (2010), Underwood (2011) e Safaei et al. (2014), sendo aqui apresentado apenas a estrutura de análise, por meio da Tabela 14.

A relação de dano característica, ou a curva característica de dano (C versus S), que descreve a perda de integridade do material devido ao acúmulo de dano foi ajustada ao modelo de potência da Equação 21, onde C_1 e C_2 são os coeficientes de ajuste.

Tabela 14 - Estrutura de análise S-VECD para ligantes

Propriedade	Ligante (Torsão cíclica no DSR)
Pseudo deformação	$\gamma_p^R = \gamma_p \cdot G^* _{LVE}$
Energia de pseudo deformação	$W^R = \frac{1}{2} C^*(S) (\gamma_p^R)^2$
Pseudo rigidez	$C^*(S) = \frac{\tau_p}{\gamma_{p.DMR}^R}$
Dano	$S(t) = \sum_{i=1}^N \left[\frac{DMR}{2} (\gamma_p^R)^2 (C_{i-1} - C_i) \right]^{\frac{\alpha}{1+\alpha}} \cdot [t_i - t_{i-1}]^{\frac{1}{1+\alpha}}$
Definição de parâmetros	γ_p^R = pico da pseudo deformação em um determinado ciclo; γ_p = pico da deformação em um determinado ciclo; W^R = energia de pseudo-deformação armazenada; $C(S)$ = pseudo-rigidez; τ_p = tensão de cisalhamento efetiva; $ G^* _{LVE}$ = módulo de cisalhamento dinâmico DMR = razão do módulo dinâmico ($ G^* _{\text{fingerprint}} / G^* _{LVE}$); $S(t)$ = intensidade do dano; t = tempo reduzido;

Fonte: Adaptado de Safei (2017)

$$C = 1 - C_1 (S)^{C_2} \quad (21)$$

Esta estrutura de análise é concluída experimentalmente com uma definição de falha e critério de ruptura. O primeiro prescreve quando uma falha no material ocorre (determina a vida de fadiga em testes). O critério de ruptura é representado por uma função que correlaciona duas variáveis: uma com as respostas do material e outra com as cargas de entrada.

A definição de falha sob carregamento de fadiga deve ser determinada com base nas características físicas de intensidade e distribuição de danos dentro dos corpos de prova, no entanto, é difícil capturar e monitorar o estado físico interno do material durante o carregamento (Cao e Wang, 2018). Existem diferentes definições de falhas para interpretar os resultados

experimentais do teste LAS. As seguintes definições de falha (Figura 63) foram investigadas quanto a sensibilidade de identificar o envelhecimento e o rejuvenescimento:

- a) Queda de 50%|G*|;
- b) Queda de 35% da integridade (representada por |G*|.sen δ) inicial do material;
- c) Pico do C.N;
- d) Pico do τ.N, onde τ é a tensão de cisalhamento;
- e) Pico do τ;
- f) Pico da energia de pseudo-deformação armazenada (PSE), ou W_S^R ;
- g) Pico do $C^2.N.(1-C)$;

Três critérios de ruptura foram avaliados, o envoltório de ruptura do G^R vs Nf, W_{sum}^R vs SE e Cum(1-C) vs Nf. A abordagem energética do G^R baseia-se na taxa de liberação da energia de pseudo-deformação (G^R), que é independente do modo de carga e temperatura, sendo relacionada ao Nf. A análise dentro do domínio da pseudo-deformação elimina os efeitos tempo-dependência do material, o que permite avaliar o dano verdadeiro. Foi desenvolvida no S-VECD para misturas asfálticas (ZHANG, 2012; ZHANG et al., 2013; NOROUZI, SABOURI e KIM, 2014; SABOURI e KIM, 2014) e incorporada aos ligantes em Wang et al. (2015).

O G^R pode ser calculado pela Equação 22.

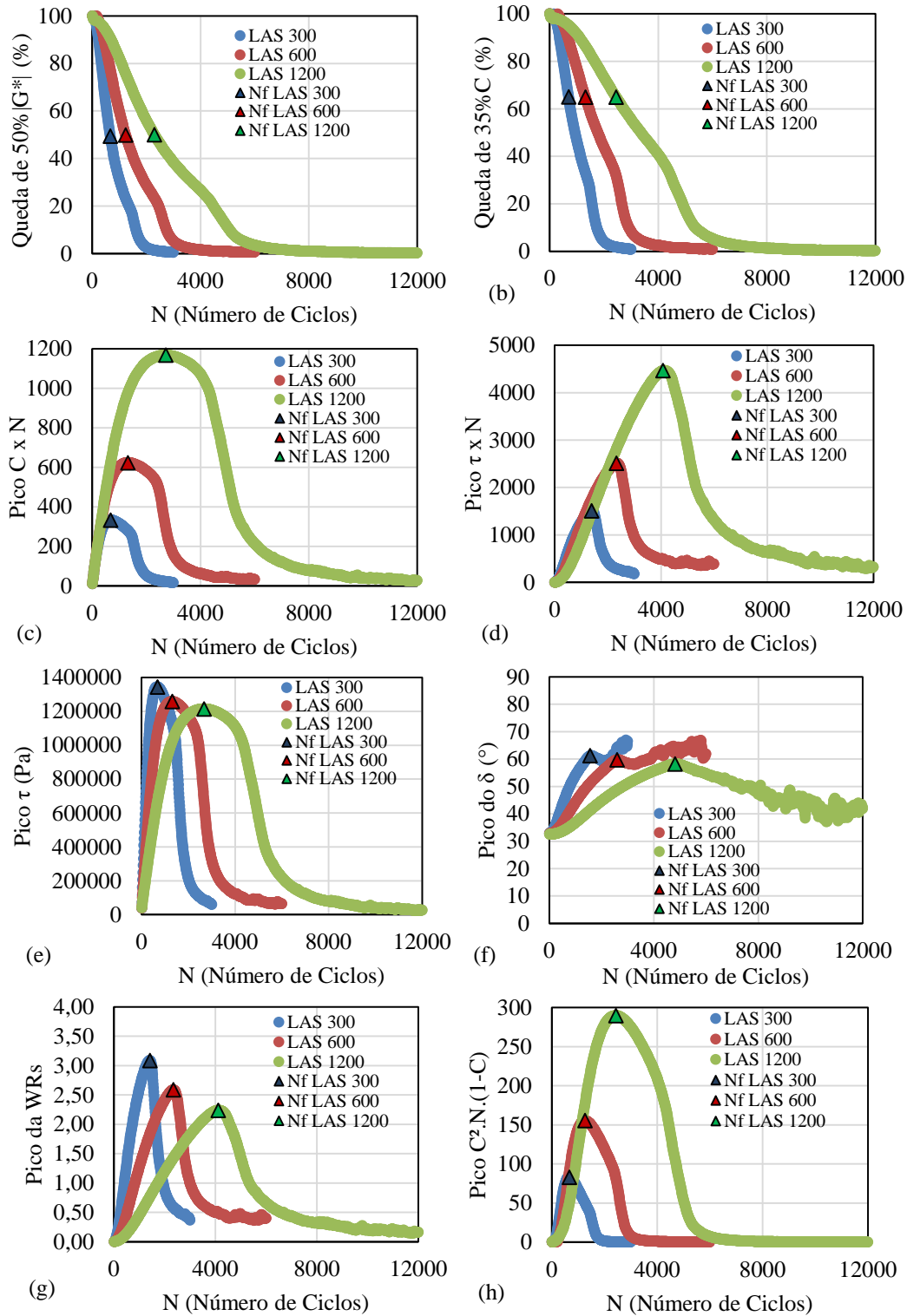
$$G^R = \frac{\overline{W_r^R}}{Nf} = \frac{A}{Nf} = \frac{A}{Nf^2} \quad (22)$$

Onde A representa a área abaixo da curva do W_r^R (Equação 23) até a falha (Nf), e W_r^R corresponde a energia de pseudo deformação dissipada. Para a predição da vida de fadiga, a curva G^R por Nf é descrita por um modelo de potência conforme a Equação 24, onde Y e Δ são os coeficientes de ajuste.

$$W_r^R = \frac{1}{2} \cdot (1 - C) \cdot (\gamma_p^R)^2 \quad (23)$$

$$G^R = Y \cdot Nf^\Delta \quad (24)$$

Figura 63 - Definições de falhas analisadas: (a) queda de 50% $|G^*|$, (b) queda de 35% C, (c) pico de C.N, (d) pico de $\tau.N$, (e) pico de τ , (f) pico do δ , (g) pico do W_S^R e (h) pico do $C^2.N.(1-C)$



O critério de falha baseado em W_{sum}^R vs SE define uma relação de lei de potência entre as variáveis conforme a Equação 25, onde W_{sum}^R é a energia de pseudo deformação acumulada

(Equação 26), SE representa o esforço mecânico necessário para deformar e danificar o material até a falha (Equação 27) e λ e μ são os coeficientes da regressão.

$$W_{Sum}^E = \lambda \cdot SE^\mu \quad (25)$$

$$W_{Sum}^R = \sum_{i=1}^{Nf} W_i^R = \int_0^{Nf} \frac{1}{2} \cdot DMR \cdot C \cdot \gamma^R)^2 \cdot dN \quad (26)$$

$$SE = (\sum_{i=1}^{Nf} \gamma_i) \cdot (|G^*|_{LVE})^2 \quad (27)$$

O terceiro critério de ruptura é o Cum (1-C) vs Nf, desenvolvido para misturas asfálticas por Wang e Kim (2017) e adaptado aos ligantes em Zhang, Sias e Dave (2020). A relação entre as variáveis é em modelo linear que passa pela origem, sendo a inclinação denominada de D^R . O critério utiliza a redução média da pseudo rigidez (C) até a falha, sendo o D^R calculado pela soma de (1-C) dividida pela vida de fadiga (Nf) em cada CSR individualmente (Equação 28). O D^R médio entre os três CSRs é então atribuído ao ligante asfáltico. Um maior valor de D^R está associado a uma maior capacidade de acúmulo de danos na mistura, ou capacidade de dissipar energia até o momento da ruptura.

$$D^R = \frac{\int_0^{Nf} (1-C) \cdot dN}{Nf} \quad (28)$$

Por fim, com os dados LVE, as curvas características de dano e os coeficientes do S-VECD nas diferentes definições de falha, foi avaliada a previsão da vida de fadiga por meio de três formulações, no qual se obtém Nf em qualquer amplitude de deformação aplicada. A primeira proposta em Wang et al. (2015) é definida pela Equação 29. A segunda e terceira formulação são derivadas da Equação 30, com a seguinte diferença: uma utiliza no cálculo a frequência de 10 Hz, conforme Wang et al. (2018), e a outra utiliza a frequência reduzida (SAFAEI, 2017) para a previsão de desempenho.

$$Nf = \frac{f \cdot 2^\alpha \cdot S^{1-\alpha \cdot C_2 + \alpha}}{(1-\alpha \cdot C_2 + \alpha) \cdot (C_1 \cdot C_2)^\alpha \cdot (|G^*|_{LVE} \cdot \gamma_p)^{2\alpha}} \quad (29)$$

$$Nf = \left[\frac{k}{a} \cdot (\gamma)^{2+2\alpha \left(\frac{C_2}{p}\right)} \right] \left(\frac{1}{(b+1-\left(\frac{C_2}{p}\right))} \right) \quad (30)$$

A Equação 30 requer o teste LAS em três taxas de amplitude de deformação para determinação dos coeficientes de G^R vs N_f , enquanto que a Equação 29 é determinada com uma única taxa de deformação. Assim, a Equação 29 não pode ser utilizada para prever a vida de fadiga em qualquer condição de carregamento, diferentemente da Equação 30, que ao incorporar Y e Δ do G^R vs N_f , permite prever o número de ciclos de falha para condições diferentes daquelas utilizadas na caracterização dos ligantes.

Wang, Chen e Xie (2020) sugerem níveis de amplitude de deformação de 3% e 6% para representar estruturas de pavimentos fortes e fracas, respectivamente. Zhang et al. (2020) citam 2,5% e 5% para níveis baixo e alto de deformação para definição da vida de fadiga. Os valores de deformação de 2,5% e 5% foram propostos por Bahia et al. (2013) para prever a vida de fadiga para estruturas de pavimento asfáltico fortes (acima de 10 cm de espessura) e fracas (menos de 10 cm de espessura), respectivamente. Assim, a vida de fadiga dos ligantes foram simuladas nos níveis de 1%, 2,5% e 5%. Além disso, a área limitada pela curva de fadiga em escala log-log (Fator de Fadiga de Ligantes – FFL) entre as amplitudes de deformação de 1% a 2,5%, 2,5% a 5% e 1% a 5% foram determinadas para efeito comparativo com o dano em misturas asfálticas.

Com isso, foram verificados os efeitos do envelhecimento e do rejuvenescimento nas diferentes definições de falhas, critérios de ruptura, na C vs S , e nas equações de previsão da vida de fadiga. Além disso, gráficos de mistura entre as diferentes concentrações dos agentes rejuvenescedores foram construídos e determinados os teores ótimos com base nos diferentes parâmetros extraídos das formulações de cálculo provenientes do teste LAS.

Os parâmetros e as formulações que identificam os efeitos do envelhecimento e do rejuvenescimento com boa correlação aos danos por fadiga em misturas asfálticas são propostos para seleção e dosagem do agente rejuvenescedor com base no fenômeno de fadiga.

4.6. RESULTADOS

Esta seção apresenta os resultados e análises a partir do programa experimental proposto e desenvolvido conforme a Figura 56. Primeiramente são discutidas a influência do envelhecimento na penetração, nas propriedades reológicas e de desempenho dos ligantes. Paralelamente, os ligantes que passaram pelo envelhecimento sob condições de pista (ligantes extraídos e recuperados dos RAPs) são comparados aos ligantes envelhecidos em laboratório. Por fim, os efeitos da adição e concentração dos agentes rejuvenescedores em ligantes RAPs são apresentados e discutidos.

O método do coeficiente de determinação R^2 foi utilizado para correlacionar diferentes variáveis investigadas, sendo a qualidade das correlações classificadas conforme a Tabela 15 (TRAN e HALL, 2005; YUSSOF et al., 2010). As correlações identificadas reportam aos materiais tratados nesta pesquisa, e assim, buscam-se tendências que possam ser observadas como resultado do envelhecimento e rejuvenescimento.

Tabela 15 - Critérios estatísticos para a qualidade do ajuste

Correlação	R^2
Excelente	>0,90
Bom	0,70-0,89
Moderada	0,40-0,69
Fraca	0,20-0,39
Muito fraca	<0,19

Fonte: Adaptado de Tran e Hall (2005) e Yussouf et al. (2010)

4.6.1. Influência do envelhecimento nas propriedades dos ligantes

Diante dos diferentes parâmetros para determinação do teor ótimo de agente rejuvenescedor existentes hoje na indústria da pavimentação para produção de misturas usinadas recicladas à quente, a análise do efeito do envelhecimento nas propriedades dos ligantes asfálticos torna-se um fator importante para avaliar qual a solução mais eficiente e com melhor custo-benefício que resulte numa mistura asfáltica com bom desempenho, resultado da recuperação das propriedades do ligante envelhecido presente no RAP.

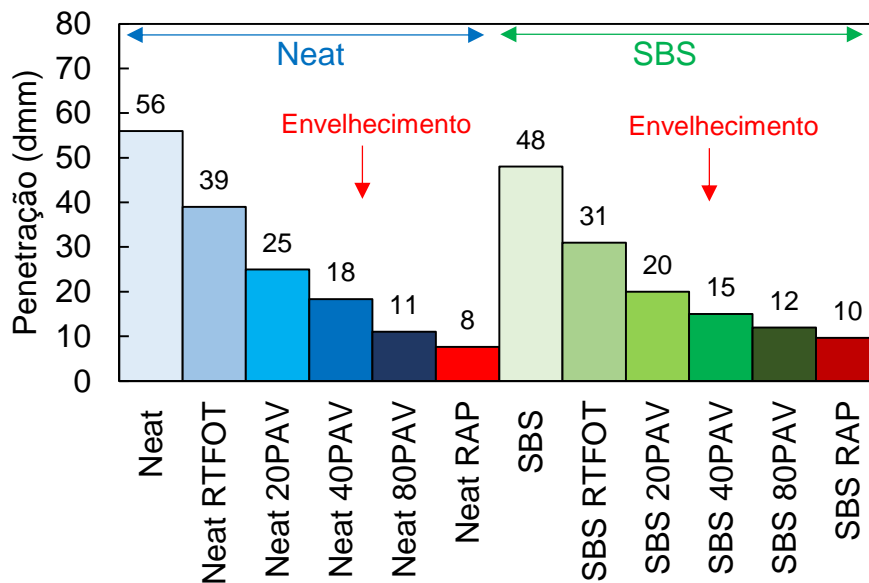
A primeira hipótese aqui avaliada consiste em verificar se o envelhecimento promove alterações de intensidade equivalentes nas propriedades de alta, intermediária e baixa temperatura, o que resultaria em teores, independente do critério, semelhantes ou equivalentes. No entanto, se o efeito do envelhecimento é mais acentuado em propriedades relacionadas às altas temperaturas comparadas às propriedades de temperatura intermediária, ou vice-versa, possivelmente ter-se-á como resultado uma ampla faixa de teor ótimo considerando diferentes propriedades como referência.

Diante disso, essa seção avalia os pressupostos acima que auxiliam na compreensão e análise dos resultados da seção seguinte, que aborda o rejuvenescimento. Esta seção se subdivide no efeito do envelhecimento na penetração, no comportamento LVE, no PGH, no teste de MSCR e LAS.

4.6.1.1. Penetração

A Figura 64 apresenta os resultados da propriedade física de penetração para os dois ligantes virgens envelhecidos em RTFOT e 20, 40 e 80 horas de PAV, além de dois ligantes extraídos e recuperados de duas diferentes fontes de RAP. Observa-se a partir dos dados brutos uma redução da penetração com o aumento do grau de envelhecimento.

Figura 64 - Resultados da medida de penetração (dmm) com o grau de envelhecimento dos ligantes asfálticos



A partir dos resultados, o *Retained Penetration Ageing Index* e a taxa de queda da penetração em relação a condição de envelhecimento anterior foram determinadas e estão exibidos na Tabela 16. Os resultados demonstram que a queda da penetração com o aumento do grau de envelhecimento dos ligantes virgens ocorre de forma similar quanto a velocidade para ambos os materiais, ou seja, o polímero SBS não resultou em redução da velocidade de envelhecimento do ligante quando comparado ao ligante sem modificação.

Além disso, as maiores taxas de redução da penetração em relação a condição anterior ocorrem até um nível de envelhecimento de 20PAV, representando uma perda acumulada maior que 50%. Após 20PAV, uma redução na taxa de envelhecimento é identificada para ambos os tipos de ligantes.

Por fim, os valores de penetração dos ligantes RAPs foram obtidos aproximadamente com envelhecimento em RTFOT + 80 horas de PAV, ou seja, por essa grandeza física, o nível de oxidação entre os materiais de campo e laboratório são semelhantes. No entanto, como será

apresentado e discutido na sequência, o envelhecimento dos materiais em pista é consideravelmente maior que os materiais de laboratório quando observadas as propriedades reológicas e de desempenho.

Tabela 16 - Queda no valor de penetração com o grau de envelhecimento em %

Ligantes asfálticos	RP	Queda da penetração em relação a condição virgem	Δ % em relação a condição de envelhecimento anterior
Neat	-	Referência	-
Neat RTFOT	0,70	30%	30%
Neat 20PAV	0,45	55%	25%
Neat 40PAV	0,33	67%	12%
Neat 80PAV	0,20	80%	13%
Neat RAP	0,14	86%	6%
SBS		Referência	
SBS RTFOT	0,65	35%	35%
SBS 20PAV	0,42	58%	23%
SBS 40PAV	0,31	69%	11%
SBS 80PAV	0,25	75%	6%
SBS RAP	0,20	80%	5%

4.6.1.2. Caracterização LVE

Os efeitos do envelhecimento em propriedades e índices LVE dos ligantes em uma ampla faixa de frequência (0,1 a 30 Hz) e temperatura (-5 a 75°C) são apresentados nessa seção. Os fatores de deslocamento aT para T_{ref} de 25°C e os coeficientes de ajuste pelo WLF e polinomial estão apresentados na Tabela 17. Os parâmetros do modelo 2S2P1D obtidos para os materiais investigados, considerado eficaz na descrição do comportamento reológico do ligante dentro do domínio viscoelástico linear, estão apresentados na Tabela 18.

Os valores de aT para os ligantes em seus diferentes níveis de envelhecimento estão plotados na Figura 65. Nota-se que os fatores de translação são mais sensíveis e influenciados pelo envelhecimento em altas temperaturas (entre 45°C e 75°C), diferentemente do identificado nas baixas e intermediárias temperaturas (entre -5°C e 15°C). Essa constatação é a primeira evidência que o envelhecimento resulta em alterações reológicas mais severas em propriedades de alta temperatura quando comparados às temperaturas intermediárias e baixas.

Tabela 17 – Coeficientes de translação (at) para Tref = 25°C e coeficientes de ajuste WLF e polinomial com o envelhecimento

Ligantes	at									WLF		Arrhenius		
	-5	5	15	25	35	45	55	65	75	C1	C2	a1	a2	a3
Neat	39811	631	22	1	5,10E-02	7,10E-03	1,30E-03	3,00E-04	7,90E-05	15,05	126,21	0,00087	-0,16500	3,54316
Neat RT	39811	631	22	1	5,50E-02	7,10E-03	1,30E-03	3,00E-04	7,90E-05	15,05	126,21	0,00087	-0,16500	3,54316
Neat 20PAV	25119	537	22	1	5,00E-02	4,10E-03	6,30E-04	1,10E-04	2,80E-05	16,14	121,29	0,00087	-0,16955	3,50496
Neat 40PAV	25119	537	22	1	4,60E-02	3,90E-03	5,00E-04	8,90E-05	2,00E-05	16,98	124,36	0,00086	-0,17104	3,49338
Neat 80PAV	25119	631	22	1	3,50E-02	3,20E-03	4,00E-04	6,30E-05	1,30E-05	17,9	127,91	0,00086	-0,17254	3,48204
Neat RAP	39811	794	25	1	5,60E-02	3,50E-03	3,80E-04	5,00E-05	7,90E-06	17,66	124,87	0,00086	-0,17284	3,47977
SBS VG	22387	631	22	1	5,60E-02	7,90E-03	1,60E-03	4,00E-04	1,10E-04	15,3	133,93	0,00087	-0,16327	3,53932
SBS RT	63096	708	25	1	4,50E-02	6,30E-03	1,10E-03	2,50E-04	6,30E-05	16,3	135,77	0,00087	-0,16546	3,52056
SBS 20PAV	63096	794	25	1	3,70E-02	4,00E-03	6,30E-04	1,30E-04	3,00E-05	17,1	130,34	0,00086	-0,16915	3,49022
SBS 40PAV	39811	794	25	1	3,20E-02	3,20E-03	5,00E-04	8,90E-05	2,00E-05	18,01	133,74	0,00086	-0,17064	3,47868
SBS 80PAV	28184	708	25	1	4,50E-02	2,80E-03	3,20E-04	5,00E-05	8,90E-06	32,17	245,73	0,00069	-0,16905	3,73036
SBS RAP	25119	631	22	1	5,00E-02	2,80E-03	3,20E-04	4,50E-05	7,90E-06	19,3	135,39	0,00086	-0,17363	3,45605

Tabela 18 – Coeficientes de ajuste pelo modelo 2s2p1s com o envelhecimento

Ligantes	2s2p1d parâmetros						
	E ₀₀	E ₀	k	h	d	t _E	β
Neat	0	7,60E+08	0,23	0,55	1,8	3,50E-06	130
Neat RT	0	7,60E+08	0,23	0,55	1,9	5,70E-06	150
Neat 20PAV	0	7,60E+08	0,23	0,55	2,5	1,50E-05	380
Neat 40PAV	0	7,60E+08	0,23	0,55	2,7	2,00E-05	680
Neat 80PAV	0	7,60E+08	0,23	0,55	3,0	4,00E-05	1400
Neat RAP	0	8,80E+08	0,23	0,56	3,6	5,00E-04	600
SBS VG	5	6,00E+08	0,33	0,8	4,5	3,50E-05	500
SBS RT	0	6,20E+08	0,34	0,78	6,5	7,00E-05	500
SBS 20PAV	0	7,00E+08	0,32	0,74	7,5	1,50E-04	300
SBS 40PAV	0	6,50E+08	0,31	0,71	7,2	2,60E-04	250
SBS 80PAV	0	7,20E+08	0,3	0,64	7,5	4,00E-04	1400
SBS RAP	0	8,40E+08	0,28	0,66	7,5	2,00E-03	140

O espaço cole-cole (a), o diagrama black (b), as curvas mestras de $|G^*|$ (c) e δ (d) em diferentes condições de envelhecimento estão representadas nas Figura 66 e Figura 67 para os ligantes sem e com modificação, respectivamente. Os espaços cole-cole não exibem o efeito direto do envelhecimento na resposta dos materiais, com exceção para os valores correspondentes a temperatura de -5°C . Observa-se menores valores de $|G^*|. \sin \delta$ (menos viscoso) e maiores valores de $|G^*|. \cos \delta$ (mais elástico) com o envelhecimento. No entanto, os valores de módulo e ângulo de fase em temperaturas negativas podem apresentar erros de conformidade quando obtidos no reômetro de cisalhamento dinâmico.

Figura 66 – Espaço cole-cole (a), diagrama black (b), curvar mestras de módulo dinâmico (c) e ângulo de fase (d) dos ligantes sem modificação

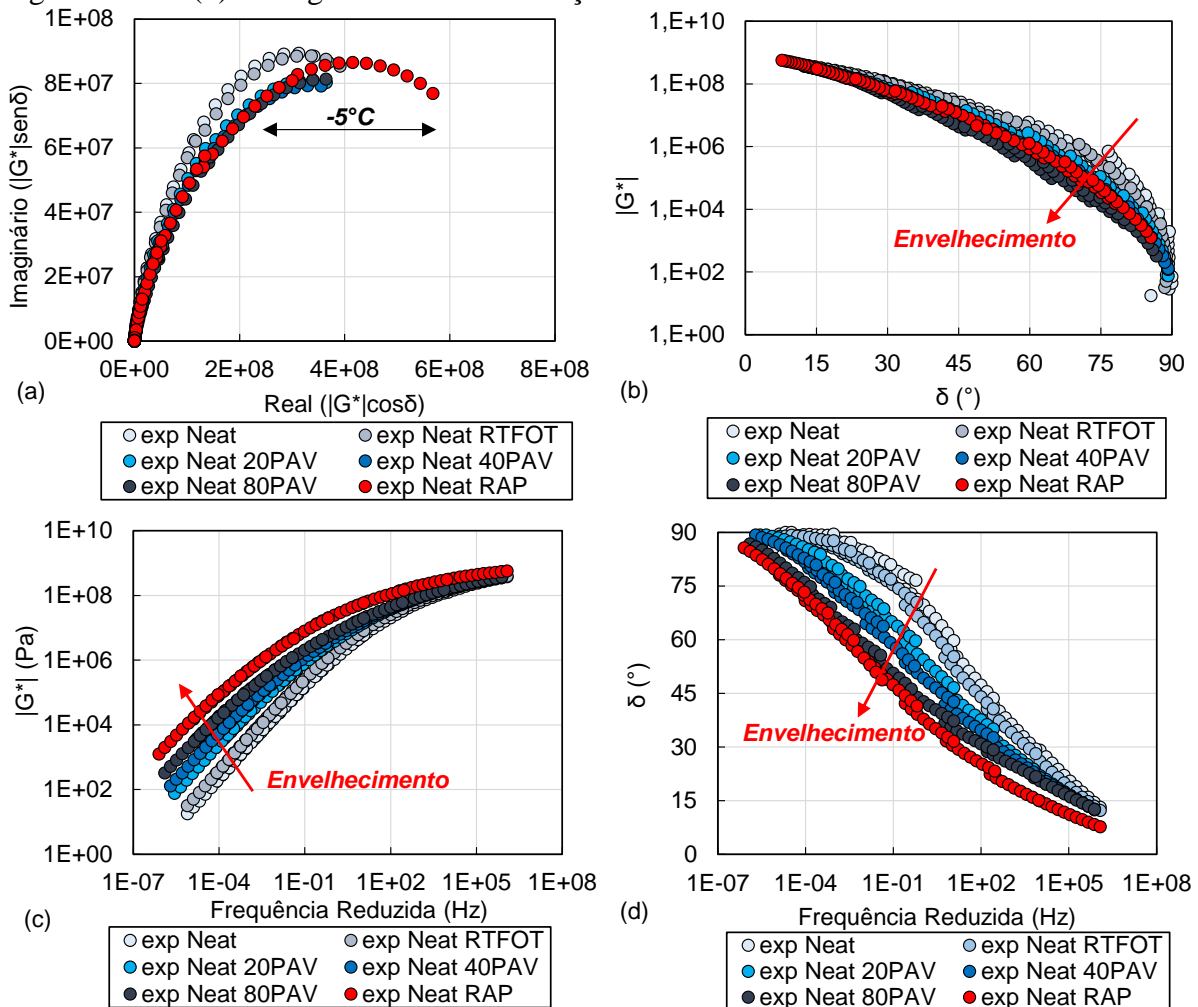
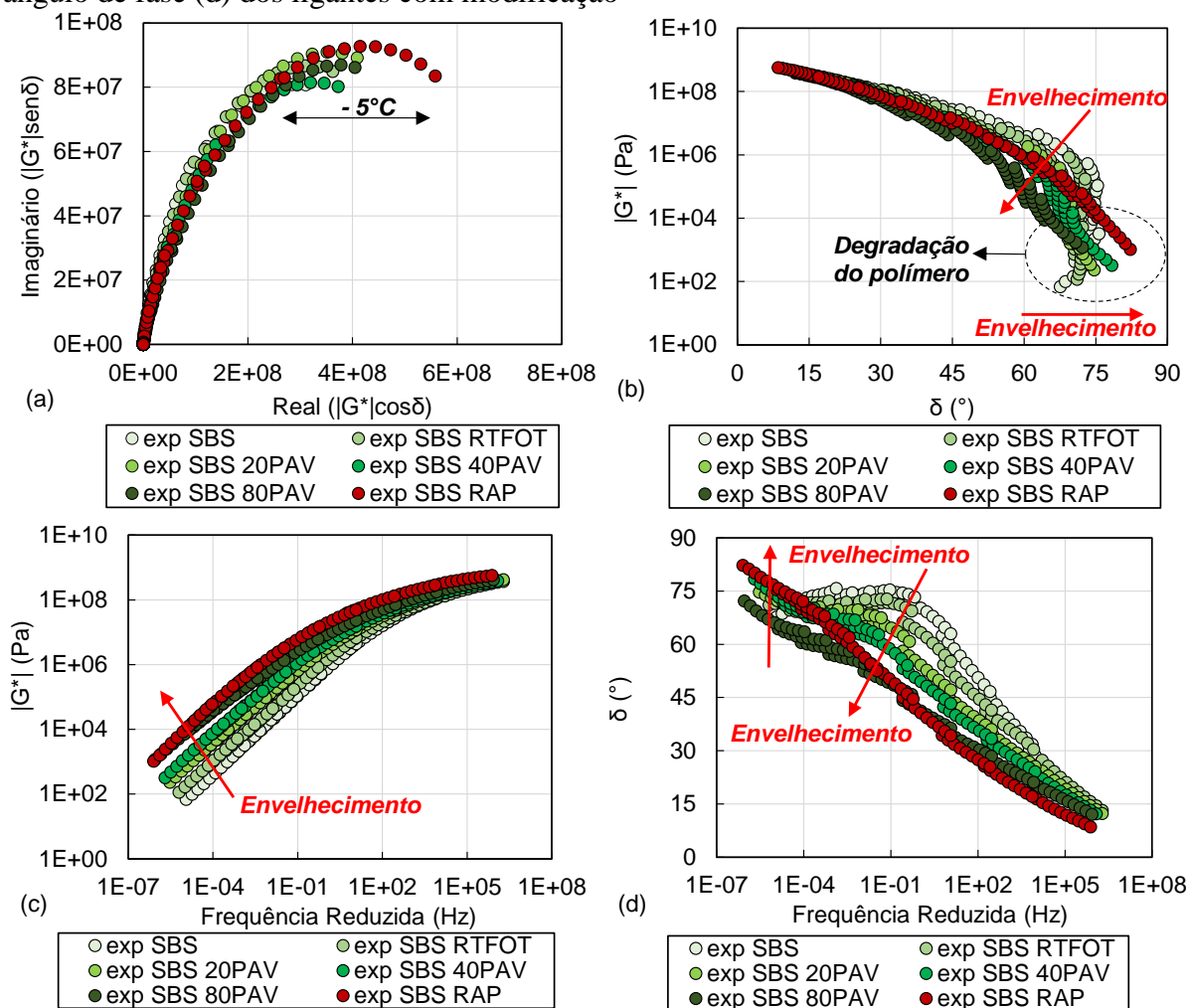


Figura 67 – Espaço cole-cole (a), diagrama black (b), curvar mestras de módulo dinâmico (c) e ângulo de fase (d) dos ligantes com modificação



No diagrama black é possível rastrear e identificar o efeito da modificação e do envelhecimento dos ligantes, além da conformidade do PSTT. Os resultados permitem concluir que, em geral, o PSTT vale para todos os materiais aqui investigados independentemente do tipo e nível de envelhecimento devido a unicidade das curvas. A modificação por SBS evitou o comportamento puramente viscoso ($\delta = 90^\circ$) em altas temperaturas a partir de uma zona de platô na região de frequência intermediária a baixa (aproximadamente 75°), o que não se identifica no ligante sem modificação. A extensão desse platô tende a reduzir com o envelhecimento, criando uma região que tende ao comportamento puramente viscoso nas frequências reduzidas mais baixas. Esse “amolecimento” pós platô resulta da degradação do copolímero SBS no qual a fase de ligante começa a desempenhar um papel importante (ZHANG et al., 2019).

Por fim, o envelhecimento desloca as curvas mestras de $|G^*|$ no sentido das baixas frequências e de elevação do nível de rigidez. Assim, o material torna-se mais frágil e rígido, pois sua relaxação é muito menor em valores mais altos. Com relação as curvas mestras de δ , há um deslocamento em direção aos menores ângulo de fase. Na prática, o envelhecimento tornou os materiais mais elásticos do que propenso a fluir de forma viscosa, ou seja, o material tende a armazenar mais energia e, como consequência, um acúmulo mais rápido de tensão seria observado durante uma deformação repetida.

Além disso, as curvas mestras exibem que a intensidade do efeito do envelhecimento em termos de mudança de $|G^*|$ e δ possuem diferentes magnitudes de acordo com a frequência reduzida em análise quando comparada as diferentes condições ao ligante virgem. Dessa forma, duas constatações podem ser inferidas a partir do envelhecimento oxidativo: maior intensidade nas propriedades reológicas medidas em baixas frequências reduzidas (ou altas temperaturas) e menor intensidade nas intermediárias e baixas frequências (baixas e intermediárias temperaturas); redução da susceptibilidade à temperatura e frequência a partir da redução da extensão da variação de $|G^*|$ na faixa de frequência reduzida total.

A partir disso, a hipótese levantada anteriormente sobre o envelhecimento promover alterações reológicas não proporcionais em relação ao espectro de frequência e temperatura ficou evidenciada a partir da análise dos resultados apresentados.

Quantificar e discretizar as mudanças reológicas em faixas de frequência reduzida devido aos efeitos do envelhecimento é necessário para a compreensão futura do efeito contrário: o rejuvenescimento e os diferentes teores de dosagem de acordo com o domínio que se encontra o critério utilizado. Dessa forma, duas análises foram conduzidas com esse objetivo.

Na primeira abordagem foi calculado o aumento percentual de $|G^*|$ e de redução do δ dos ligantes envelhecidos em relação aos ligantes virgens com base nos dados experimentais das temperaturas de 5 a 75°C e frequência de 11,6 Hz. Os resultados estão apresentados na Figura 68 e a Figura 69, respectivamente, para os ligantes com e sem modificação. Os valores de $|G^*|$ estão em a (com RAP) e b (sem RAP), enquanto que os valores de δ em c.

Figura 68 – Aumento percentual de $|G^*|$ (a e b) e redução percentual do δ (c) dos ligantes envelhecidos em relação ao ligante virgem sem modificação

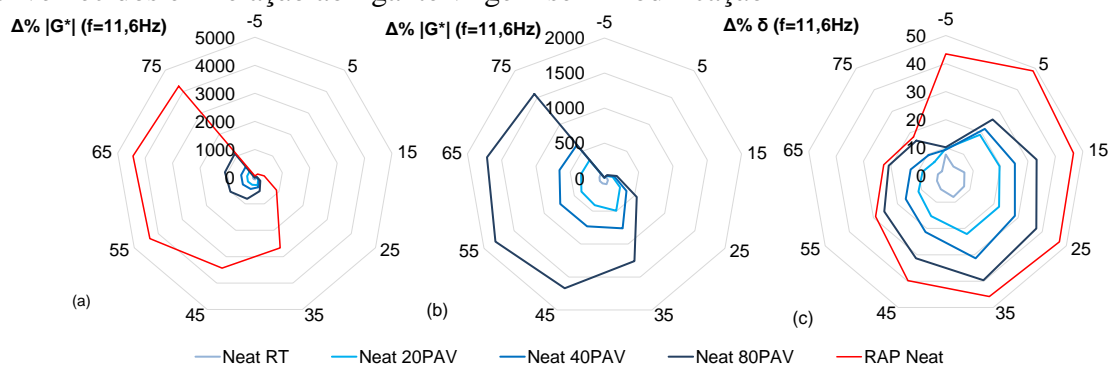
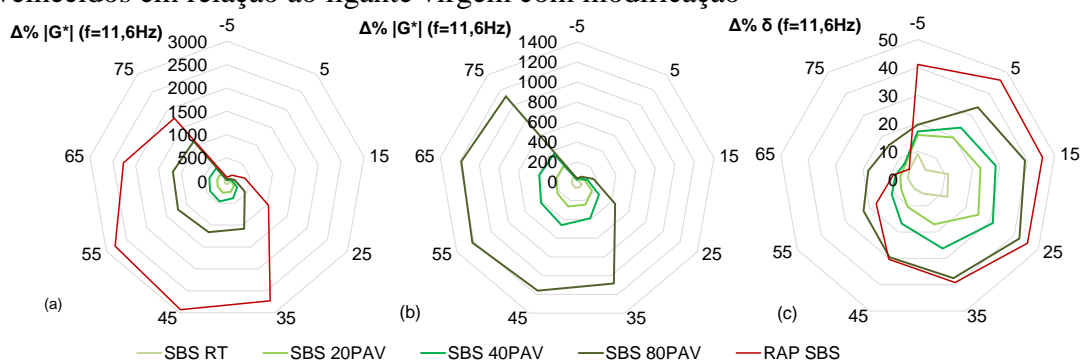


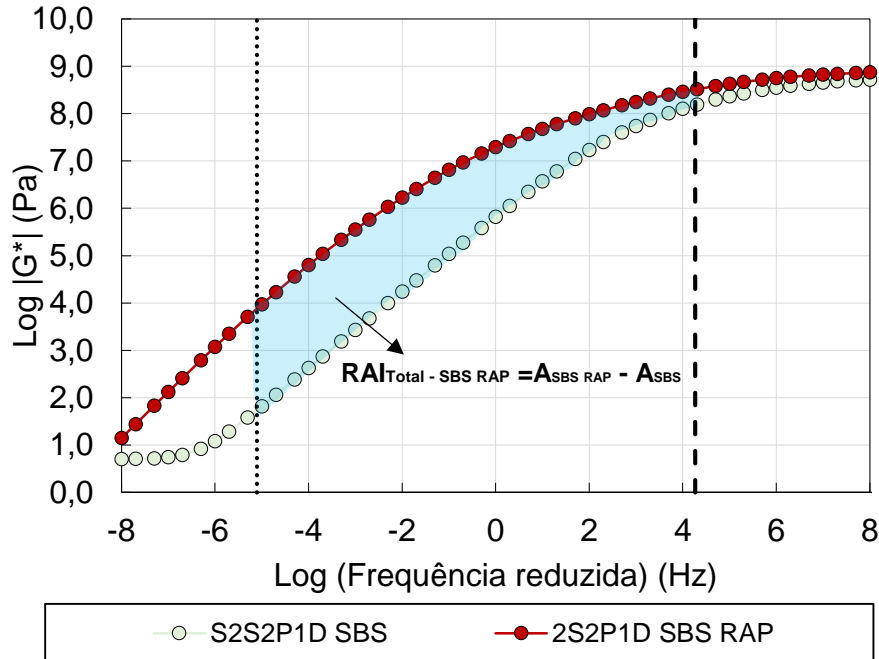
Figura 69 - Aumento percentual de $|G^*|$ (a e b) e redução percentual do δ (c) dos ligantes envelhecidos em relação ao ligante virgem com modificação



As maiores intensidades de aumento nos valores de $|G^*|$ devido ao envelhecimento ocorrem nas temperaturas entre 35°C a 75°C, enquanto que em termos de δ , as reduções mais acentuadas são identificadas entre 5 e 35°C. Além disso, o envelhecimento de laboratório RTFOT + 80 horas de PAV não reproduziu o nível de envelhecimento dos ligantes RAPs.

Diferentemente da análise anterior que se limita a uma frequência experimental específica, a segunda abordagem verifica o envelhecimento a partir do cálculo da diferença entre a área sob as curvas mestre de módulo dinâmico envelhecidas e não envelhecidas dentro faixas pré-definidas de frequências reduzidas (Figura 70), resultando no índice denominado *Rheological Ageing Index* (RAI).

Figura 70 – Cálculo do RAI entre os ligantes SBS RAP e SBS considerando o espectro total de frequência reduzida.



O espectro de frequência reduzida foi fragmentado em três faixas: faixa completa de log (-5.10) a log (4.27) Hz (RAI_{Total}), faixa de log (-5.10) a log (-1.00) Hz relacionada às altas temperaturas e a deformação permanente (RAI_{DP}), e, por fim, faixa de log (-0.52) a log (-4.27) Hz relacionada às temperaturas intermediárias e ao dano por fadiga (RAI_{Fad}). A Figura 71 exhibe as curvas mestras (modeladas pelo 2S2P1D) para os ligantes sem modificação (a) e com modificação (b) conforme o nível de envelhecimento e os limites de frequências reduzidas considerados.

A Figura 72 apresenta os índices RAI_{FAD} , RAI_{DP} e RAI_{TOTAL} extraídos das curvas mestras, no qual fornecem evidências de que a intensidade do aumento de rigidez decresce das altas temperaturas (deformação permanente) para as baixas e intermediárias temperaturas (trincamento por fadiga). Considerando um mesmo nível de envelhecimento, a área entre as curvas mestras na faixa de frequência relacionada à deformação permanente é superior ao dobro da área calculada na faixa relacionada à fadiga dos ligantes asfálticos. Além disso, o modificador SBS não retardou os efeitos do envelhecimento em relação ao ligante sem modificação, pois os valores de RAI são similares para um mesmo nível de envelhecimento.

Essas evidências justificam os diferentes teores de dosagem do agente rejuvenescedor determinados de acordo com o critério ou parâmetro selecionado para retornar a condição virgem. Sob a ótica da rigidez, se a propriedade de referência escolhida for vinculada às altas temperaturas, possivelmente resultará em maior teor de agente rejuvenescedor em relação à

propriedade relacionada às temperaturas intermediárias e baixas. No entanto, maiores detalhes estão discutidos na seção 4.6.2.

Figura 71 - Determinação do RAI de acordo com o tipo de dano e frequências reduzidas para os ligantes sem modificação (a) e com modificação (b)

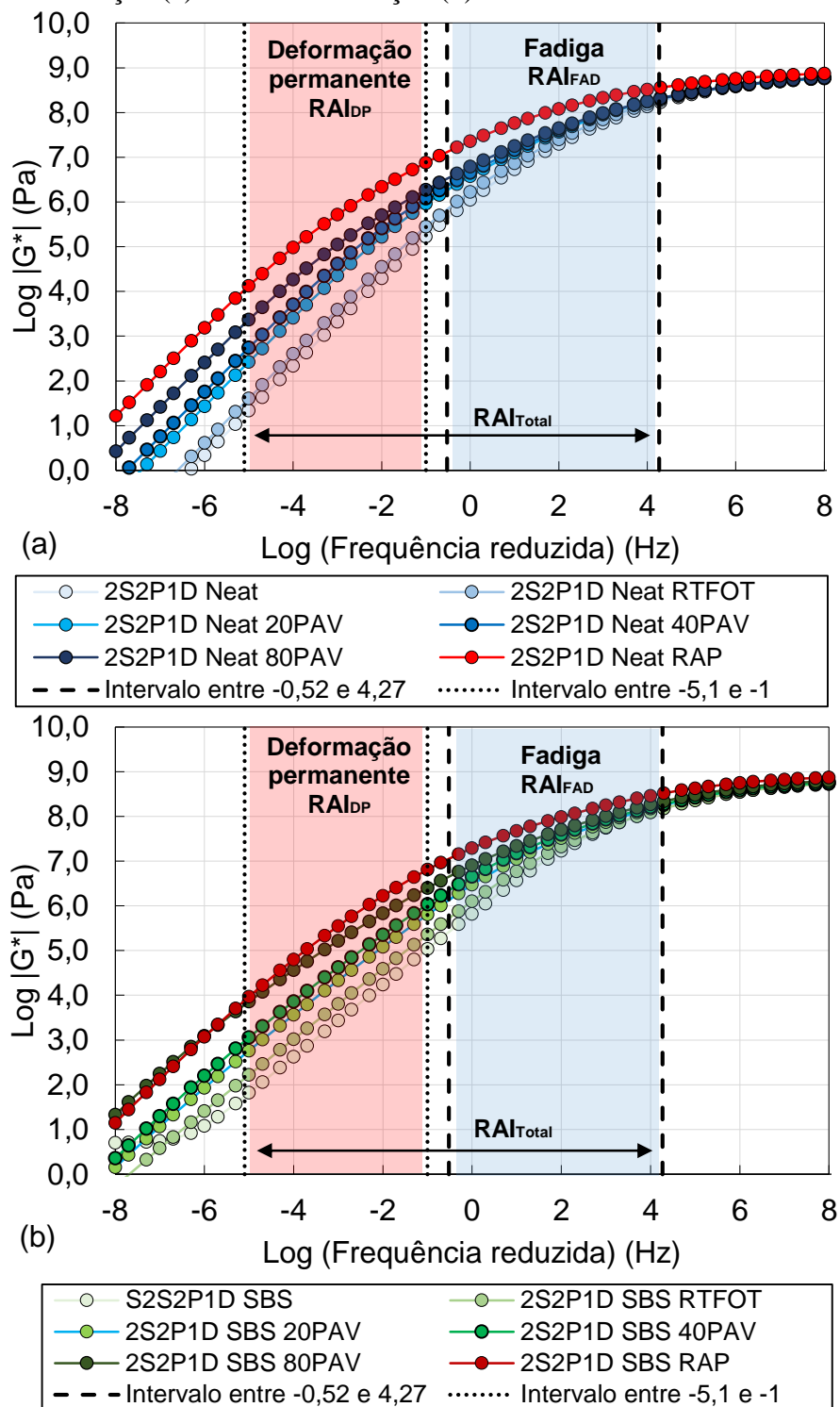
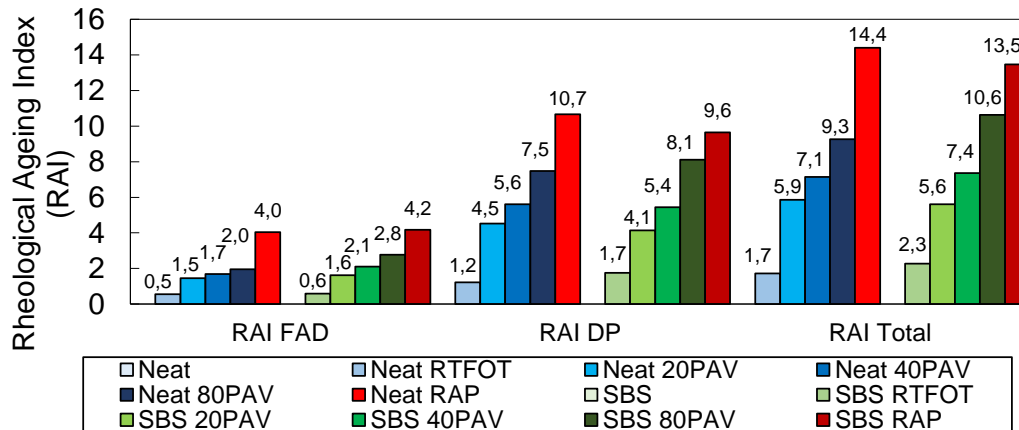


Figura 72 – RAI dos ligantes com o processo de envelhecimento



Os índices reológicos medidos a partir da natureza LVE dos ligantes asfálticos são correlacionados com o desempenho ao trincamento de pavimentos asfálticos como resultado do envelhecimento. No entanto, há a limitação de que esses parâmetros são determinados em testes conduzidos sem a danificação da amostra, enquanto que o fenômeno de danificação tanto em altas, intermediárias e baixas temperaturas ocorrem em regimes não lineares.

O primeiro parâmetro analisado é o Glover Rowe, que tem sido utilizado para avaliar o desempenho de envelhecimento/trincamento dos ligantes, além da caracterização das propriedades de rigidez e relaxação. A Figura 73 apresenta os parâmetros $|G^*|$ vs δ (15°C e $0,005$ rad/s) no diagrama black e a Figura 74 os valores de G-R calculados pela Equação 15.

A modificação por SBS resulta em $|G^*|$ vs δ mais à esquerda do que o ligante sem modificação. A partir de 40PAV, há uma convergência entre ambos tipos de ligante devido às maiores reduções nos valores de δ exibidos pelo ligante sem modificação.

Em termos de susceptibilidade ao trincamento, ambos os ligantes atingiram o limite de início do dano após o estado de envelhecimento de 80PAV. Neste estado de envelhecimento, o ligante SBS está próximo ao limiar do trincamento significativo, enquanto que o ligante Neat encontra-se no limiar do início do trincamento, conforme Figura 73 e Figura 74. Assim, a indução de fissuração sob condições de temperatura intermediária e baixa é mais provável de acontecer primeiro no ligante modificado do que o não modificado. Osmari et al. (2019) encontrou resultado semelhante ao comparar um ligante 50/70 ao modificado por SBS quando envelhecidos em PAV.

Os ligantes recuperados de RAP resultaram em G-R dentro da zona de dano significativo, ou seja, com maiores níveis de oxidação em relação aos ligantes envelhecidos em laboratório. O trincamento por fadiga do revestimento asfáltico identificado durante a

fresagem do pavimento que deu origem ao Neat RAP (Figura 58) é coerente com o resultado de G-R encontrado.

Figura 73 – $|G^*|$ vs δ no diagrama black obtido em uma $T_{ref}=15^\circ\text{C}$ e frequência de 0,005 rad/s para todas condições de envelhecimento.

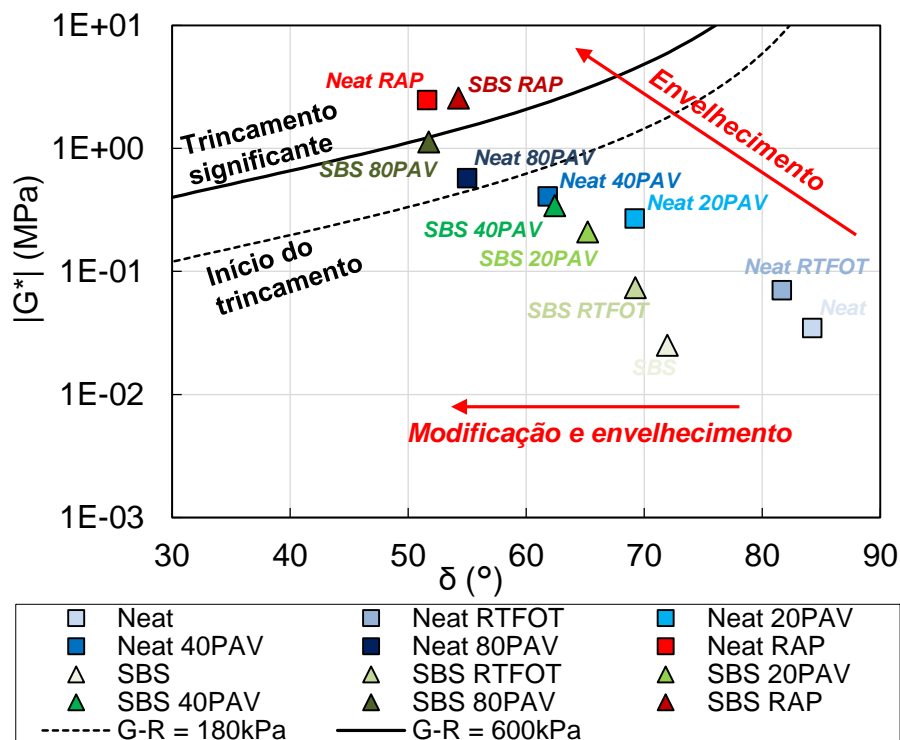
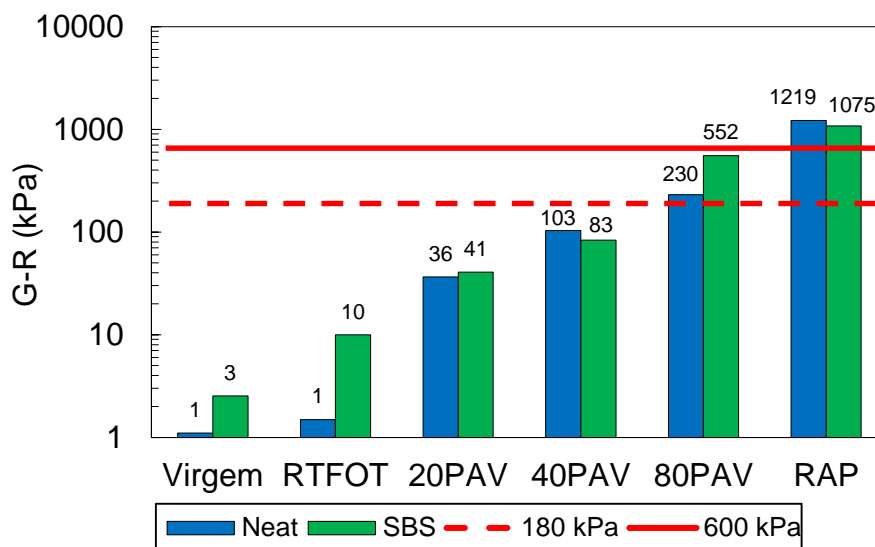


Figura 74 - Parâmetro G-R dos ligantes testados com diferentes níveis de envelhecimento



Outros índices extraídos da caracterização LVE referem-se ao ponto de cruzamento, identificados como a temperatura ($T_{\delta=45^\circ}$), a frequência (ω_c) e módulo de cruzamento (G_c), que

também podem ser utilizados para rastrear os efeitos do envelhecimento e do rejuvenescimento. Esse ponto representa um equilíbrio entre G' e G'' (correspondente a um ângulo de fase de 45°) e a transição de um comportamento viscoelástico mais sólido para um mais fluído, ou vice-versa.

Os pontos de cruzamentos foram identificados no espaço cole-cole (a), diagrama black (b), e curvas mestras de módulo complexo (c) e ângulo de fase conforme a Figura 75 para os ligantes sem modificação e a Figura 76 para os ligantes com modificação. Observa-se que o ponto de transição sólido-fluído é deslocado à medida que o movimento molecular é impedido com o envelhecimento (aglomerações de asfaltenos), exigindo assim mais energia (temperatura aumentada) ou tempos mais longos (frequência reduzida) para observar o fluxo. Assim, os seguintes padrões com o envelhecimento são identificados: redução com tendência linear dos valores de E_1 vs E_2 ; redução do módulo de cruzamento (G_c) em ω_c ; e a redução de ω_c , coerente com estudos de Farrar et al. (2013).

Figura 75 – Identificação dos pontos de cruzamento dos ligantes sem modificação no espaço cole-cole (a), diagrama black (b), curvas mestras de módulo dinâmico (c) e ângulo de fase (d)

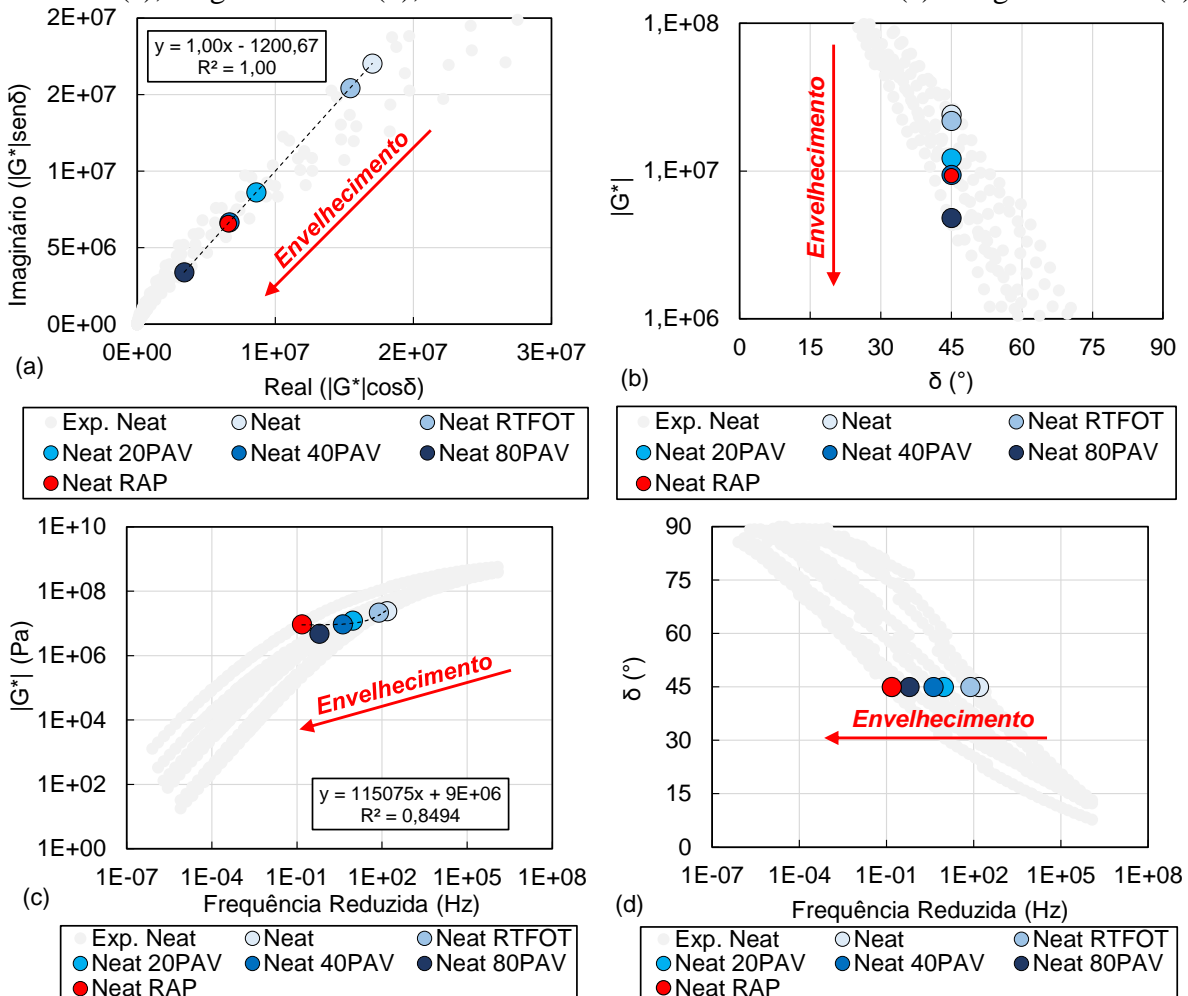
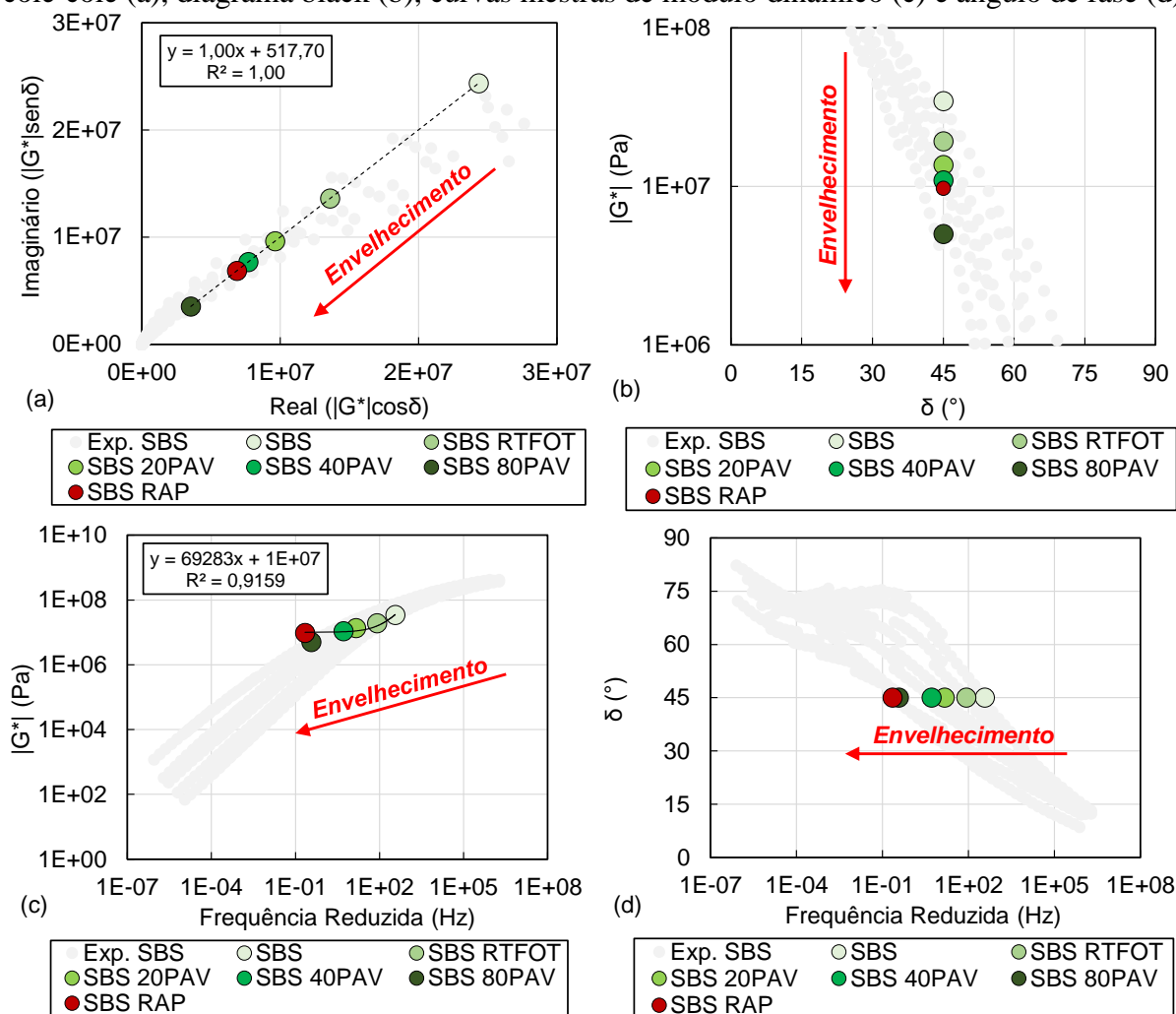


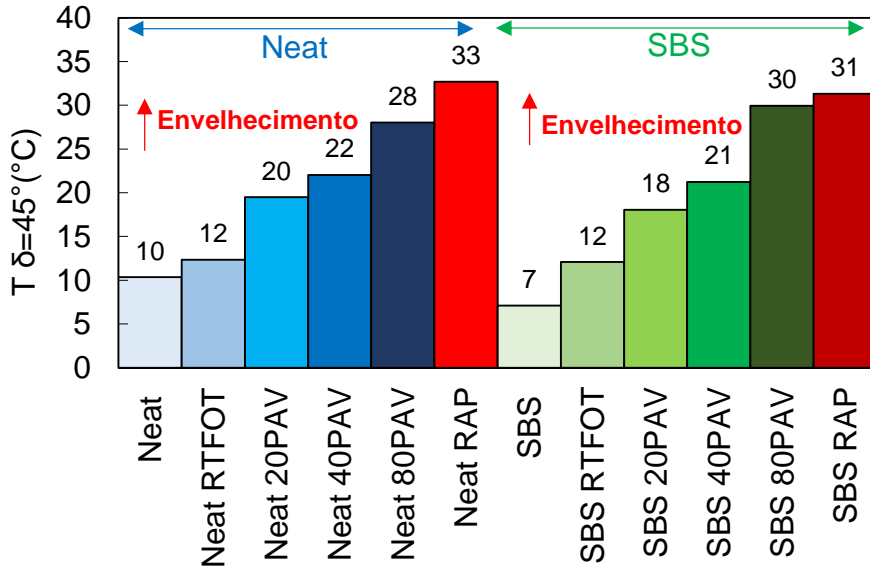
Figura 76 – Identificação dos pontos de cruzamento dos ligantes com modificação no espaço cole-cole (a), diagrama black (b), curvas mestras de módulo dinâmico (c) e ângulo de fase (d)



As temperaturas de cruzamento ($T_{\delta=45^\circ}$), calculadas pela Equação 31, estão apresentadas na Figura 77. C_1 e C_2 foram extraídos da Tabela 17 e $\omega_c = 2\pi \cdot f_c$ - determinados pelo 2S2P1D. Assim, a necessidade de uma maior temperatura para a obtenção da transição sólido-fluído com o envelhecimento é reafirmada pelos valores encontrados. Cucalon et al. (2018) encontraram resultados semelhantes com a inclusão de material reciclado envelhecido, atribuindo o aumento de $T_{\delta=45^\circ}$ como resultado dos aglomerados maiores que impedem o movimento molecular.

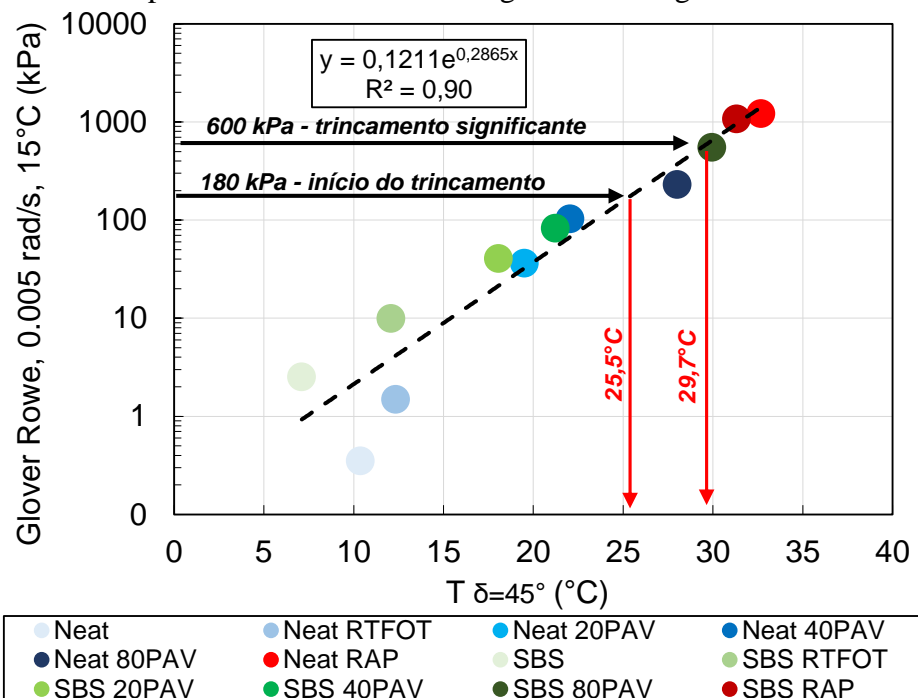
$$T_{\delta=45^\circ} = \frac{25 \cdot C_1 - (C_2 - 25) \cdot (\text{Log } \omega_c - 1)}{C_1 + \text{log } \omega_c - 1} \quad (31)$$

Figura 77 - Temperatura de cruzamento dos ligantes com o envelhecimento



Cucalon et al. (2018) estabeleceram limites de performance para a temperatura de cruzamento a partir dos valores de 180 e 600 kPa na relação entre G-R e $T_{\delta=45^\circ}$. Uma forte correlação exponencial é identificada quando plotam-se as duas variáveis para os ligantes aqui investigados, conforme exibido na Figura 78. Os limites de durabilidade para a variável $T_{\delta=45^\circ}$ para definir uma performance adequada com o envelhecimento são fixados entre 25,5°C e 29,7°C.

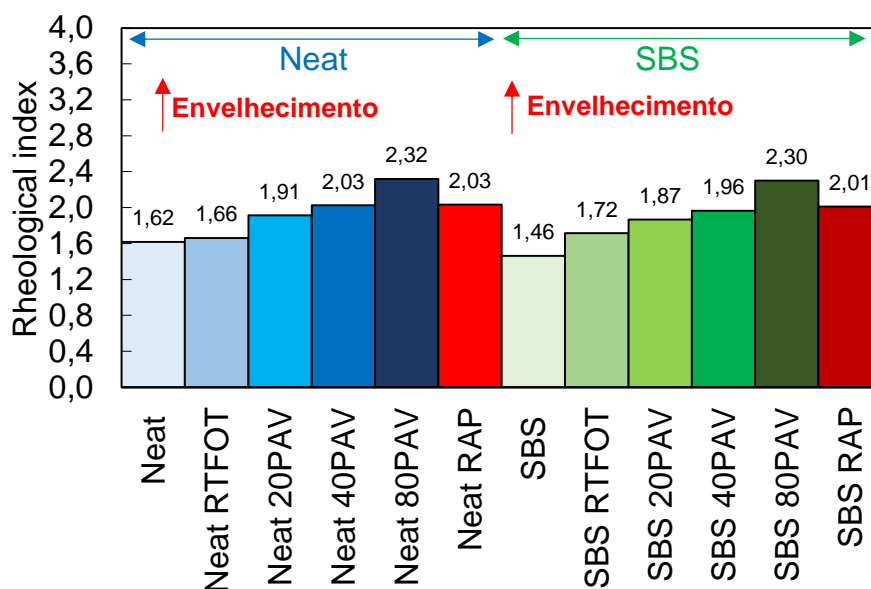
Figura 78 – G-R vs temperatura de crossover dos ligantes investigados



Outro parâmetro avaliado é o Rheological Index (R-value), que corresponde a diferença entre os valores logarítmicos de G_g (constante de 10^9) e G_c ($|G^*|$ em ω_c), ou calculado pela Equação 32. Os valores obtidos estão expressos na Figura 79, no qual se observa um aumento com o maior nível de envelhecimento dos ligantes. Ao se analisar o cálculo para determinação do parâmetro, como G_g recebe um valor constante, R-Value aumenta de acordo com as mudanças na localização de ω_c com o envelhecimento. Como visto anteriormente, ω_c reduz com o maior grau de oxidação, resultando em maiores valores de R.

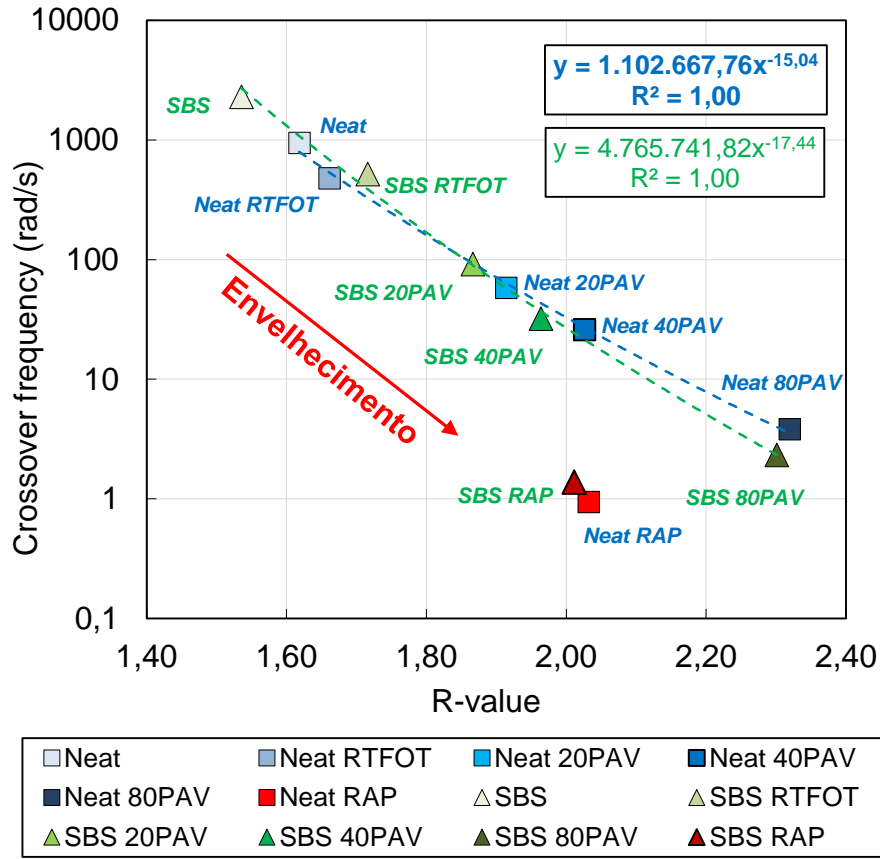
$$R_{value} = \frac{\log 2 \cdot \log \frac{G_g}{G_c}}{\log(1 - \frac{\delta c}{90})} \quad (32)$$

Figura 79 - Rheological index dos ligantes com o envelhecimento



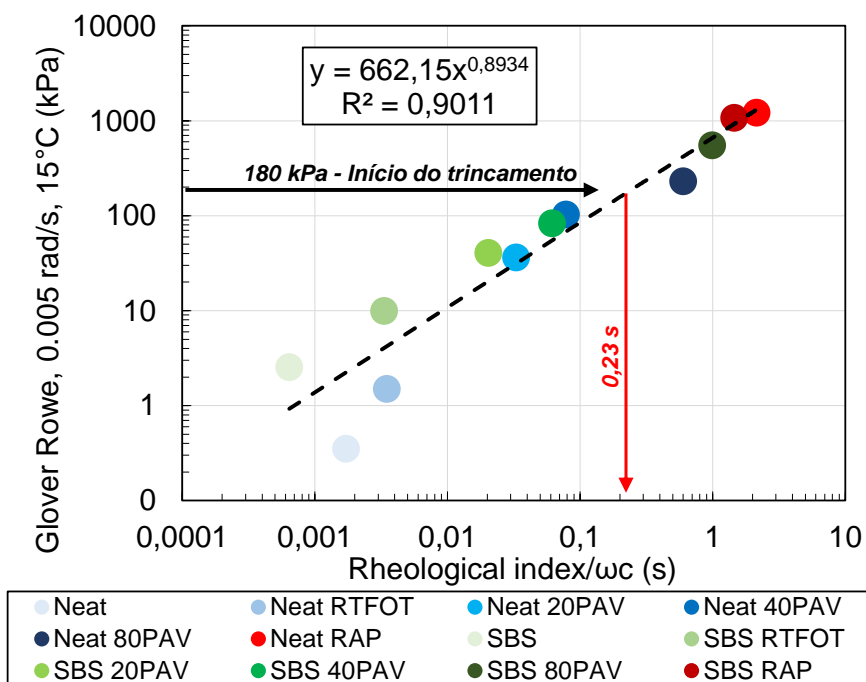
A Figura 80 apresenta o comportamento de R-value vs frequência de cruzamento com o envelhecimento em forte correlação de potência. Observa-se que há um deslocamento da correlação em direção aos menores valores de R-Value e maiores valores de frequência de cruzamento, o que significa materiais propensos ao trincamento. Os ligantes RAPs exibem tendência similar em relação aos ligantes virgens, mas fora da tendência em modelo de potência obtida com o envelhecimento de laboratório.

Figura 80 - R-value vs frequência de cruzamento com o envelhecimento



Levando em consideração que o R-value é um parametro independente da temperatura e resulta em uma pequena faixa de valores, e ω_c varia em uma faixa mais ampla capturando os efeitos da temperatura, Farrakhzade, Sabouri e Tabatabaee (2022) propuseram um novo parâmetro a partir da razão R/ω_c como um indicador potencialmente melhor para avaliação de envelhecimento e potencial de trincamento de ligantes. Assim, a variável resposta que soma os efeitos de comportamento geral, performance e a dependência da temperatura.

A partir da plotagem de R/ω_c vs G-R (Figura 81) foi possível definir limites para o parâmetro R/ω_c a partir do limite de 180 kPa – início de trincamento. O valor de limite de alerta de 0,23 s foi determinado para os materiais. Uma excelente correlação em modelo de potência foi determinada independente do tipo de ligante e seu nível de envelhecimento. Além disso, as condições 80PAV e os ligantes RAP ultrapassam o limite estabelecido.

Figura 81 - R/ω_c vs frequência de cruzamento dos ligantes

De modo geral, os indicadores ou índices reológicos são ferramentas importantes para quantificar ou diferenciar os materiais asfálticos quanto ao nível de envelhecimento. A caracterização LVE dos ligantes indicou um maior nível de envelhecimento dos ligantes RAPs em relação aos ligantes envelhecidos artificialmente em laboratório na condição mais severa (RTFOT + 80PAV). Esse maior nível oxidativo pode ser resultado dos mecanismos de envelhecimento adicionais de campo em relação ao processo em laboratório.

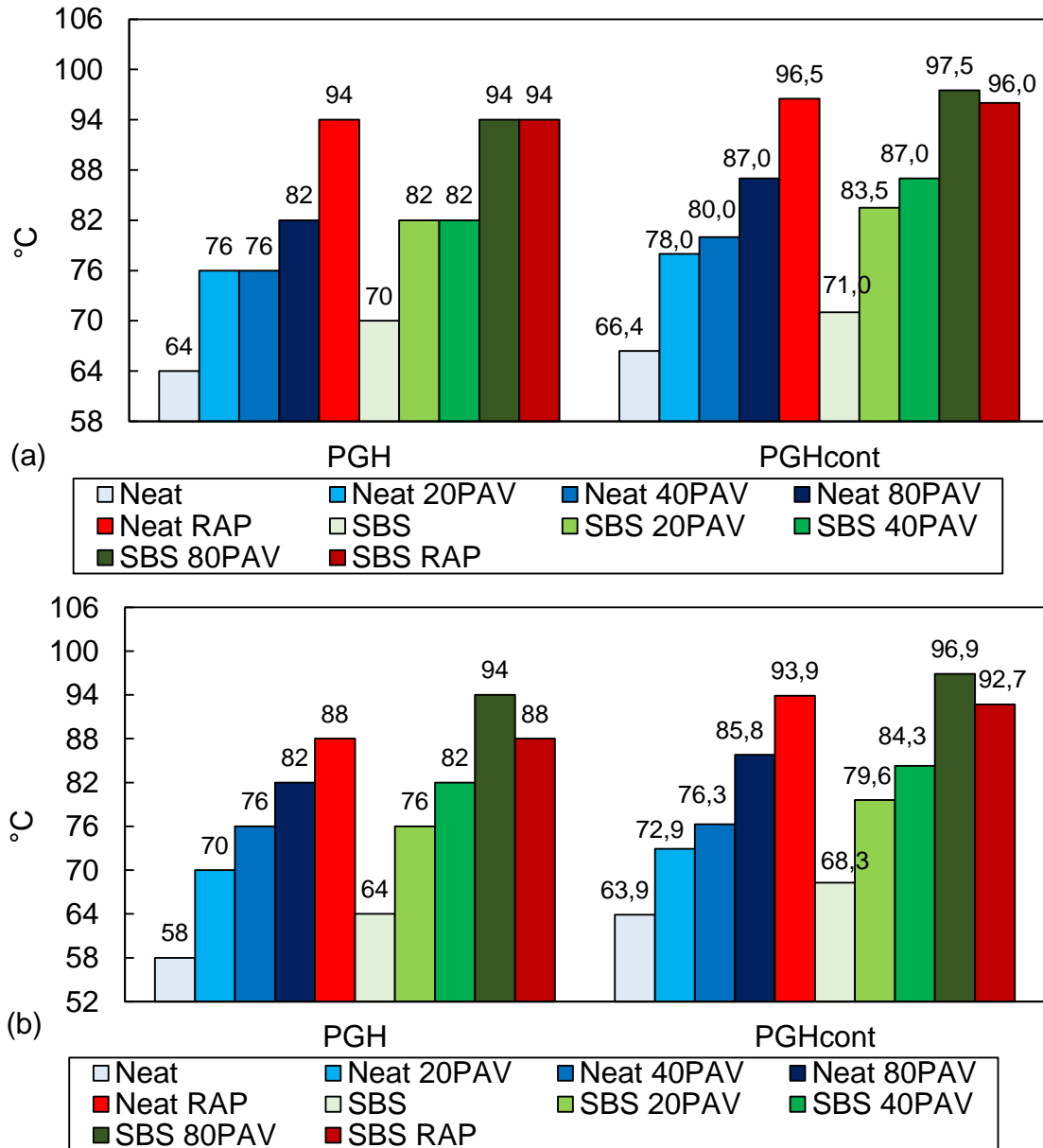
Assim, os índices avaliados que foram sensíveis ao maior nível de envelhecimento dos ligantes RAPs foram o RAI_{FAD} , RAI_{DP} , RAI_{TOTAL} , ω_c , G-R, $T_{\delta=45^\circ}$, R/ω_c , G-R vs $T_{\delta=45^\circ}$ e G-R vs R/ω_c . Em contrapartida, os parâmetros $|G^*_c|$, R-value e ω_c vs R-value indicaram um maior envelhecimento nos ligantes com RTFOT + 80PAV.

4.6.1.3. Performance Grade: temperaturas críticas

A avaliação reológica em temperaturas críticas de alta (PGH) e intermediária (PGI) também fornece índices que os correlacionam com o processo de danificação em misturas asfálticas, como a deformação permanente e ao trincamento por fadiga, respectivamente. A análise em baixas temperaturas não entrou no escopo do trabalho.

A Figura 82 apresenta os efeitos do envelhecimento no PGH e PGH contínuo (PGHcont) dos ligantes: em (a) para um $|G^*|/\text{sen } \delta$ mínimo de 1kPa para condição original (a) (AASHTO M 332, 2018); em (b) considerando a situação mais desfavorável entre $|G^*|/\text{sen } \delta$ de 1kPa (original) e de 2,2 kPa (RTFOT) (AASHTO M 320, 2017).

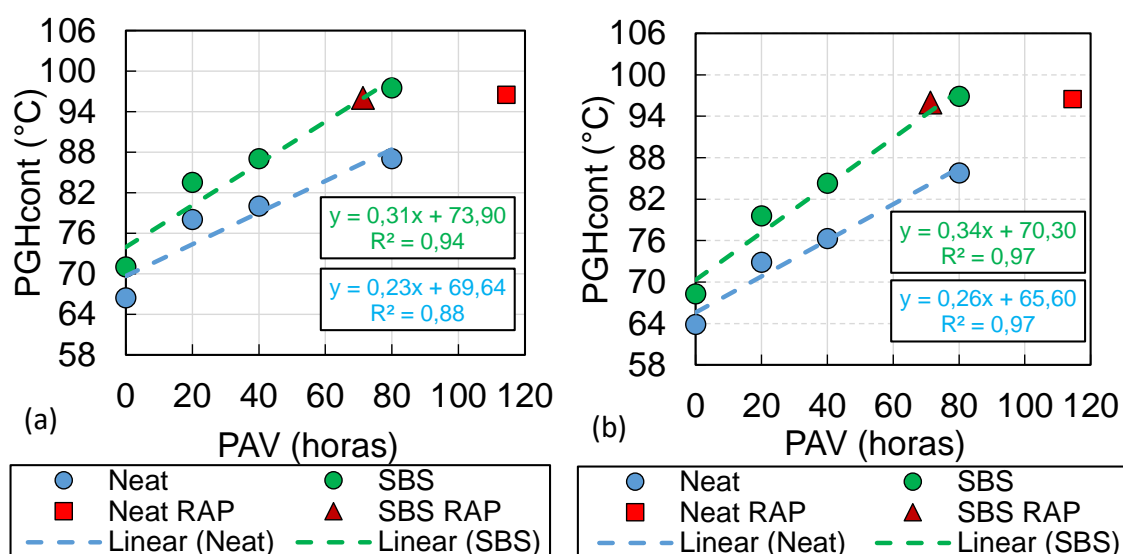
Figura 82 – PGH dos ligantes com o envelhecimento considerando a condição original (a) e original/RTFOT (b)



Verifica-se um aumento do PGH com o maior nível de envelhecimento dos ligantes asfálticos, sendo resultado direto do aumento de rigidez nas altas temperaturas devido as modificações químicas e físicas do processo. Resultados semelhantes foram identificados em Carrion (2017), Arambula et al. (2018), Pires (2018) e Singh, Showkat e Sawant (2019).

Para verificar qual dos ligantes é mais susceptível ao envelhecimento, a correlação entre o PGH_{cont} e tempos de PAV foi plotada na Figura 83. Assim, as correlações exibem uma maior susceptibilidade ao envelhecimento do ligante modificado como resultado do maior coeficiente angular da reta linear tanto na análise da condição original (a) como entre a condição original e RTFOT (b).

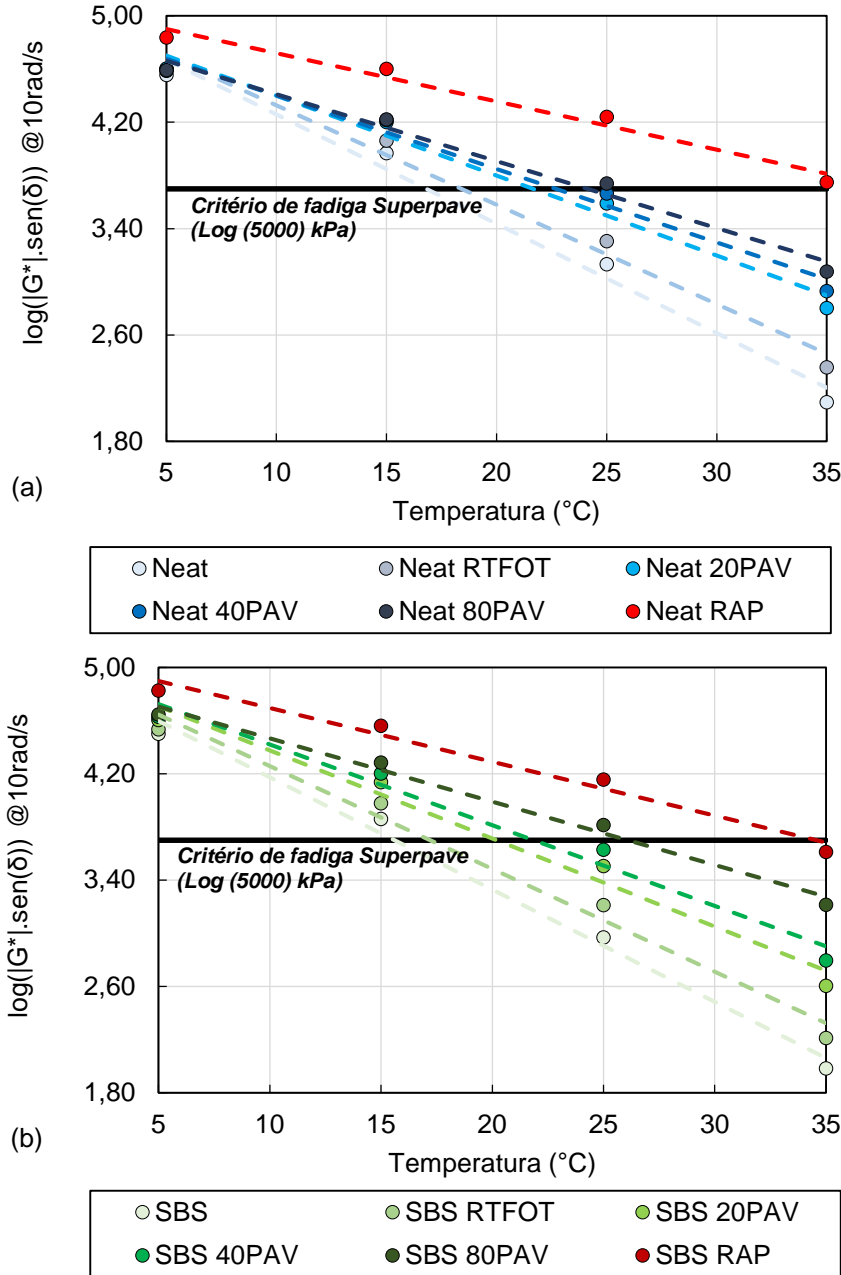
Figura 83 – PGH_{cont} vs horas de PAV considerando a condição original (a) e original/RTFOT (b)



O ligante SBS RAP foi reproduzido em termos de PGH com 80PAV. No entanto, pela correlação encontrada, o ligante Neat obtém PGH similar ao Neat RAP com aproximadamente 115 horas de PAV. Assim, o PGH não se mostrou um bom indicador para avaliar o envelhecimento, pois 80 horas de PAV não reproduziu o nível de envelhecimento do ligante SBS RAP principalmente na tolerância ao dano por fadiga, como será demonstrado e discutido na próxima seção.

Com relação ao PGI, a Figura 84 apresenta os valores de $|G^*| \cdot \sin \delta$ com as temperaturas para os ligantes sem modificação (a) e com modificação (b) em diferentes níveis de envelhecimento. O valor de $|G^*| \cdot \sin \delta$ reduz em função linear ($R^2 > 0,97$) com o aumento da temperatura. Além disso, os ligantes com maior nível de envelhecimento apresentam maior módulo de perda, ou seja, por inferência uma menor vida de fadiga.

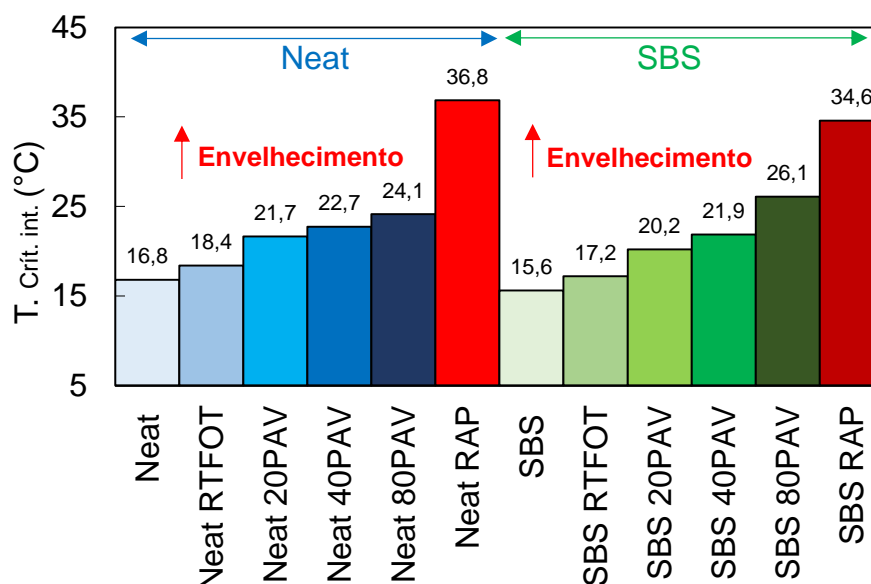
Figura 84 - Comparação de $|G^*|.sen(\delta)$ em 10 rad/s para diferentes temperaturas e níveis de envelhecimento dos ligantes sem modificação (a) e com modificação (b)



A temperatura mínima na qual o valor do módulo de perda permanece inferior a 5000 kPa é denominada de temperatura de serviço intermediária ($T_{crit. int.}$). A Figura 85 exibe as temperaturas determinadas a partir das relações lineares da Figura 84. Um aumento da $T_{crit. Int.}$ é identificado com o aumento do nível de envelhecimento dos ligantes asfálticos. Além disso, a vida de fadiga dos ligantes RAP são significativamente inferiores a vida de fadiga apresentada pelo ligante com maior grau de envelhecimento reproduzido em laboratório. O PGI para os ligantes Neat RAP e SBS RAP são aproximadamente 53% e 33% superiores aos ligantes

Neat 80PAV e SBS 80PAV, respectivamente. Em termos de fadiga, esse parâmetro é o que mais se aproxima dos resultados de fadiga obtidos no teste LAS que está apresentado na seção 4.6.1.5.

Figura 85 – Temperatura crítica intermediária dos ligantes com o envelhecimento



Por fim, em termos de PGH e PGI, verifica-se que o envelhecimento promove efeitos mais acentuados nas propriedades de altas temperaturas do que em temperaturas intermediárias, assim como o identificado nas caracterizações LVE. Considerando os resultados apenas na condição original, o envelhecimento de virgem para 80PAV aumentou o PGH_{cont} em 20,6°C e 26,5°C para os ligantes sem modificação e com modificação, respectivamente, enquanto que o impacto no PGI_{cont} foi de 7,3°C (Neat) e 10,5°C (SBS).

4.6.1.4. Multiple Stress Creep and Recovery

As respostas de testes conduzidos em domínios não lineares de ligantes asfálticos, que promovem a danificação do material, são bem correlacionados com testes em misturas asfálticas e com os afundamentos em trilha de roda levantados em pista (ALMEIDA JUNIOR et al., 2018; HANQI et al., 2021; PIRES et al., 2022). Dentre estes testes, destaca-se o de MSCR, aceito no sistema de classificação de desempenho *Superpave* para avaliação da deformação permanente. Os efeitos do envelhecimento por meio do Jnr e o R% nas temperaturas de 58°C a 88°C estão apresentados nessa seção.

As Figura 86 e Figura 87 exibem os valores de de Jnr em diferentes condições de envelhecimento (Neat, 20PAV, 40PAV, 80PAV e RAP) e temperatura (58°C (a), 64°C (b), 70°C (c), 76°C (d), 82°C (e) e 88°C (f)) para os ligantes Neat e SBS, respectivamente. Os limites de tráfego de acordo com o Jnr em 3,2 kPa também são apresentados.

Figura 86 - Jnr do ligante Neat (sem modificação) em 0,1 e 3,2 kPa sob diferentes condições de envelhecimento a 58°C (a), 64°C (b), 70°C (c), 76°C (d), 82°C (e) e 88°C (f)

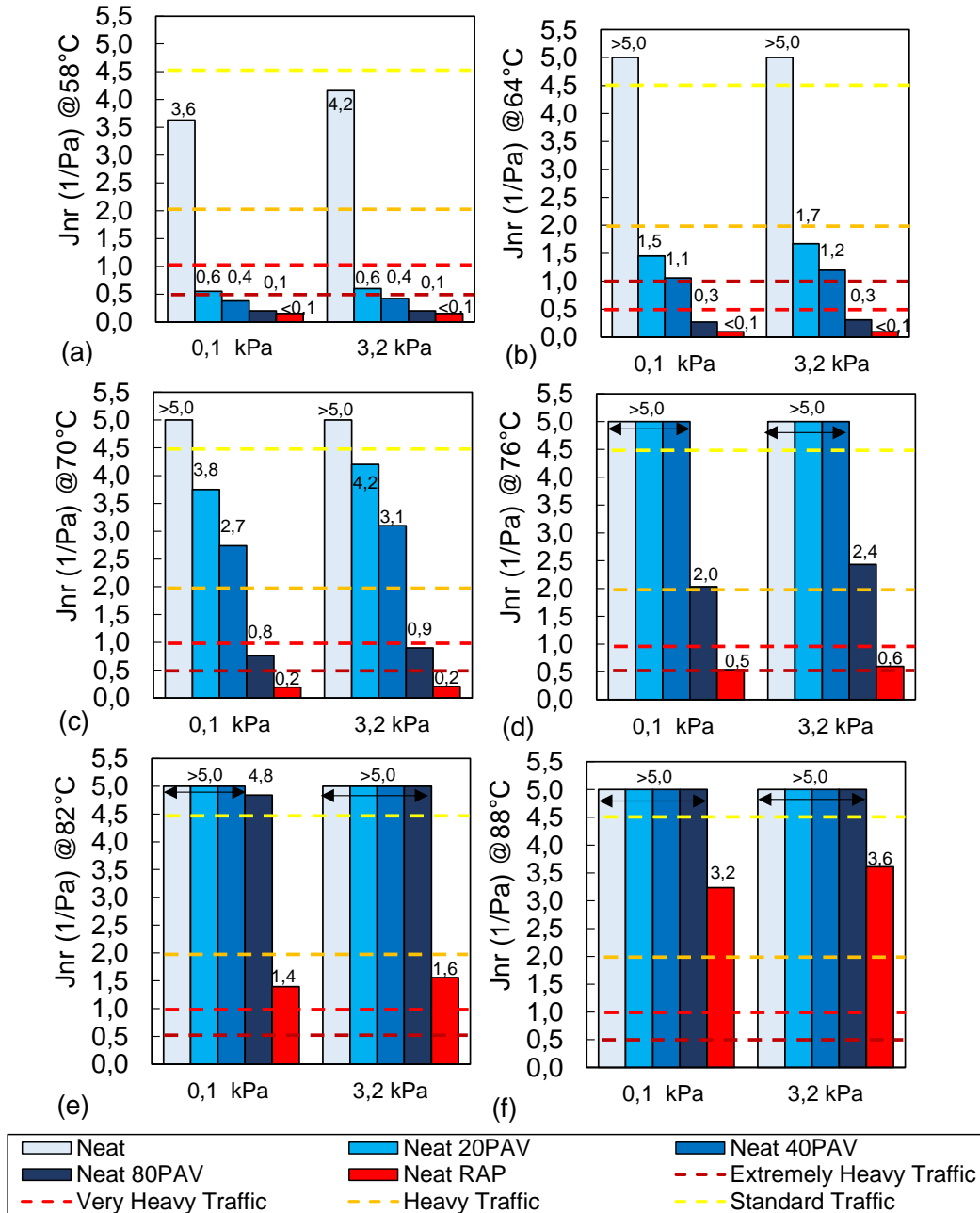
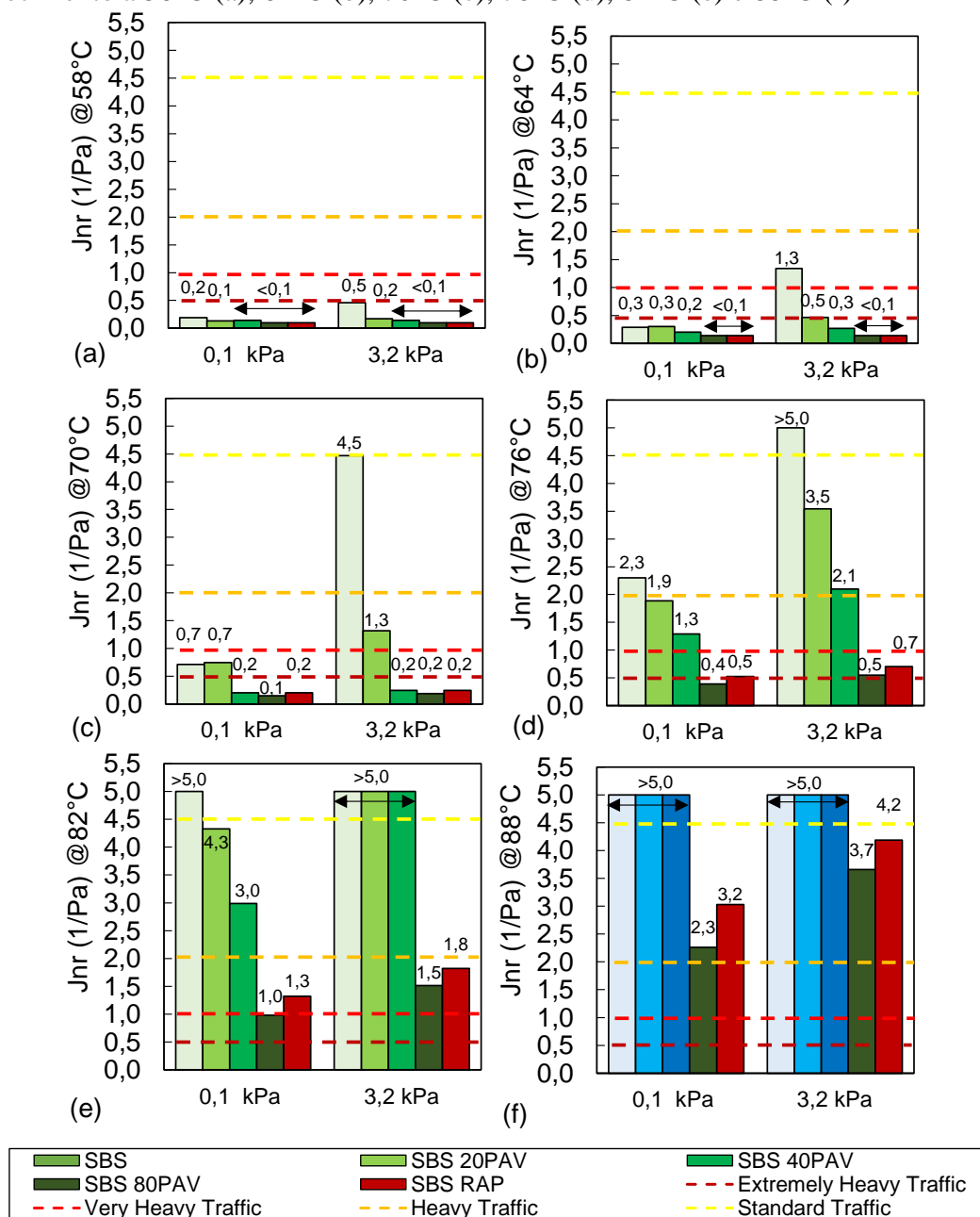


Figura 87 - Jnr do ligante SBS (com modificação) em 0,1 e 3,2 kPa sob diferentes condições de envelhecimento a 58°C (a), 64°C (b), 70°C (c), 76°C (d), 82°C (e) e 88°C (f)



Os resultados sugerem que o aumento no nível de envelhecimento e a presença de modificação nos ligantes reduzem os valores de Jnr em ambos os níveis de tensão. O Jnr a 3,2 kPa é um indicador para avaliar o desempenho à deformação permanente de ligantes asfálticos em altas temperaturas, sendo que um menor valor corresponde a maior resistência à deformação permanente. Assim, os resultados sugerem que o polímero e o processo de envelhecimento resultam em maior tolerância à deformação permanente em todas as temperaturas.

A presença da modificação resultou em menores valores de Jnr sob mesma temperatura e condição de envelhecimento quando comparado ao ligante sem modificação. Tal característica é atribuída a maior rigidez do ligante modificado em altas temperaturas e também ao efeito da rede polimérica na matriz do ligante. Assim, se o tempo de envelhecimento for longo o suficiente, o Jnr do ligante Neat pode equiparar-se ao do ligante SBS, o que dificulta a utilização do parâmetro como indicador de qualidade para identificar a presença da modificação.

A Tabela 19 apresenta resumidamente a classificação quanto ao tráfego para cada ligante asfáltico em seu respectivo nível de envelhecimento em temperaturas variando de 58°C a 88°C. Assim como no PGH, o envelhecimento de 80PAV foi suficiente para resultar em Jnr semelhante e igualdade de classificação quanto ao nível de tráfego entre o ligante SBS e SBS RAP, e não suficiente para os ligantes Neat e Neat RAP.

Tabela 19 – Classificação quanto ao nível de tráfego dos ligantes sob diferentes condições de envelhecimento a partir do Jnr em 3,2 kPa

Ligante	Nível de tráfego						
	58	64*	70	76	82	88	94
Neat	S	S	S	S	S	S	S
Neat 20PAV	V	H	S	S	S	S	S
Neat 40PAV	E	H	S	S	S	S	S
Neat 80PAV	E	E	H	S	S	S	S
Neat RAP	E	E	E	V	H	S	S
SBS	E	H	S	S	S	S	S
SBS 20PAV	E	E	H	H	S	S	S
SBS 40PAV	E	E	V	S	S	S	S
SBS 80PAV	E	E	E	V	H	S	S
SBS RAP	E	E	E	V	H	S	S

Nota: nível de tráfego como padrão – Standard Traffic “S” ($2,0 < Jnr < 4,5$), pesado – Heavy Traffic “H” ($1,0 < Jnr < 2,0$), muito pesado – Very Heavy Traffic “V” ($0,5 < Jnr < 1,0$) ou extremamente pesado – Extremely Heavy Traffic “E” ($Jnr < 0,5$), de acordo com a AASHTO M 332 (2019).

Os resultados de R% para os ligantes em diferentes condições de envelhecimento e temperatura estão apresentados na Figura 88 em 1,0 kPa (a) e 3,2 kPa (b), que representa uma medida da capacidade de recuperação dos materiais após ciclos de fluência.

De modo geral, o envelhecimento resulta em diferentes respostas de acordo com o tipo de ligante asfáltico. Para o ligante sem modificação, os parâmetros $R_{1,0}$ e $R_{3,2}$ aumentam com o maior nível de envelhecimento dentro de uma mesma temperatura, e diminuem com o incremento de temperatura de ensaio. As respostas elásticas provem do aumento da rigidez da matriz do ligante com as alterações físicas e químicas devido envelhecimento.

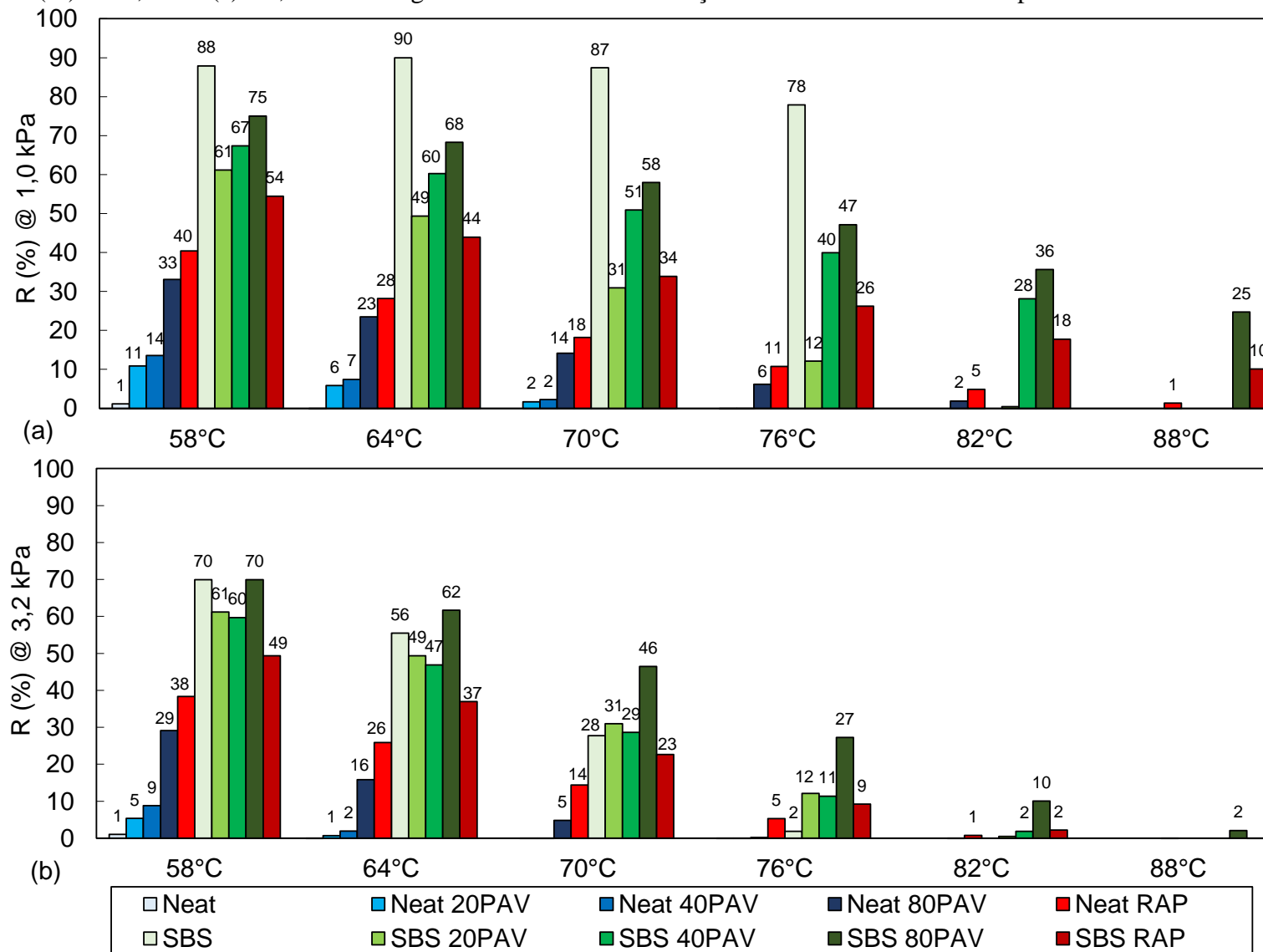
Por outro lado, para o ligante com modificação, os parâmetros $R_{1,0}$ e $R_{3,2}$ reduzem com o maior nível de envelhecimento dentro de uma mesma temperatura, ou seja, o ligante perde resposta elástica pós deformação devido principalmente ao enfraquecimento ou quebra da estrutura polimérica, com exceção do ligante 80PAV.

Assim como identificado no Jnr, se o tempo de envelhecimento for longo o suficiente, o R% do ligante Neat pode equiparar-se ao do ligante SBS, o que dificulta a utilização do parâmetro como indicador de qualidade para identificar a presença da modificação.

Por fim, o envelhecimento em laboratório com RTFOT + 80PAV não reproduziu os ligantes RAP considerando simultaneamente a classificação quanto ao tráfego pelo Jnr e o R%. O envelhecimento em campo envolve fenômenos e mecanismos que não são contemplados no envelhecimento em laboratório, que interferem principalmente na degradação do polímero.

De modo geral, o processo de envelhecimento quando analisado na ótica do dano em altas temperaturas, verificado pelo PGH, Jnr e R%, não promove perda de desempenho do material no mecanismo de falha por deformação permanente. Assim, prospectando misturas recicladas com alto teor de RAP, a incorporação do material envelhecido em novas misturas irá resultar em maior resistência à deformação permanente.

Figura 88 - R (%) em 1,0 kPa (a) e 3,2 kPa dos ligantes em diferentes condições de envelhecimento e temperatura



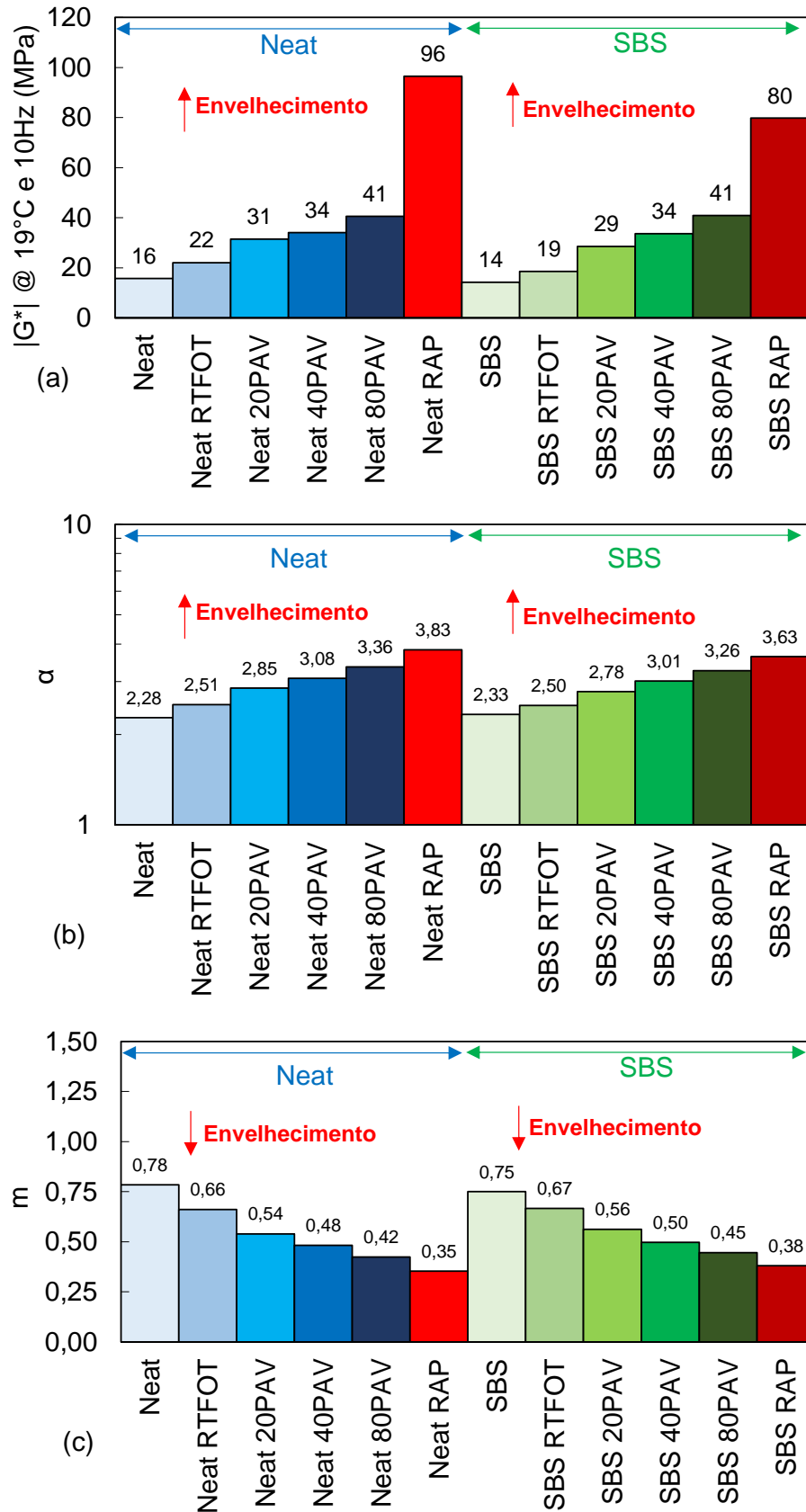
4.6.1.5. *Linear Amplitude Sweep Test*

A análise da vida de fadiga de materiais asfálticos com o envelhecimento é o primeiro passo para proposição de parâmetros a fim de selecionar e dosar um agente rejuvenescedor com base no principal mecanismo de falha de misturas recicladas com alto teor de RAP: que é o trincamento por fadiga. Assim, esta seção analisa e discute as diferentes definições de falha, critérios de ruptura e modelos de previsão da vida de fadiga a fim de identificar quais são sensíveis e discriminam os diferentes tipos de ligantes e níveis de envelhecimento.

Os resultados aqui apresentados foram extraídos do teste LAS, a 19°C, em três perfis de carregamento (CSR de 0,001, 0,0005 e 0,00025) e interpretados usando a teoria simplificada de dano contínuo viscoelástico (S-VECD). Os DMRs obtidos ficaram no intervalo de 0,95 e 1,05.

A Figura 89 apresenta as variáveis LVE obtidas na primeira etapa do teste LAS - $|G^*|$ a 19°C e 10 Hz (a), α (b) e m (c) - para os ligantes em diferentes condições de envelhecimento. Inicialmente, verifica-se uma rigidez muito superior dos ligantes Neat RAP e SBS RAP em relação aos ligantes envelhecidos produzidos em laboratório. A variável m reduz com o maior nível de envelhecimento como resultado da menor inclinação de log da frequência vs log G' . Por fim, a taxa de evolução de dano α cresce com o maior nível de envelhecimento.

Figura 89 - Valores de $|G^*|$ (a), alfa (b) e m (c) dos ligantes em diferentes níveis de envelhecimento



4.6.1.5.1. Definições de falha

A definição de falha sob carregamento cisalhante cíclico deve ser determinada com base nas características físicas de intensidade e a distribuição de dano dentro das amostras asfálticas. Oito definições de falha selecionadas para avaliar os ligantes em diferentes condições de envelhecimento e CSRs são apresentadas na Figura 63. Inicialmente, a falha é verificada em diferentes níveis de deformação (denominada *Fatigue Strain Capacity – FSC*) e N_f de acordo com o critério analisado e nível de envelhecimento dos materiais, conforme exibido nas Figura 90 e Figura 91 para os ligantes sem modificação e com modificação, respectivamente.

A Tabela 20 apresenta os FSC determinados a partir das oito definições de falha e CSR de 0,001. De modo geral, os resultados exibem duas tendências considerando apenas o envelhecimento dos ligantes em laboratório: aumento no nível de deformação de falha com o envelhecimento (Pico $\tau.N$, Pico δ_{Neat} e Pico W_S^R) e redução no nível de deformação de falha com o envelhecimento (redução 50% $|G^*|$, redução 35% Integridade, pico C.N, Pico τ e Pico $C^2.N.(1-C)$).

As definições que reduzem a deformação de falha com o maior nível de envelhecimento são mais coerentes, pois espera-se que a falha do material ocorra em menores níveis de deformação à medida que o material se torna mais rígido e susceptível ao dano por fadiga. Essa tendência é verificada para todas as definições de falha ao se comparar os ligantes Neat RAP e SBS RAP com os ligantes Neat e SBS, respectivamente. Assim, uma hipótese para essa divergência de comportamento pode ser atribuída às diferenças nos mecanismos de envelhecimento em campo que pode resultar em alterações químicas que não são reprodutíveis em laboratório, mas foram captadas no teste de fadiga.

As definições de queda de 50% $|G^*|$, queda de 35% C, pico C.N, Pico τ e Pico $C^2.N.(1-C)$ absorveram as diferenças entre os mecanismos de envelhecimento e resultaram em boas correlações ($R^2 > 0,70$). Um ranqueamento a partir das correlações lineares (FSC vs definição de falha) estão apresentados na Tabela 21, sendo o melhor resultado obtido pela definição do $C^2.N.(1-C)$.

Figura 90 - Definição vs deformação de falha para o ligante sem modificação em diferentes condições de envelhecimento para CSR=300: (a) queda de 50% |G*|, (b) queda de 35% C, (c) pico de C.N, (d) pico de τ.N, (e) pico de τ, (f) pico do δ, (g) pico do W_S^R e (h) pico do C².N.(1-C)

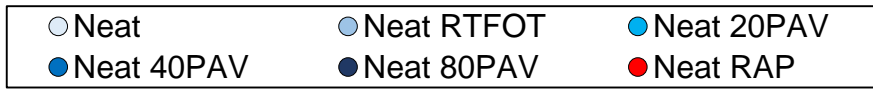
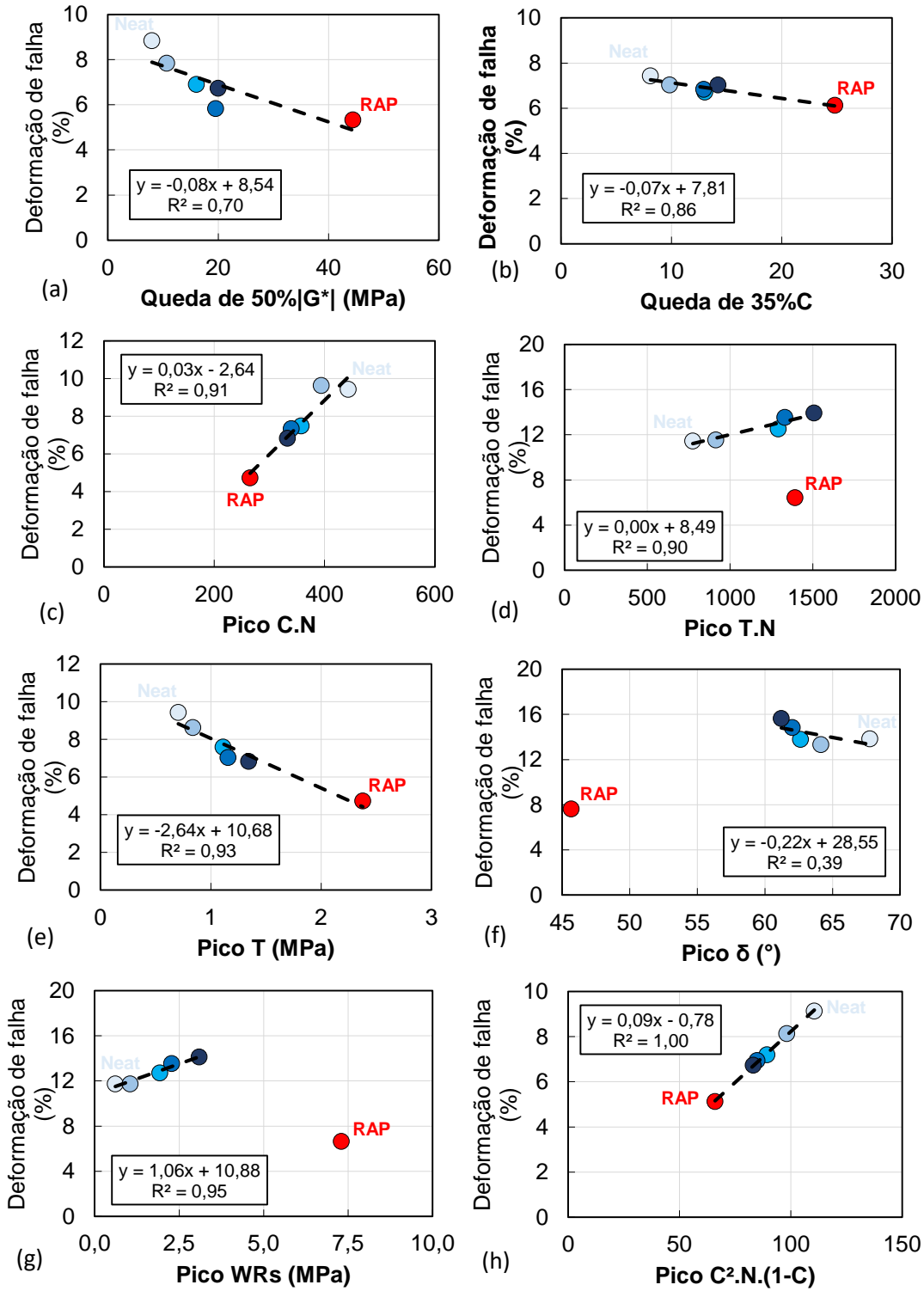


Figura 91 - Definição vs deformação de falha para o ligante com modificação em diferentes condições de envelhecimento CSR=300: (a) queda de 50% $|G^*|$, (b) queda de 35% C, (c) pico de C.N, (d) pico de τ .N, (e) pico de τ , (f) pico do δ , (g) pico do W_S^R e (h) pico do C².N.(1-C)

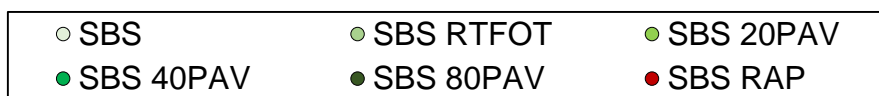
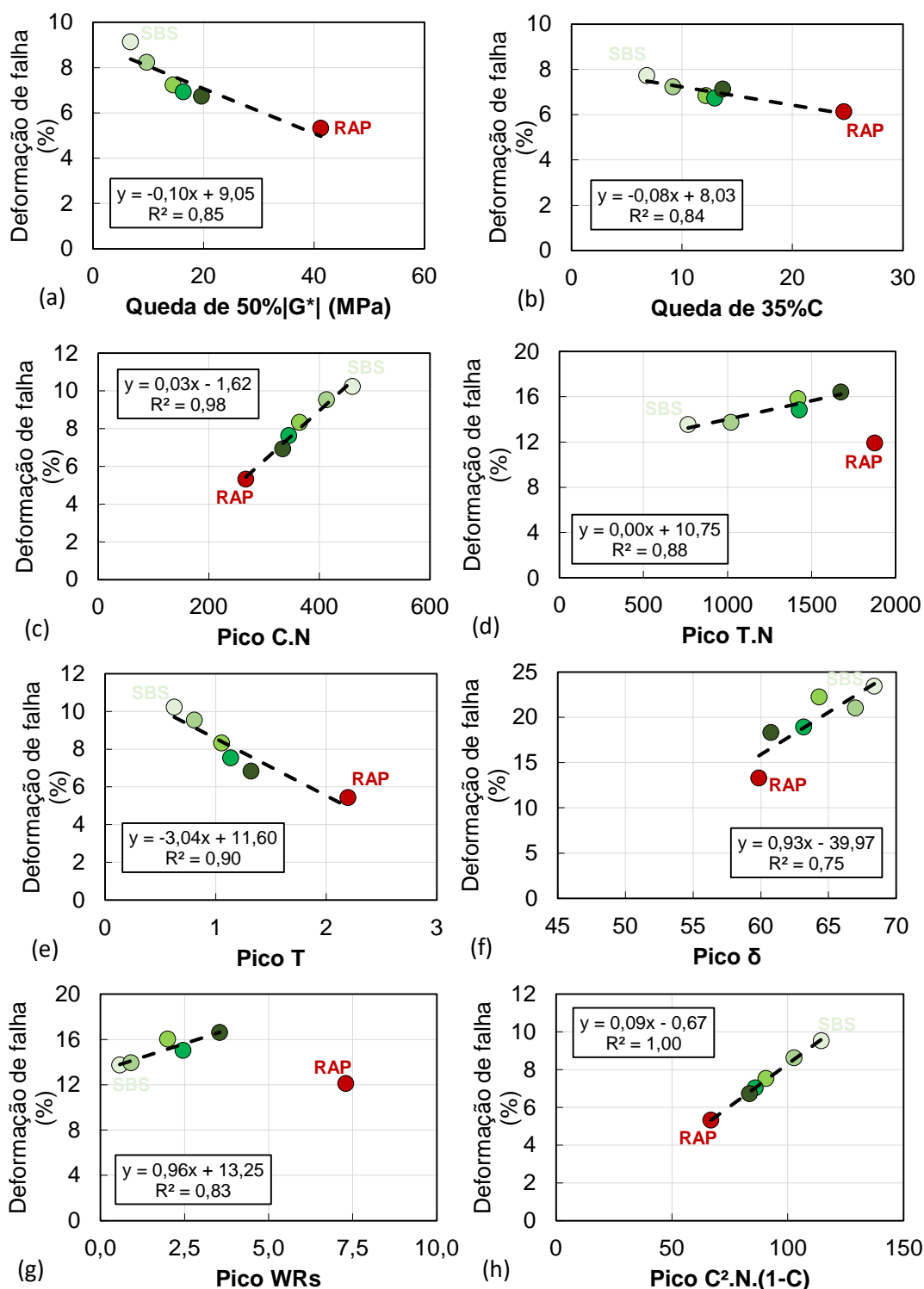


Tabela 20 - Comparação de diferentes critérios de falha em CSR = 300

Ligante asfáltico	Queda de 50% G* (MPa)	FSC (%)	Queda de 35%C	FSC (%)	Pico C.N	FSC (%)	Pico τ .N	FSC (%)	Pico τ (MPa)	FSC (%)	Pico δ	FSC (%)	Pico WSR	FSC (%)	Pico C ² .N.(1-C)	FSC (%)
Neat	7,96	8,83	8,10	7,43	443,00	9,43	775,00	11,43	0,71	9,43	67,76	13,83	0,61	11,74	110,60	9,13
Neat RTFOT	10,65	7,83	9,85	7,03	394,00	9,63	915,00	11,53	0,84	8,63	64,14	13,33	1,05	11,73	98,29	8,13
Neat 20PAV	16,06	6,90	13,04	6,71	357,93	7,48	1291,35	12,51	1,11	7,58	62,64	13,78	1,93	12,71	89,29	7,19
Neat 40PAV	19,53	5,83	12,94	6,83	339,84	7,33	1331,49	13,53	1,16	7,03	62,02	14,83	2,28	13,53	84,88	6,93
Neat 80PAV	19,98	6,73	14,23	7,03	332,60	6,83	1508,35	13,93	1,34	6,83	61,21	15,63	3,09	14,12	83,14	6,73
Neat RAP	44,39	5,33	24,82	6,13	264,93	4,72	1394,00	6,43	2,38	4,72	45,67	7,61	7,30	6,63	65,97	5,12
SBS	68,05	9,13	6,82	7,73	459,89	10,23	765,06	13,53	0,63	10,23	68,38	23,43	0,57	13,73	114,54	9,53
SBS RTFOT	97,49	8,23	9,18	7,23	412,93	9,53	1020,67	13,73	0,81	9,53	67,00	21,03	0,91	13,93	102,69	8,63
SBS 20PAV	145,09	7,23	12,19	6,83	364,08	8,33	1419,20	15,82	1,06	8,33	64,31	22,22	2,00	16,02	90,61	7,53
SBS 40PAV	163,78	6,93	12,97	6,73	344,73	7,63	1427,54	14,82	1,14	7,53	63,17	18,92	2,46	15,02	85,99	7,03
SBS 80PAV	196,40	6,73	13,69	7,13	333,84	6,93	1674,31	16,42	1,32	6,83	60,75	18,31	3,55	16,62	83,44	6,73
SBS RAP	412,45	5,32	24,67	6,13	267,24	5,32	1875,69	11,91	2,20	5,43	59,86	13,29	7,30	12,11	66,81	5,32

Nota: FSC: fatigue strain capacity

Tabela 21 - Ranqueamento das definições de falha com base no R² das correlações encontradas

Ranqueamento	Neat	SBS
1	Pico C ² .N.(1-C) R ² =1,00	Pico C ² .N.(1-C) - R ² =1,00
2	Pico τ - R ² =0,93	Pico C.N - R ² =0,98
3	Pico C.N - R ² =0,91	Pico τ - R ² =0,90
4	Queda de 35%C - R ² =0,86	Queda de 50% G* - R ² =0,85
5	Queda de 50% G* - R ² =0,70	Queda de 35%C - R ² =0,84
6	Pico W_S^R - R ² =0,95	Pico δ - R ² =0,75
7	Pico τ .N - R ² =0,90	Pico τ .N - R ² =0,88
8	Pico δ - R ² =0,90	Pico W_S^R - R ² =0,83

Nota: Ranqueamento de 1 a 5 é independente do mecanismo de envelhecimento (campo e laboratório); 6 a 8 correlações apenas para envelhecimento de laboratório, com exceção o pico δ para o SBS

As Figura 92 e Figura 93 apresentam a vida de fadiga (Nf) dos ligantes sem modificação e com modificação, respectivamente, em seus diferentes níveis de envelhecimento e CSRs com base nas oito definições investigadas. Diante dos resultados, observaram-se:

- a) As definições de Pico $\tau.N$, Pico δ e Pico W_S^R resultaram em aumento na vida de fadiga com o envelhecimento até 80 PAV;
- b) As definições de queda de 50% $|G^*|$, queda de 35% C, pico C.N, Pico τ e $C^2.N.(1-C)$ resultam em redução na vida de fadiga com o envelhecimento;
- c) Apenas as definições de queda de 50% $|G^*|$ e $C^2.N.(1-C)$ exibiram redução da vida de fadiga independente do mecanismo de envelhecimento, tipo de ligante asfáltico e CSR;
- d) As definições de pico do τ e pico do $\tau.N$ resultaram em Nf similar ao C.N e Pico W_S^R , respectivamente, evidenciando uma unificação entre as definições;
- e) Dentro de um mesmo nível de envelhecimento, conforme Figura 94, os Nfs determinados pelo $\tau.N$, Pico W_S^R e pico δ são maiores em comparação as demais definições. Além disso, todas as definições identificaram uma maior vida de fadiga do ligante modificado em relação ao ligante não modificado;
- f) O mecanismo de envelhecimento entre campo e laboratório influenciou na análise da vida de fadiga com relação as diferentes definições para determinação do ciclo de falha. Todas as definições indicaram a menor vida de fadiga dos ligantes recuperados de RAP em comparação aos ligantes originais.

Como já discutido nas seções anteriores, o processo de envelhecimento em laboratório pode não ser efetivo para promover alterações reológicas, químicas e de desempenho nos ligantes similar ao processo de envelhecimento em campo. Assim, todas as definições captaram a variável envelhecimento quando excluídas da análise os ligantes envelhecidos em laboratório.

Com isso, o seguinte questionamento surge: por que todas as diferentes abordagens de análise do ciclo de falha resultam em redução da vida de fadiga em ligantes RAPs, enquanto que para ligantes envelhecidos em laboratório identificou-se tanto redução quanto aumento da vida de fadiga? Outros estudos como Zhou et al. (2017), Villegas-Villegas et al. (2018) e Jing et al. (2020) também exibiram que a vida de fadiga de ligantes são significativamente melhoradas com o envelhecimento em 40 e 80 horas de PAV.

Figura 92 - Análise de diferentes definições de falha de ligantes sem modificação em diferentes condições de envelhecimento e CSRs: (a) queda de 50%|G*|0), (b) queda de 35% C, (c) pico de C.N, (d) pico de $\tau.N$, (e) pico de τ , (f) pico do δ , (g) pico do W_S^R e (h) pico do C².N.(1-C)

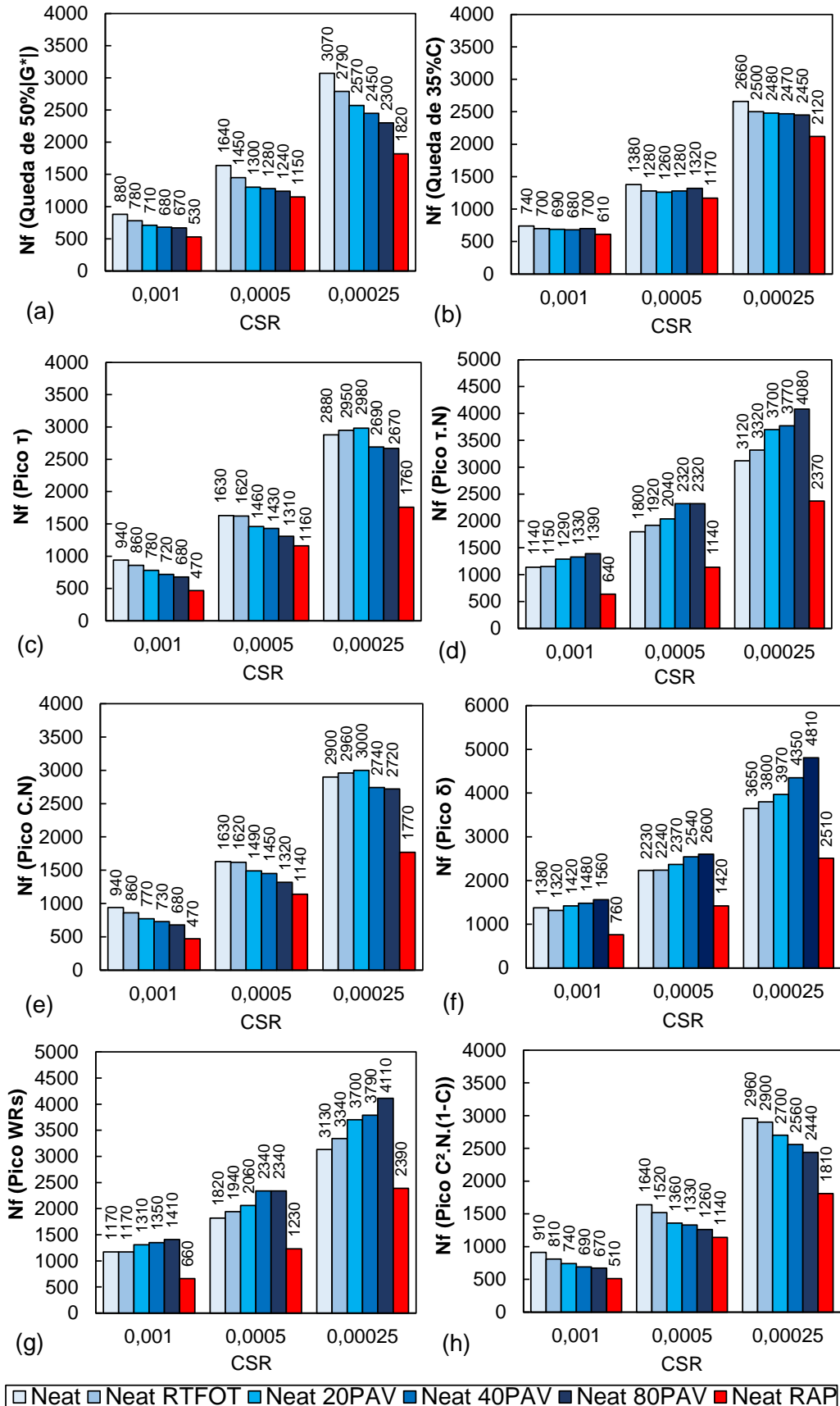


Figura 93 - Análise de diferentes definições de falha de ligantes com modificação em diferentes condições de envelhecimento e CSRs (a) queda de 50%|G*|, (b) queda de 35%C, (c) pico de C.N, (d) pico de τ .N, (e) pico de τ , (f) pico do δ , (g) pico do W_S^R e (h) pico do $C^2.N.(1-C)$

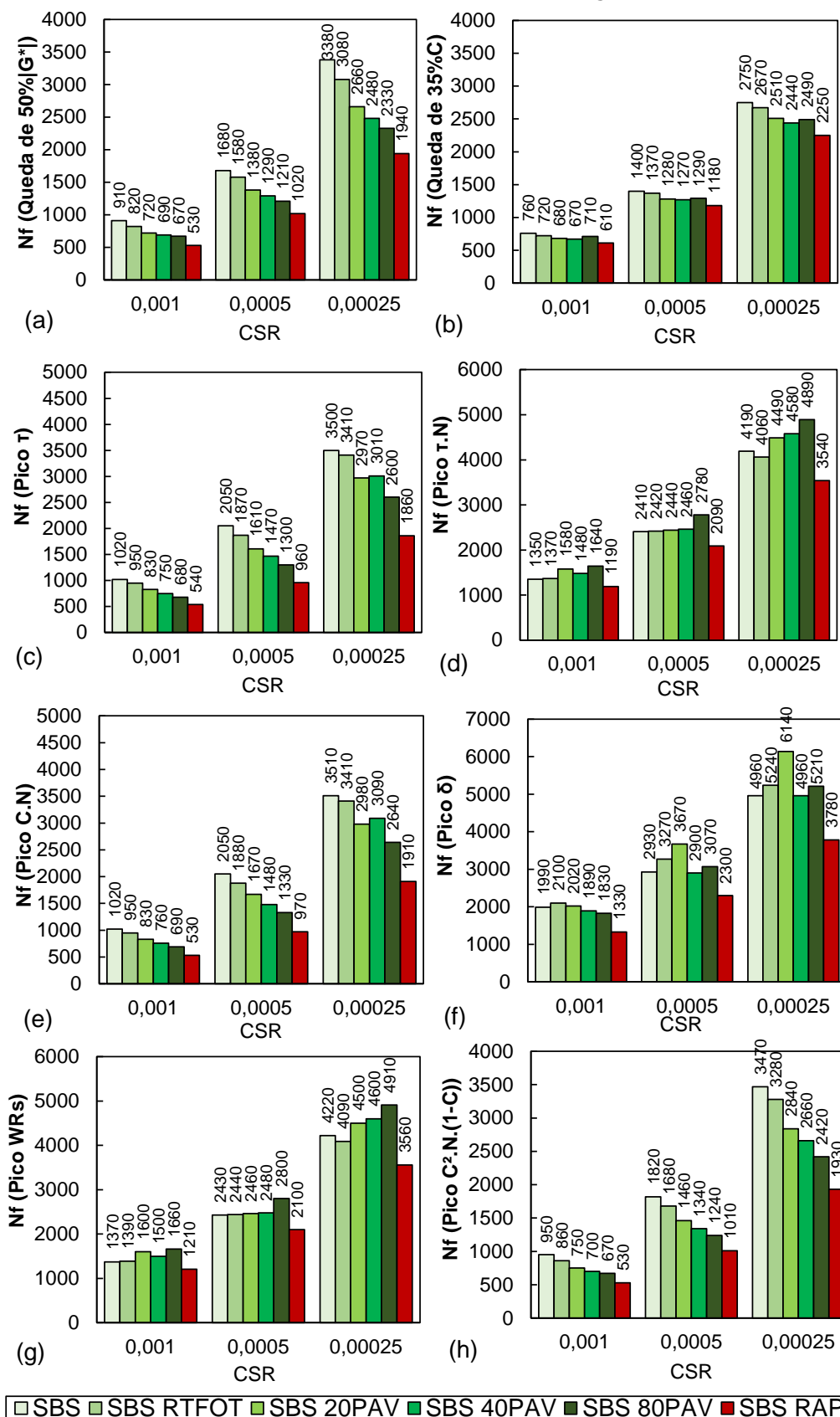
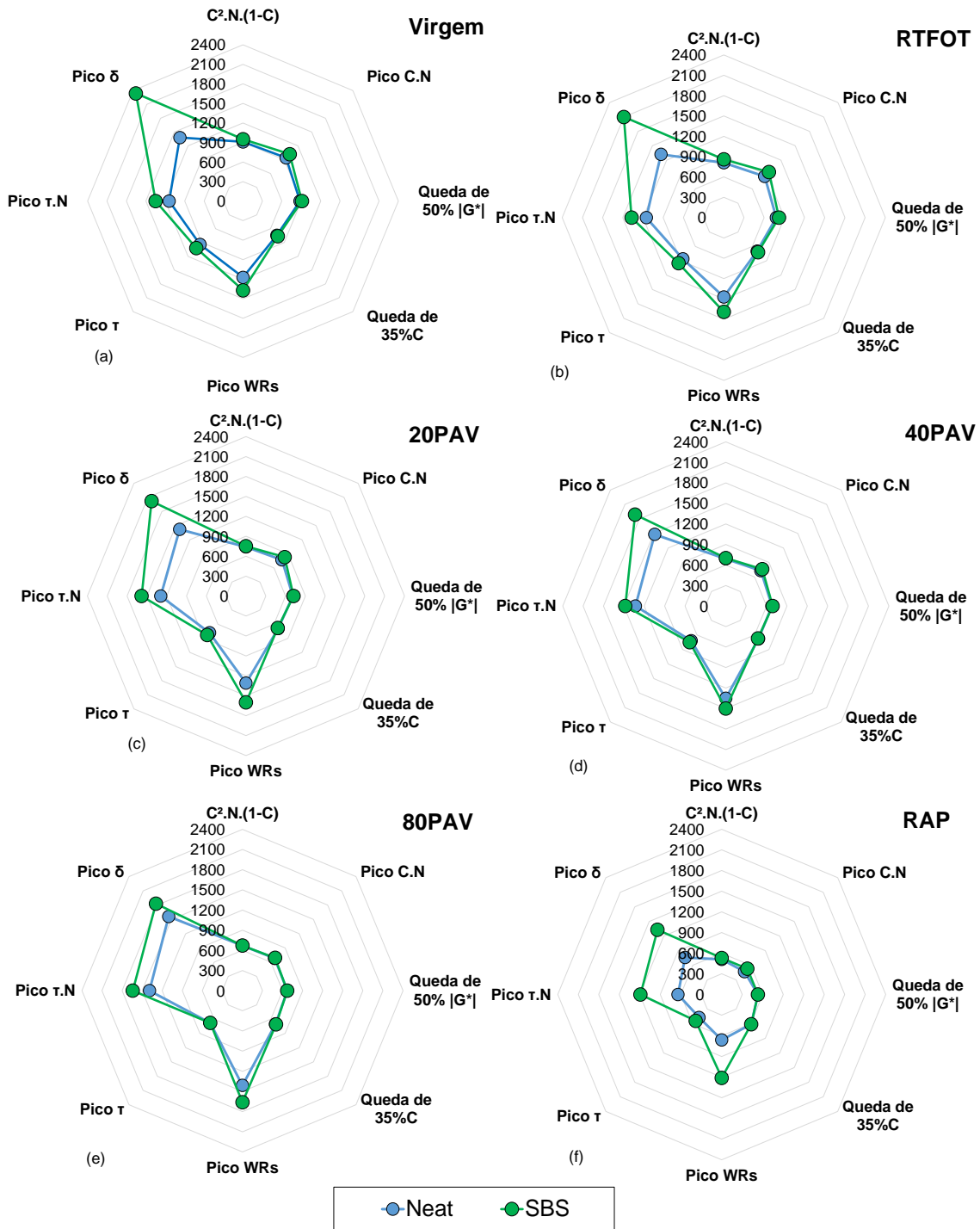


Figura 94 - Nf em diferentes definições de falhas agrupadas sob mesmo nível de envelhecimento em CSR de 0,001



Como forma de identificar uma possível hipótese para o questionamento acima, os dois ligantes com maior nível de envelhecimento produzidos em laboratório, Neat 80PAV e SBS 80PAV, foram submetidos a um envelhecimento adicional em um simulador de radiação com lâmpada de xenônio da marca ATLAS, chamado de SUNTEST XLS+, em condições equivalentes às utilizadas por Cravo (2016). Para isso, uma camada fina de cada ligante asfáltico

com espessura de 0,7 mm foi irradiada na região do ultravioleta e visível durante 48 horas à 90°C.

A Tabela 22 apresenta os efeitos do envelhecimento adicional UV em termos de $|G^*|$, α e m para os ligantes Neat e SBS 80PAV. A rigidez aumentou 20% e 27% nos ligantes Neat e SBS, respectivamente, em comparação a condição 80PAV, porém mantém-se consideravelmente inferior a rigidez dos ligantes RAPs. α e m permaneceram inalteradas para o ligante Neat, enquanto que para o SBS, α aumentou e m reduziu.

Tabela 22 - Valores de $|G^*|$, α e m dos ligantes Neat e SBS submetidos ao envelhecimento UV

Ligantes	$ G^* $ @19°C e 10Hz	α	m
Neat 80PAV 48UV	48,69 MPa	3,36	0,424
SBS 80PAV 48UV	52,91 MPa	3,78	0,359

Os ciclos de falha nas diferentes definições para os ligantes 80PAV com envelhecimento adicional UV estão apresentados nas Figura 95 e Figura 96, juntamente aos demais ligantes. Os resultados exibem a redução na vida de fadiga em todas as definições de falha para os dois ligantes submetidos ao envelhecimento adicional UV, reproduzindo assim o comportamento obtido pelos ligantes RAPs.

Assim, as hipóteses levantadas sobre a diferença entre os mecanismos de envelhecimento campo e laboratório e os impactos na reologia e desempenho foram confirmadas por meio da identificação do ciclo de falha por fadiga. Há modificações químicas dentro da matriz dos ligantes promovidos pelo envelhecimento UV que não são reproduzíveis no envelhecimento RTFOT + PAV e impactaram diretamente na redução da vida de fadiga dos materiais asfálticos.

Portanto, a utilização de ligantes envelhecidos em laboratório no protocolo RTFOT e PAV podem não ser efetivos e assertivos para avaliar e propor parâmetros de análise de envelhecimento, seleção e dosagem de agentes rejuvenescedores com base no fenômeno de fadiga. Dessa forma, não é possível excluir inicialmente algumas das definições de falhas com base na sensibilidade em identificar o fator envelhecimento.

Figura 95 - Análise de diferentes definições de falha de ligantes sem modificação em diferentes condições de envelhecimento, com inclusão da variável UV: (a) queda de 50% |G*|, (b) queda de 35% C, (c) pico de C.N, (d) pico de τ.N, (e) pico de τ, (f) pico do δ, (g) pico do W_S^R e (h) pico do C².N.(1-C)

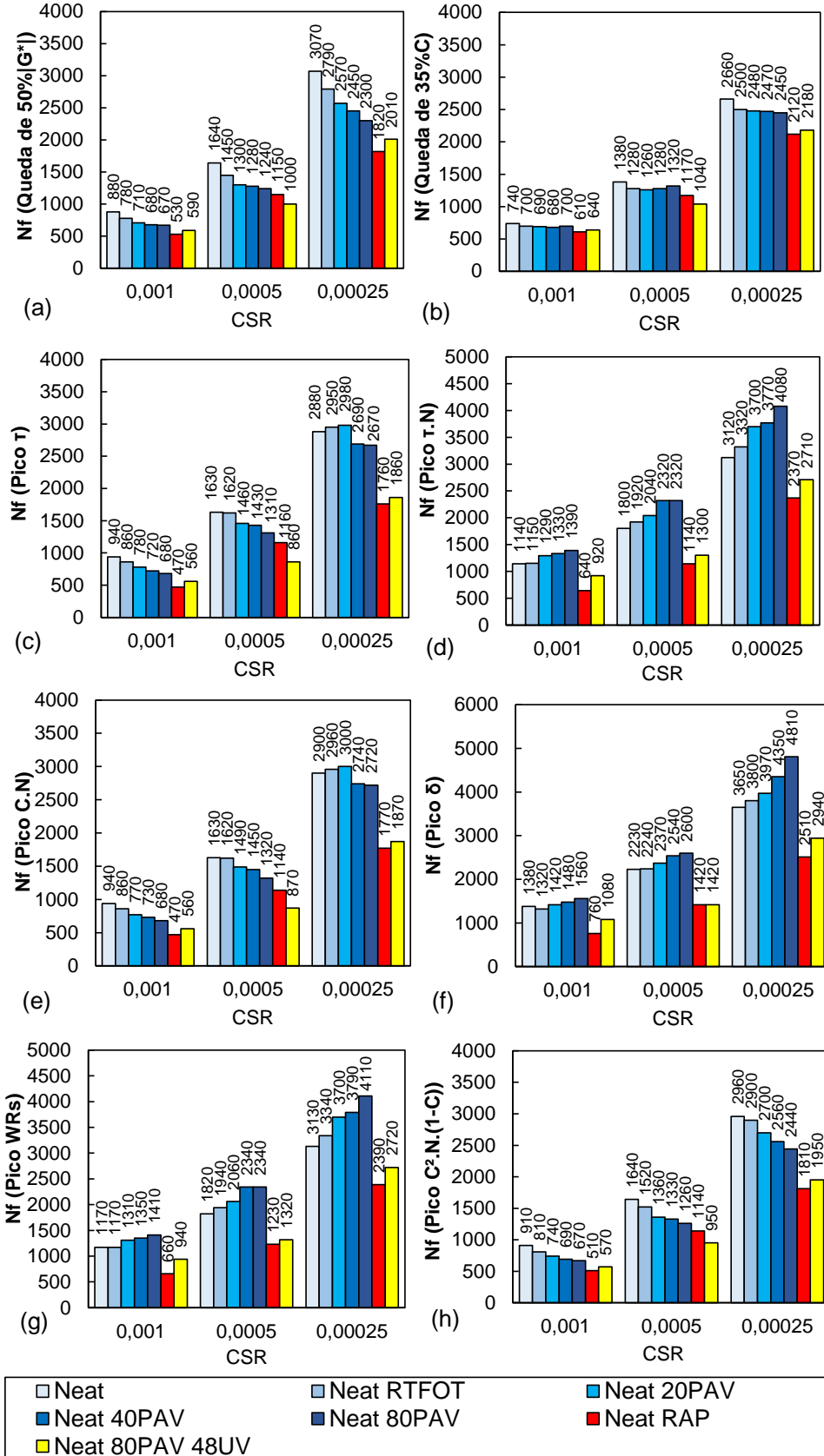
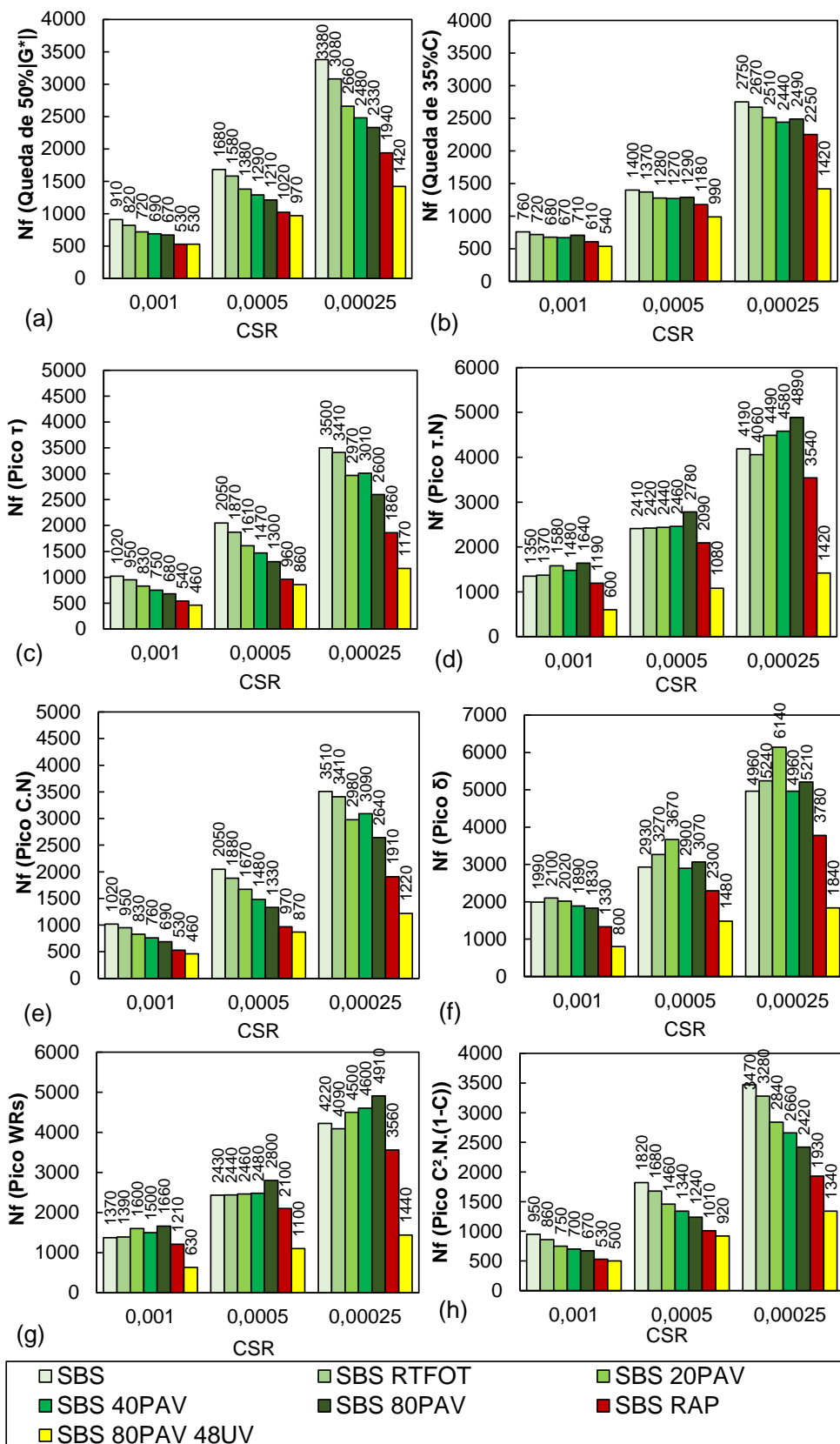


Figura 96 - Análise de diferentes definições de falha de ligantes com modificação em diferentes condições de envelhecimento, com inclusão da variável UV: (a) queda de 50% $|G^*|$, (b) queda de 35% C, (c) pico de C.N, (d) pico de τ .N, (e) pico de τ , (f) pico do δ , (g) pico do W_S^R e (h) pico do $C^2.N.(1-C)$



4.6.1.5.2. Curvas características de dano e critérios de ruptura

O dano na falha (S_f) e os coeficientes C_1 e C_2 de ajuste do modelo de potência da curva C vs S (Equação 21) determinados pelas diferentes definições de falha estão apresentados nas Tabela 45 a Tabela 50 do Apêndice A (Dados S-VECD para as diferentes definições de falha no teste LAS com o envelhecimento). Com a finalidade de avaliar o impacto das diferentes definições nos coeficientes C_1 e C_2 , a Tabela 23 compila os valores médios dentro de uma mesma condição de envelhecimento.

Tabela 23 - Valores médios de C_1 e C_2 obtidos entre as seis definições de falhas em um mesmo nível de envelhecimento

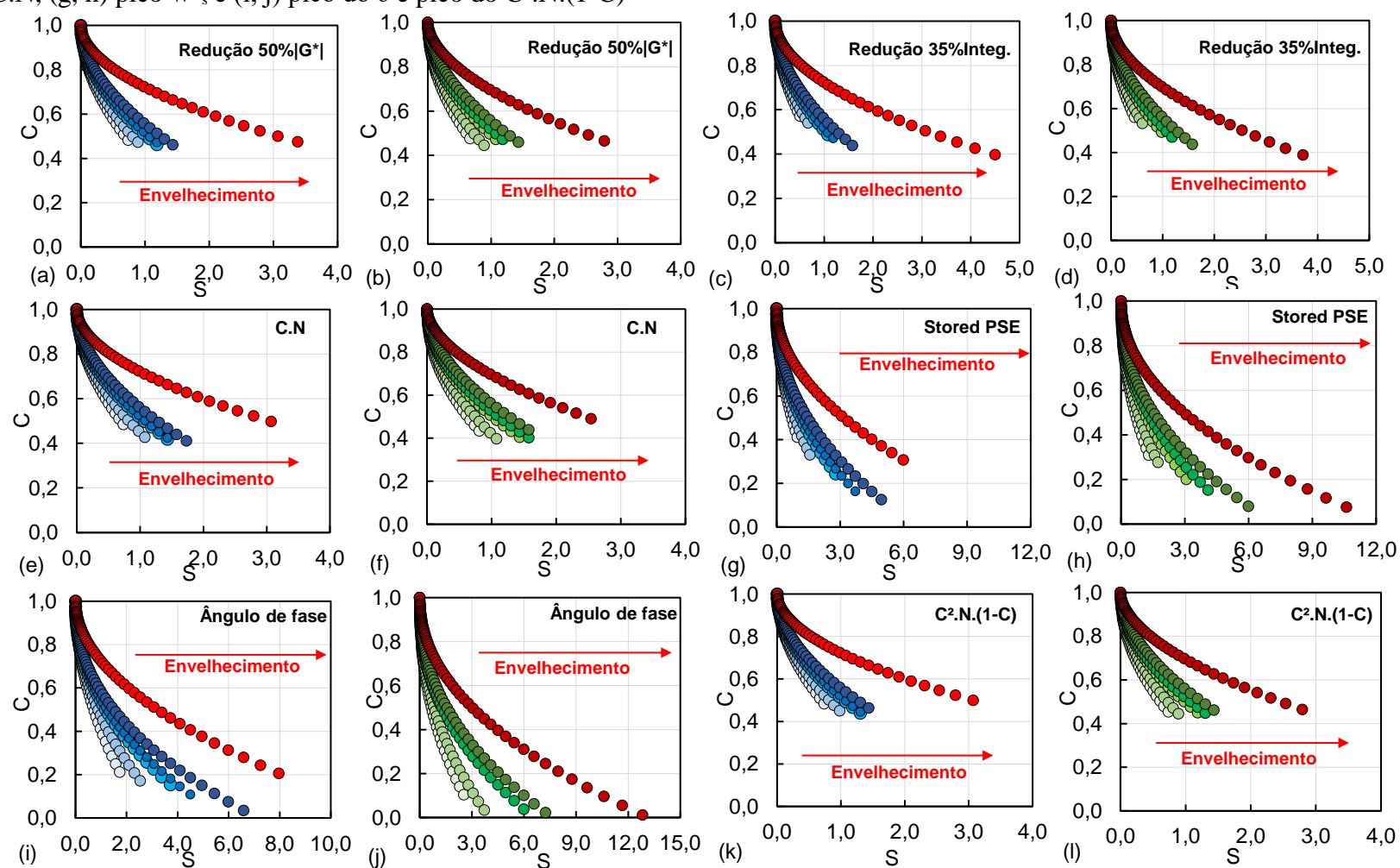
Ligantes	C1			C2		
	MD ¹	DP ²	CV (%) ³	MD ¹	DP ²	CV (%) ³
Neat	0,61	0,02	2,48	0,53	0,01	2,07
Neat RTFOT	0,55	0,01	2,67	0,52	0,04	7,01
Neat 20PAV	0,48	0,01	2,64	0,50	0,03	5,83
Neat 40PAV	0,47	0,01	2,82	0,50	0,03	6,58
Neat 80PAV	0,43	0,01	2,38	0,50	0,04	7,50
Neat RAP	0,28	0,00	0,00	0,52	0,01	1,45
SBS	0,63	0,02	3,95	0,49	0,03	5,76
SBS RTFOT	0,58	0,02	4,29	0,50	0,03	6,85
SBS 20PAV	0,49	0,02	4,83	0,49	0,04	8,32
SBS 40PAV	0,47	0,02	3,30	0,49	0,04	8,28
SBS 80PAV	0,43	0,02	3,60	0,51	0,05	9,48
SBS RAP	0,31	0,01	1,80	0,52	0,04	6,88

^{1, 2 e 3}: média, desvio padrão e coeficiente de variação, respectivamente

As análises dos dados exibem que os coeficientes C_1 e C_2 do modelo da curva C vs S são independentes da definição de falha utilizada, ou seja, resultam na mesma perda de integridade com o acúmulo de dano, com diferença apenas no dano da falha (S_f) do material. Além disso, C_1 decresce enquanto que C_2 tende a permanecer constante com o maior nível de envelhecimento.

O efeito do envelhecimento nas curvas C vs S estão exibidas na Figura 97. Os ligantes com menor nível de envelhecimento produziram curvas C (S) mais baixas (menores valores de S_f), enquanto materiais com maior nível de envelhecimento resultaram em C (S) mais altas (maiores valores de S_f), independente da definição de falha. Efeitos semelhantes foram identificados em Safaei, Castorena e Kim (2016), Wang et al. (2015) e Cao, Mohammad e Elseifi (2017).

Figura 97 – Curvas C vs S em diferentes definições de falha e condições de envelhecimento: (a, b) queda de 50%G*, (c, d) queda de 35%C, (e, f) pico do C.N, (g, h) pico W_s^R e (i, j) pico do δ e pico do $C^2.N.(1-C)$



As definições de 50% $|G^*|$, 35% C, C.N e $C^2.N.(1-C)$ apresentaram falha com perda de integridade entre 0,5 e 0,4, enquanto que as definições pelo ângulo de fase e W_S^R , a falha ocorre entre 0,3 e 0,0 da integridade. De modo geral, para uma integridade específica, os ligantes com maior nível de envelhecimento exibem uma maior intensidade de dano acumulada, indicando uma maior susceptibilidade ao dano por fadiga.

No entanto, a C vs S não permite uma análise direta sobre o desempenho do ligante, pois a abordagem S-VECD inclui três funções do material: as propriedades viscoelásticas lineares, características de evolução do dano, definição de falha e critério de ruptura. É inadequado determinar o desempenho final à fadiga apenas com base em uma ou duas propriedades do material.

Assim, três critérios de ruptura foram utilizados para análise do envelhecimento: o envoltório do G^R vs Nf, o envoltório do Cum (1-C) vs Nf e o envoltório do WRsum vs SE. Os coeficientes de ajuste dos envoltórios estão nas Tabela 45 a Tabela 50 do Apêndice A, e a representação gráfica nas Figura 199 a Figura 204 do Apêndice B, para as diferentes definições de falhas, tipos de ligantes e condições de envelhecimento.

De modo geral, G^R vs Nf tende a ocupar posição superior no gráfico como resposta ao maior grau de envelhecimento, independente da definição utilizada no cálculo. Para o Cum (1-C) vs Nf, duas tendências são observadas: o envelhecimento converge a variável numericamente em direção a origem (50% $|G^*|$, C.N e $C^2.N.(1-C)$); ou o envelhecimento aumenta o coeficiente angular da reta (35%C e W_S^R). Por fim, o envelhecimento afasta o envoltório WRsum vs SE da origem cartesiana em direção única.

A tendência única apresentada pelos critérios do G^R vs Nf e WRsum vs SE como resposta ao envelhecimento dos materiais asfálticos pode fornecer um bom indicador para dosar o agente rejuvenescedor caso a tendência inversa ao rejuvenescimento seja identificada, como está demonstrado na seção 4.6.2.5.1.

O envoltório do G^R vs Nf caracteriza a taxa geral de acúmulo de danos durante o teste de fadiga, estabelecida como relação fundamental para misturas asfálticas (ZHANG et al., 2013) e verificada posteriormente em ligantes asfálticos (WANG et al., 2015; SAFAEI e CASTORENA, 2016), independente do histórico de carregamento. Assim, é possível prever o número de ciclos até a falha para condições diferentes das utilizadas no teste de caracterização.

Diante disso, as Figura 98 e Figura 99 apresentam os envoltórios separados de acordo com o nível de envelhecimento no qual demonstram a unificação de algumas definições de falha: queda de 50% $|G^*|$, pico do C.N e $C^2.N.(1-C)$, independente da presença de modificação e da condição de envelhecimento dos ligantes asfálticos. No entanto, como foi identificada

diferença numérica entre os ciclos de falha, as definições seguem sendo abordadas separadamente.

Figura 98 - Evolútorio de ruptura G^R calculado a partir de diferentes definições de falha e níveis de envelhecimento para o ligante sem modificação: (a) Neat, (b) Neat RTFOT, (c) Neat 20PAV, (d) Neat 40PAV, (e) Neat 80PAV e (f) Neat RAP

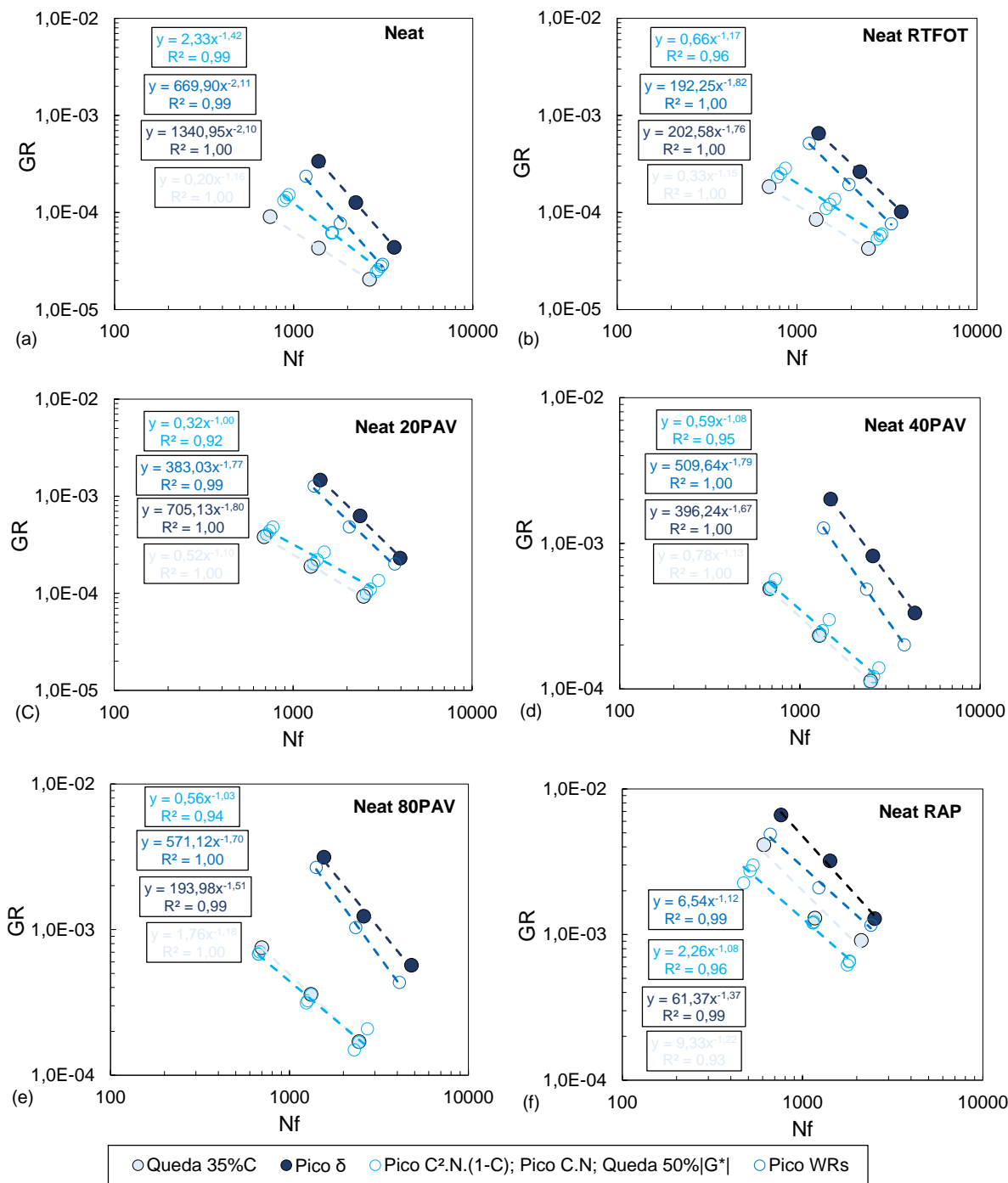
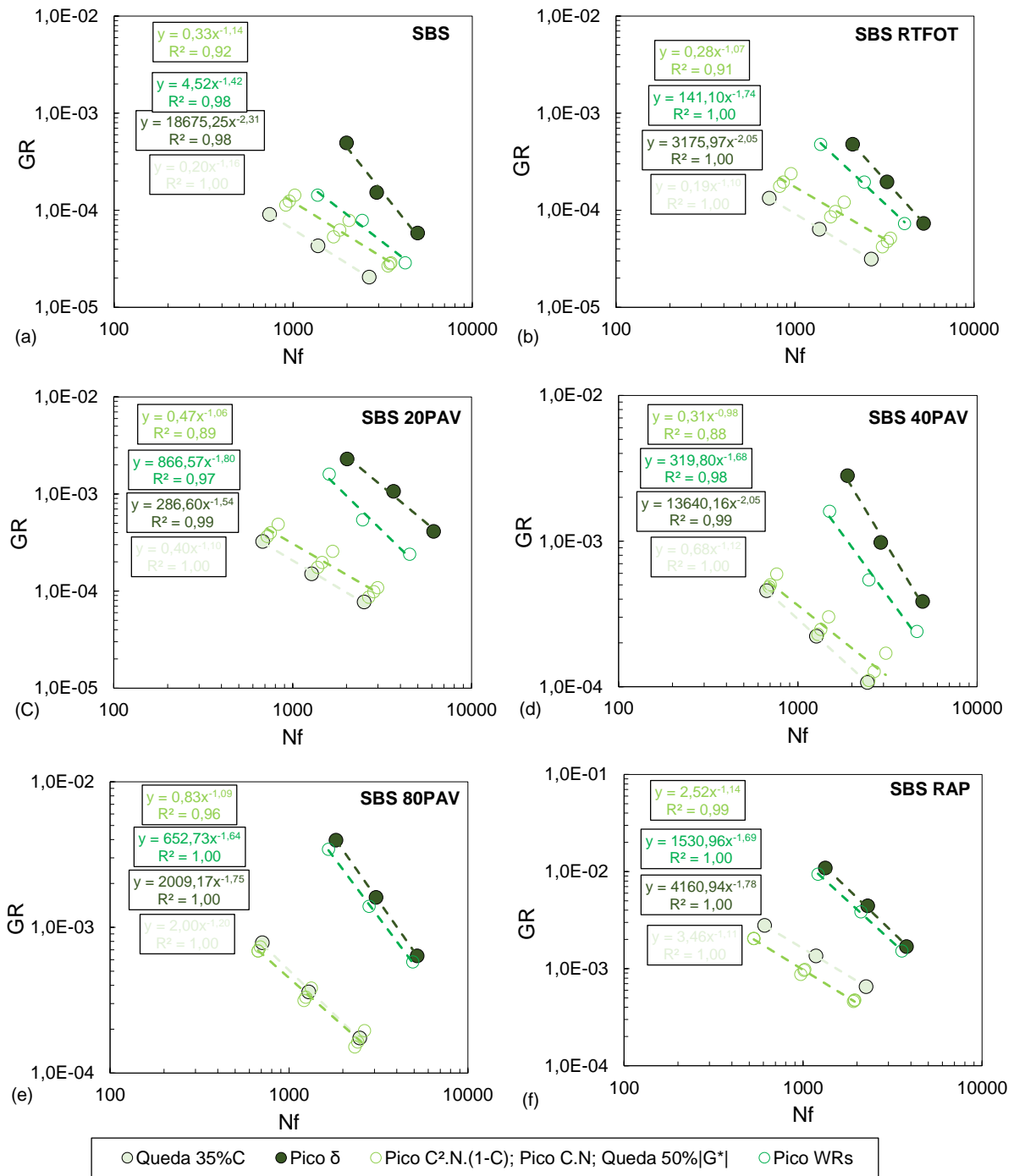


Figura 99 - Evoltório de ruptura G^R calculado a partir de diferentes definições de falha e níveis de envelhecimento para o ligante com modificação: (a) SBS, (b) SBS RTFOT, (c) SBS 20PAV, (d) SBS 40PAV, (e) SBS 80PAV e (f) SBS RAP



4.6.1.5.3. Previsão da vida de fadiga

Com os dados de caracterização viscoelástica, das C vs S e os coeficientes do S-VECD, foi avaliada a previsão da vida de fadiga conforme a seção 4.5.4.2. Assim, as formulações de Wang et al. (2015), Wang et al. (2018) e Safaei (2017) foram utilizadas para análise dos efeitos

do envelhecimento na vida de fadiga de ligantes, calculadas a partir das diferentes definições de falhas investigadas em amplitudes de deformações de 1%, 2,5% e 5%. Os resultados obtidos estão apresentados nas Figura 205 a Figura 210 do Apêndice C.

Como a análise do ciclo de falha indicou que a utilização de ligantes envelhecidos em laboratório pode não ser assertiva para avaliação dos efeitos do envelhecimento de materiais asfálticos, os resultados de simulação da vida de fadiga para esses materiais estão apenas apresentados. A análise e discussão quanto às diferentes formulações, os níveis de amplitude de deformação e as definições de falha estão restritas apenas na comparação entre os ligantes RAPs e seus respectivos ligantes tomados por referência.

Primeiramente, de acordo com os dados, a vida de fadiga determinada pela abordagem de energia de pseudo-deformação (Equação 30) é maior do que a do método de energia dissipada (Equação 29). Além disso, as formulações de Wang et al. (2018) e Safaei (2017) resultaram em tendências semelhantes com o envelhecimento, com diferença apenas numérica de N_f . O resultado era esperado uma vez que os modelos apresentados pelos autores se diferenciam apenas no valor da frequência de cálculo. Por fim, a adição de SBS pode efetivamente melhorar a resistência à fadiga do ligante asfáltico.

A fim de comparar efetivamente o efeito do envelhecimento nas diferentes formulações para previsão de desempenho, a Tabela 24 compila as diferenças de N_f entre os ligantes virgens com seus respectivos ligantes RAPs, calculadas pelas diferentes definições de falha e níveis de deformação de 1,0%, 2,5% e 5,0%. As células em verde indicam menor vida de fadiga do ligante RAP em relação ao ligante original. As células em vermelho apontam uma maior vida de fadiga do ligante RAP em relação ao ligante original.

As formulações de Wang et al. (2018) e Safaei (2017) exibiram uma maior diferença entre a vida de fadiga dos ligantes originais e ligantes RAPs do que a formulação de Wang et al. (2015). Além disso, as três formulações calculadas por todas as definições de falhas, com exceção pelas definições de pico do W_S^R do ângulo de fase, evidenciaram a menor vida de fadiga dos ligantes RAPs em relação aos ligantes originais nos níveis de deformação de 2,5% e 5%.

Assim, as três formulações calculadas pelas definições de queda de $50\%|G^*|$, queda de $35\%C$, pico do $C.N$ e pico do $C^2.N.(1-C)$ mostraram-se sensíveis em captar os efeitos do envelhecimento. Assim, juntamente com a análise do rejuvenescimento em ligantes (seção 4.6.2.5) e as correlações com as misturas asfálticas (5.6.4), será possível identificar os potenciais parâmetros para seleção e dosagem do agente rejuvenescedor pelo fenômeno de fadiga.

Tabela 24 - Variação de Nf (Nf virgem – Nf RAP) simulado pelas três formulações de previsão de desempenho para as diferentes definições de falha em níveis de deformação de 1,0%, 2,5% e 5%

Ligantes	Wang et al. (2015)	Wang et al. (2018)	Safaei (2017)	Wang et al. (2015)	Wang et al. (2018)	Safaei (2017)	Wang et al. (2015)	Wang et al. (2018)	Safaei (2017)
	$\Delta Nf@1,0\%$			$\Delta Nf@2,5\%$			$\Delta Nf@5,0\%$		
	Queda de 50% G*			Queda de 50% G*			Queda de 50% G*		
Nf Neat - Nf Neat RAP	1,40E+05	1,05E+08	2,66E+08	4,58E+04	3,71E+05	9,30E+05	2,05E+03	5,04E+03	1,26E+04
Nf SBS - Nf SBS RAP	-9,12E+05	1,81E+09	6,03E+09	1,88E+04	3,78E+05	1,26E+06	5,90E+02	6,14E+02	2,04E+03
Ligantes	Wang et al. (2015)	Wang et al. (2018)	Safaei (2017)	Wang et al. (2015)	Wang et al. (2018)	Safaei (2017)	Wang et al. (2015)	Wang et al. (2018)	Safaei (2017)
	Queda de 35%C			Queda de 35%C			Queda de 35%C		
	Nf Neat - Nf Neat RAP	-5,88E+06	1,96E+08	6,02E+08	1,55E+04	2,64E+05	8,01E+05	9,09E+02	1,74E+03
Nf SBS - Nf SBS RAP	-5,02E+06	-4,00E+08	-1,24E+09	-1,22E+03	1,61E+04	4,41E+04	1,81E+02	1,25E+02	3,62E+02
Ligantes	Wang et al. (2015)	Wang et al. (2018)	Safaei (2017)	Wang et al. (2015)	Wang et al. (2018)	Safaei (2017)	Wang et al. (2015)	Wang et al. (2018)	Safaei (2017)
	Pico C.N			Pico C.N			Pico C.N		
	Nf Neat - Nf Neat RAP	1,15E+06	-1,85E+14	-2,53E+15	4,59E+04	3,82E+04	3,95E+04	2,03E+03	3,20E+03
Nf SBS - Nf SBS RAP	2,97E+05	2,13E+07	3,81E+07	2,58E+04	1,33E+05	2,85E+05	1,09E+03	2,00E+03	4,30E+03
Ligantes	Wang et al. (2015)	Wang et al. (2018)	Safaei (2017)	Wang et al. (2015)	Wang et al. (2018)	Safaei (2017)	Wang et al. (2015)	Wang et al. (2018)	Safaei (2017)
	Pico WRs			Pico WRs			Pico WRs		
	Nf Neat - Nf Neat RAP	-1,01E+07	-1,20E+09	-3,48E+09	8,25E+04	-1,54E+04	-7,34E+04	4,07E+03	3,83E+03
Nf SBS - Nf SBS RAP	-1,82E+08	5,68E+06	1,04E+07	-1,53E+05	5,52E+04	1,10E+05	1,98E+03	8,17E+02	2,40E+03
Ligantes	Wang et al. (2015)	Wang et al. (2018)	Safaei (2017)	Wang et al. (2015)	Wang et al. (2018)	Safaei (2017)	Wang et al. (2015)	Wang et al. (2018)	Safaei (2017)
	Pico ângulo de fase			Pico ângulo de fase			Pico ângulo de fase		
	Nf Neat - Nf Neat RAP	-4,05E+06	-4,28E+06	-7,65E+06	3,02E+05	1,83E+04	1,94E+04	1,37E+04	6,63E+03
Nf SBS - Nf SBS RAP	-3,39E+08	-6,48E+04	-8,90E+05	-1,19E+05	-9,13E+03	-1,51E+04	1,07E+04	3,78E+03	4,36E+03
Ligantes	Wang et al. (2015)	Wang et al. (2018)	Safaei (2017)	Wang et al. (2015)	Wang et al. (2018)	Safaei (2017)	Wang et al. (2015)	Wang et al. (2018)	Safaei (2017)
	Pico C ² .N.(1-C)			Pico C ² .N.(1-C)			Pico C ² .N.(1-C)		
	Nf Neat - Nf Neat RAP	-1,81E+06	-5,02E+07	-1,44E+08	8,23E+03	1,52E+04	2,63E+04	4,35E+02	7,66E+02
Nf SBS - Nf SBS RAP	-5,17E+05	5,62E+08	1,61E+09	1,74E+04	3,20E+05	9,16E+05	7,65E+02	1,09E+03	3,12E+03

4.6.2. Influência do rejuvenescimento nas propriedades dos ligantes

Após a análise e a discussão dos efeitos do envelhecimento, esta seção tem por objetivo avaliar o efeito inverso: o rejuvenescimento. Como o processo oxidativo promove alterações mais acentuadas em termos de rigidez nas propriedades de alta temperatura, aqui será possível investigar na prática e numericamente a influência direta nos teores de incorporação.

O processo de rejuvenescimento foi testado apenas nos ligantes RAPs, pois de acordo com os resultados da seção anterior, há diferenças entre os mecanismos de envelhecimento campo e laboratório, evidenciado principalmente por meio Nf no teste LAS em suas diferentes definições de falha. Dois agentes rejuvenescedores, R e S, foram adicionados em quatro diferentes concentrações, sendo avaliado nesta seção os efeitos do rejuvenescimento na penetração, no comportamento LVE, no PGH, no teste de MSCR e LAS.

A partir disso, foi possível determinar o teor ótimo de agente rejuvenescedor necessário para restaurar cada uma das propriedades aqui avaliadas, tendo como propriedade alvo os dois ligantes controles Neat e SBS. Os valores tratados como ótimo são as concentrações mínimas ou máximas a depender do parâmetro em análise, para apresentar tolerância equivalente aos ligantes tomados por referência. Como exemplo, em termos de fadiga e deformação permanente são as concentrações mínimas e máximas, respectivamente.

4.6.2.1. Penetração

A Figura 100 exibe os efeitos da incorporação de quatro teores dos agentes S e R nos ligantes Neat RAP (a e b) e SBS RAP (c e d), juntamente com os limites de penetração entre 50 e 70 para um ligante virgem sem modificação. Os resultados mostram que os dois agentes rejuvenescedores podem ser utilizados para promover um efeito amolecedor nos ligantes extraídos até o nível alvo de um ligante virgem sem modificação, entre 50 e 70. Observa-se um aumento em função linear do log (penetração) com R^2 superior a 0,98 a medida que há incremento no teor. Os coeficientes angulares dos modelos lineares apresentados, que podem indicar o efeito da susceptibilidade da penetração dos ligantes devido ao agente, são muito similares entre si. Dessa forma, é possível afirmar que os agentes promovem efeitos similares quanto à penetração dos ligantes envelhecidos.

A Figura 101 apresenta os teores ótimos de incorporação de ARs para que ambos os ligantes RAPs atinjam os limites inferior (50) e superior (70) de penetração. O ligante Neat

RAP necessitou de um teor médio de 17% maior para o AR-S e 13% maior para o AR-R para restaurar os limites da propriedade de penetração em relação ao SBS RAP. Essa verificação é resultado do maior nível de envelhecimento do ligante Neat em relação ao SBS.

Figura 100 - Gráfico de misture entre log (pen) vs concentração dos ARs S e R nos ligantes Neat RAP (a, b) e SBS RAP (c, d)

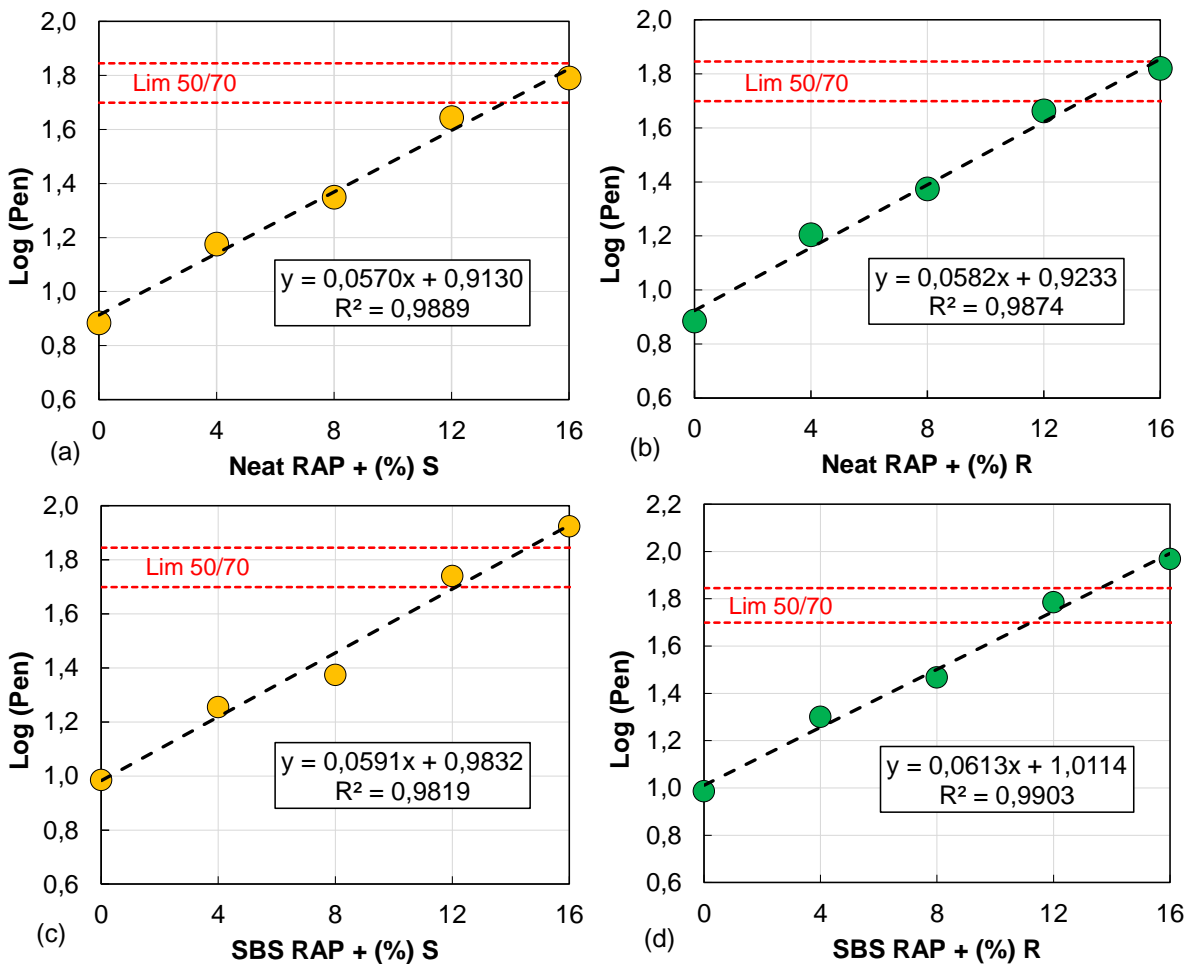
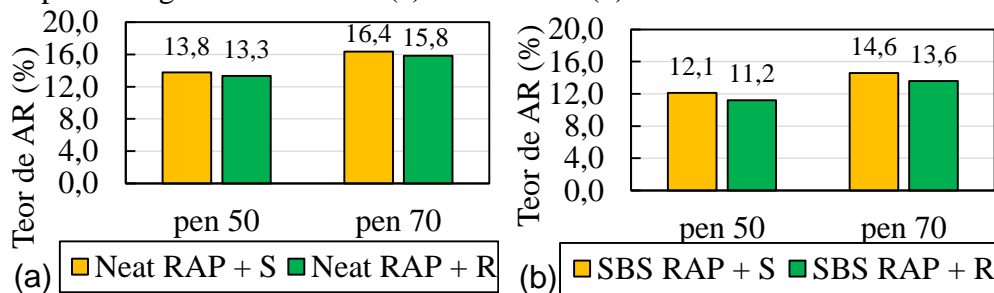
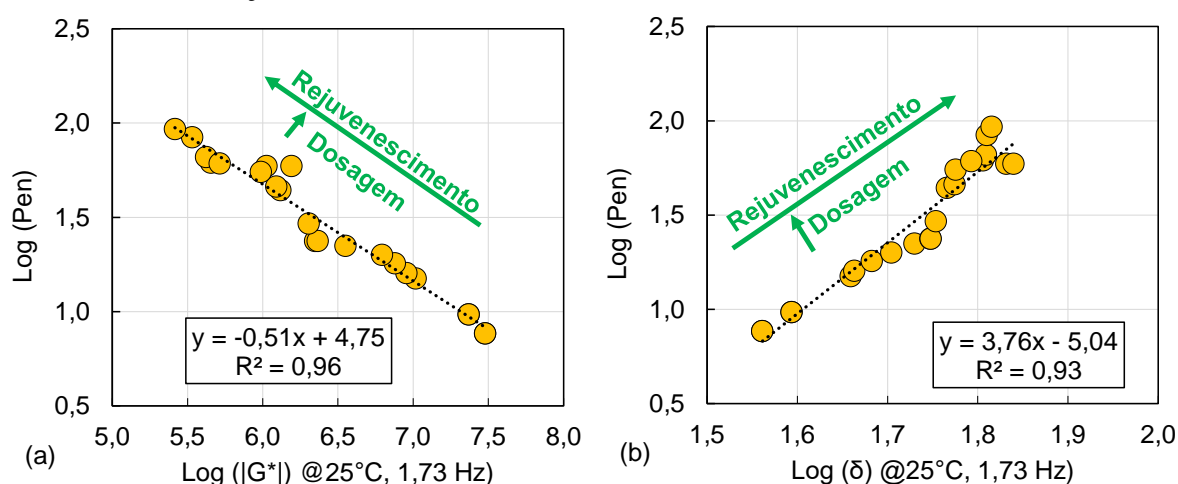


Figura 101 - Teores ótimos dos ARs com base nos limites superior (70) e inferior (50) de penetração para os ligantes Neat RAP (a) e SBS RAP (b)



A propriedade de penetração consta na recomendação RILEM TC 264 RAP (HUGENER et al., 2022) para dosar e avaliar os efeitos dos agentes rejuvenescedores em ligantes recuperados. No trabalho desenvolvido pelos autores, plotou-se $\log(\text{Pen})$ vs $\text{Log}|G^*|$ à 28°C e 1,59 Hz criando-se três macrorregiões para ligantes não envelhecidos, envelhecidos no curto prazo e longo prazo. A Figura 102 apresenta correlação semelhante utilizando os dados experimentais de $|G^*|$ e δ à 25°C e 1,73 Hz tendo por referência a mesma temperatura de condução do teste de penetração. Foram utilizados dados dos dois ligantes virgens (Neat e SBS) e dos dois ligantes RAPs sem e com os 4 teores de AR. Inicialmente se verificou uma forte correlação linear entre as variáveis. Atenderiam os limites para a condição não envelhecida apenas os dois ligantes virgens e os ligantes RAPS com 12 e 16% de ambos os agentes rejuvenescedores.

Figura 102 – Correlação entre $\log(\text{Pen})$ vs $|G^*|$ (a) e $\log(\text{Pen})$ vs δ (b) dos ligantes RAPs com diferentes concentrações de ARs



De modo geral, a propriedade de penetração conduzida em temperatura intermediária ainda é amplamente utilizada para determinação do teor ótimo de agente rejuvenescedor em misturas recicladas. Assim, nas seções subsequentes será possível comparar os teores aqui obtidos com as demais propriedades.

4.6.2.2. Caracterização LVE

Os resultados reológicos dos ligantes RAPs com diferentes concentrações de agente rejuvenescedor estão apresentados e discutidos nesta seção. Os testes foram conduzidos conforme descrito em 4.5.2.

As curvas mestras foram construídas para uma $T_{ref} = 25^{\circ}\text{C}$, com os demais dados deslocados pelos aT da Tabela 25 e da Figura 103. Os coeficientes de WLF e polinomial também estão apresentados na Tabela 25. Um aumento na concentração de AR resulta em aumento nos valores de aT para temperaturas acima de 35°C , revertendo o efeito identificado com o envelhecimento. Além disso, os ARs promoveram alterações nos coeficientes de translação em temperaturas inferiores à 15°C , não detectado o envelhecimento.

Figura 103 – Valores de aT para diferentes tipos e concentrações de agentes rejuvenescedores

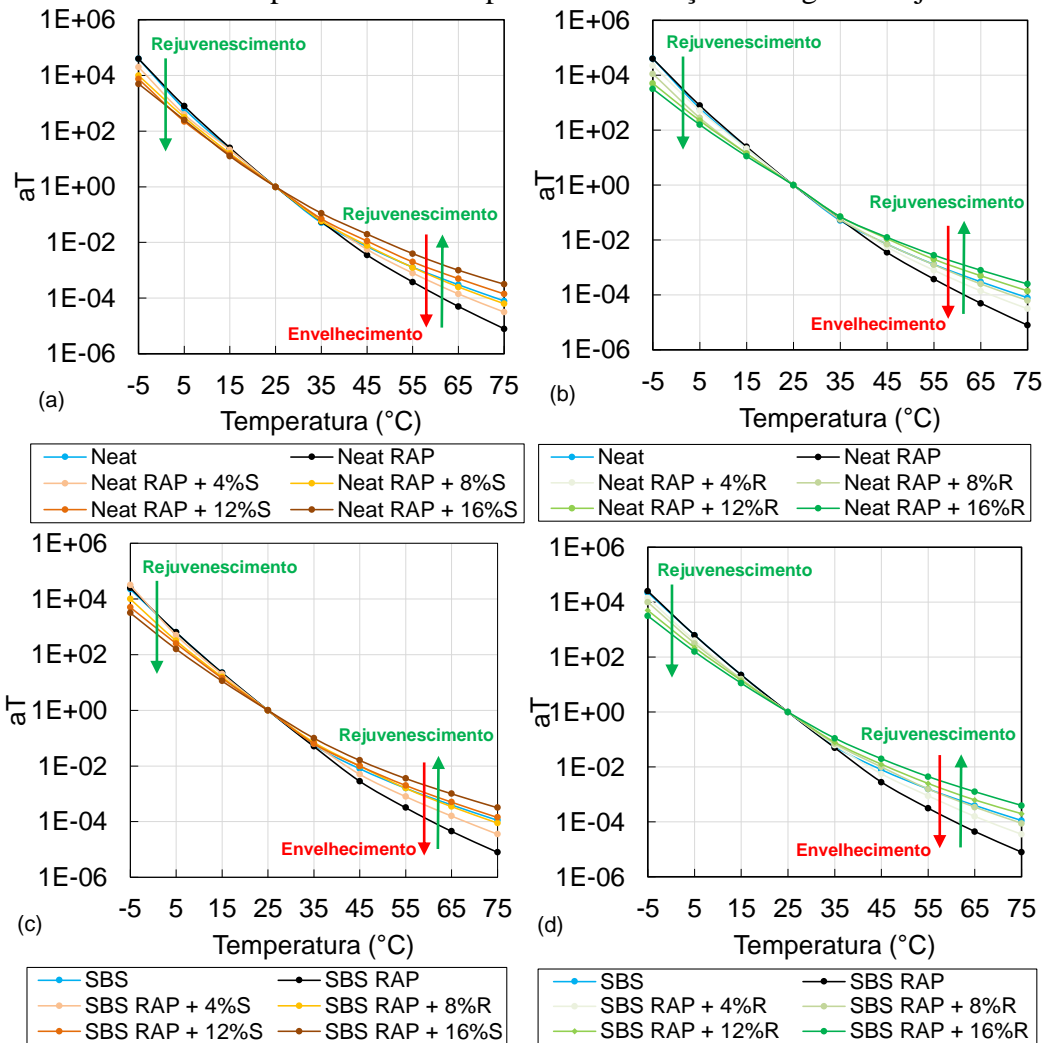


Tabela 25 - Coeficientes de translação (at) para Tref = 25°C e coeficientes de ajuste do WLF e polinomial para diferentes tipos e concentrações de agentes rejuvenescedores

Ligantes	WLF		Polinomial			at								
	C1	C2	a1	a2	a3	-5	5	15	25	35	45	55	65	75
Neat	15	126	0,00095	-0,17243	3,67116	4,0E+04	631	22	1	5,1E-02	7,1E-03	1,3E-03	3,0E-04	7,9E-05
Neat RAP	18	125	0,00086	-0,17284	3,47977	4,0E+04	794	25	1	5,6E-02	3,6E-03	3,8E-04	5,0E-05	7,9E-06
Neat RAP + 4%S	17	132	0,00068	-0,15790	3,51482	2,0E+04	398	21	1	6,9E-02	5,6E-03	7,9E-04	1,4E-04	3,2E-05
Neat RAP + 8%S	17	145	0,00068	-0,15010	3,26384	1,0E+04	136	16	1	5,9E-02	7,8E-03	1,7E-03	2,5E-04	6,3E-05
Neat RAP + 12%S	17	163	0,00065	-0,14089	3,06942	7,5E+03	224	14	1	7,1E-02	1,1E-02	2,0E-03	5,0E-04	1,4E-04
Neat RAP + 16%S	20	226	0,00060	-0,13198	3,03464	5,0E+03	251	13	1	1,1E-01	2,0E-02	4,0E-03	1,0E-03	3,7E-04
Neat RAP + 4%R	17	132	0,00068	-0,15790	3,51482	2,2E+04	525	21	1	6,9E-02	5,6E-03	7,9E-04	1,4E-04	3,7E-05
Neat RAP + 8%R	23	207	0,00070	-0,15030	3,24750	1,1E+04	282	14	1	5,6E-02	7,1E-03	1,3E-03	2,5E-04	6,3E-05
Neat RAP + 12%R	17	163	0,00065	-0,14089	3,06942	5,0E+03	224	14	1	7,1E-02	1,1E-02	2,0E-03	5,0E-04	1,4E-04
Neat RAP + 16%R	22	228	0,00060	-0,13418	3,01346	3,2E+03	158	11	1	7,1E-02	1,3E-02	2,8E-03	7,9E-04	2,5E-04
SBS	15	134	0,00087	-0,16327	3,53932	2,2E+04	631	22	1	5,6E-02	7,9E-03	1,6E-03	4,0E-04	1,1E-04
SBS RAP	19	135	0,00086	-0,17363	3,45605	2,5E+04	631	22	1	5,0E-02	2,8E-03	3,2E-04	4,5E-05	7,9E-06
SBS RAP + 4%S	22	183	0,00080	-0,16460	3,59800	3,2E+04	501	20	1	6,3E-02	5,0E-03	7,9E-04	1,6E-04	3,5E-05
SBS RAP + 8%S	18	165	0,00070	-0,14690	3,23740	1,0E+04	316	16	1	7,1E-02	1,0E-02	1,6E-03	3,5E-04	8,9E-05
SBS RAP + 12%S	18	170	0,00065	-0,14038	3,04251	5,0E+03	251	14	1	6,3E-02	1,0E-02	2,0E-03	5,0E-04	1,4E-04
SBS RAP + 16%S	14	148	0,00064	-0,13204	2,86698	3,2E+03	158	11	1	1,0E-01	1,6E-02	3,5E-03	1,0E-03	3,2E-04
SBS RAP + 4%R	23	199	0,00080	-0,16460	3,59800	1,4E+04	398	16	1	6,3E-02	5,6E-03	8,9E-04	1,6E-04	3,5E-05
SBS RAP + 8%R	18	165	0,00070	-0,14690	3,23740	1,0E+04	316	16	1	7,1E-02	1,0E-02	1,6E-03	3,5E-04	8,9E-05
SBS RAP + 12%R	16	159	0,00065	-0,13817	3,01961	5,0E+03	224	14	1	7,9E-02	1,3E-02	2,5E-03	6,3E-04	2,0E-04
SBS RAP + 16%R	14	145	0,00064	-0,13056	2,87968	3,2E+03	158	11	1	1,1E-01	2,0E-02	4,5E-03	1,3E-03	4,0E-04

A Figura 104 apresenta as curvas mestras de módulo de cisalhamento dinâmico (a e c) e ângulo de fase (b e d), enquanto que a Figura 105 apresenta o espaço cole-cole (a e c) e o diagrama black (b e d) desenvolvidos após a aplicação do PSTT para o ligante Neat RAP com diferentes tipos e concentrações de agente rejuvenescedor. Gráficos similares para o ligante SBS RAP estão na Figura 106 e Figura 107. Os efeitos do rejuvenescimento nas propriedades reológicas LVE determinam:

- Diminuição dos valores de $|G^*|$ e aumento do δ em todo o espectro de frequência, indicando um amolecimento e maior comportamento viscoso. As curvas mestras de $|G^*|$ são deslocadas para baixo e para direita, revertendo o efeito do envelhecimento. No entanto, independente do teor de incorporação, o comportamento final dos ligantes (forma das curvas mestras) não são similares aos respectivos ligantes de referência;
- Não alteração no formato das curvas no espaço cole-cole e no diagrama black quando comparado aos respectivos ligantes sem AR. Assim, o aumento na concentração dos aditivos desloca as curvas no sentido de redução da variável E_1 vs E_2 no cole-cole, e de aumento da variável $|G^*|$ vs δ no diagrama black. Diante dessa resposta, os parâmetros $|G^*c|$ e R-value não são modificados conforme apresentado na sequência;
- Apesar de atingir o comportamento puramente viscoso ($\delta = 90^\circ$) após a incorporação dos ARs dentro das condições de ensaio, os agentes rejuvenescedores não restauraram a propriedade de relaxamento do ligante SBS RAP ao mesmo nível do ligante SBS virgem, ou seja, o processo de degradação do polímero não foi revertido, uma vez que a região de platô não é identificada independente da concentração de aditivo incorporada.

Figura 104 – Curvas mestras de $|G^*|$ e δ para o ligante Neat RAP com diferentes concentrações de AR S (a e b) e AR R (d e d)

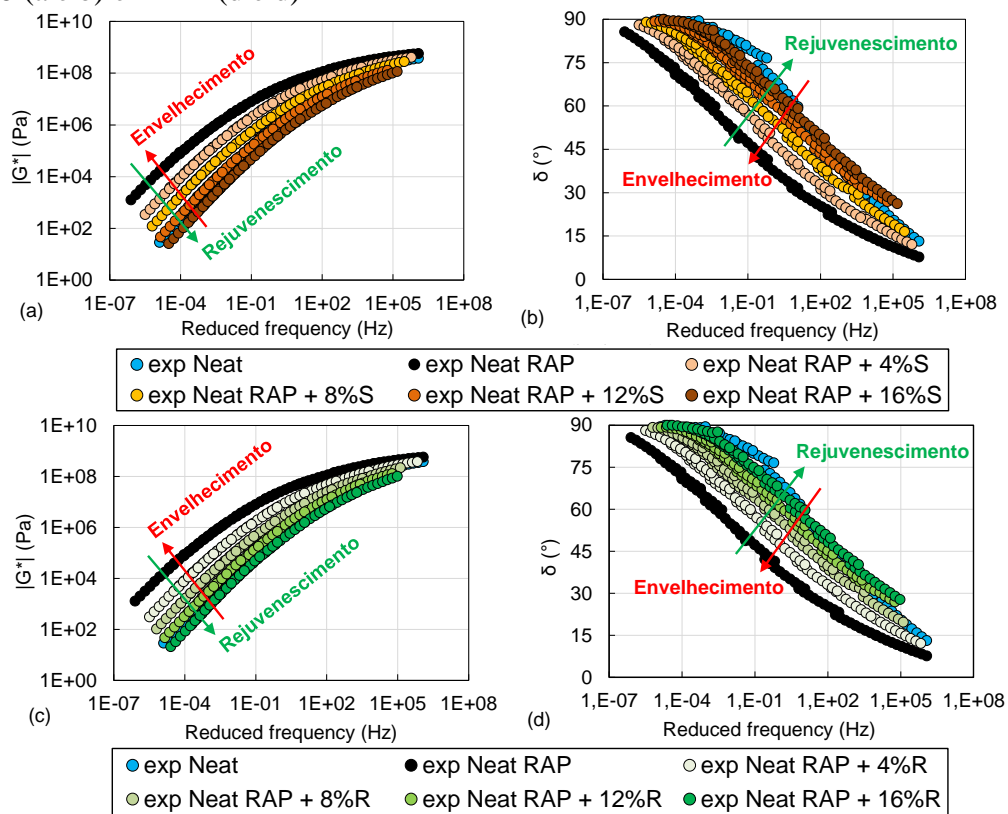


Figura 105 – Espaço cole cole e diagrama black para o ligante Neat RAP com diferentes concentrações de AR S (a e b) e AR R (d e d)

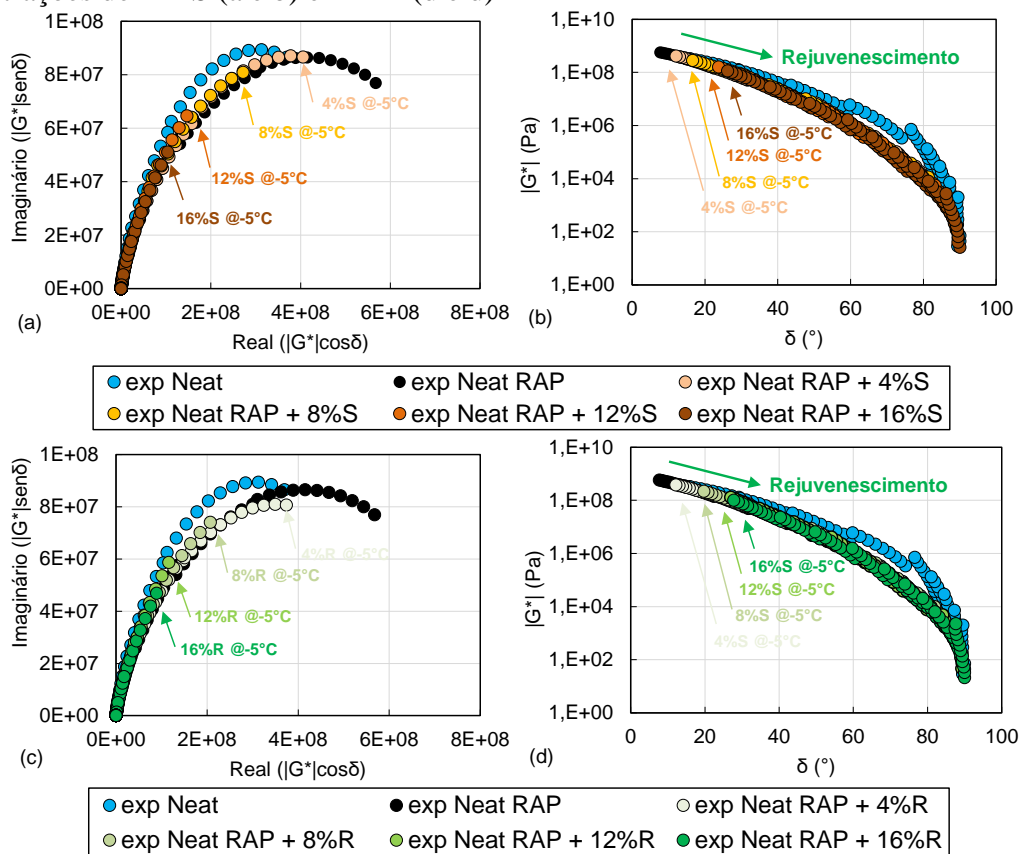


Figura 106 – Curvas mestras de $|G^*|$ e δ para o ligante SBS RAP com diferentes concentrações de AR S (a e b) e AR R (d e d)

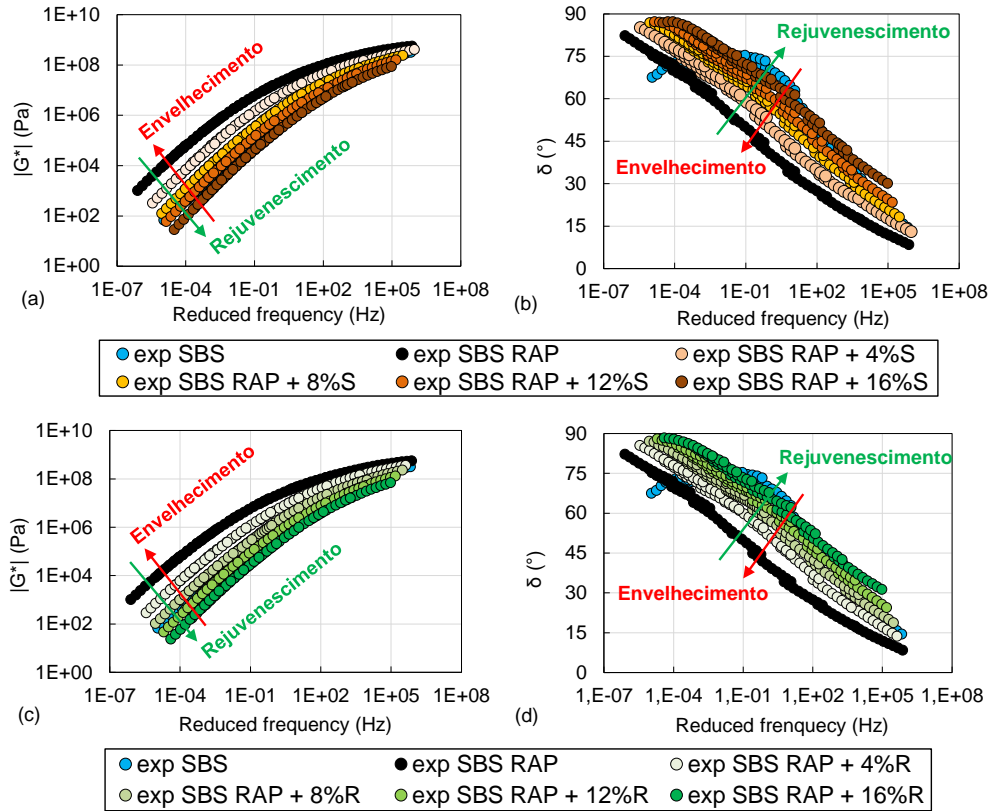
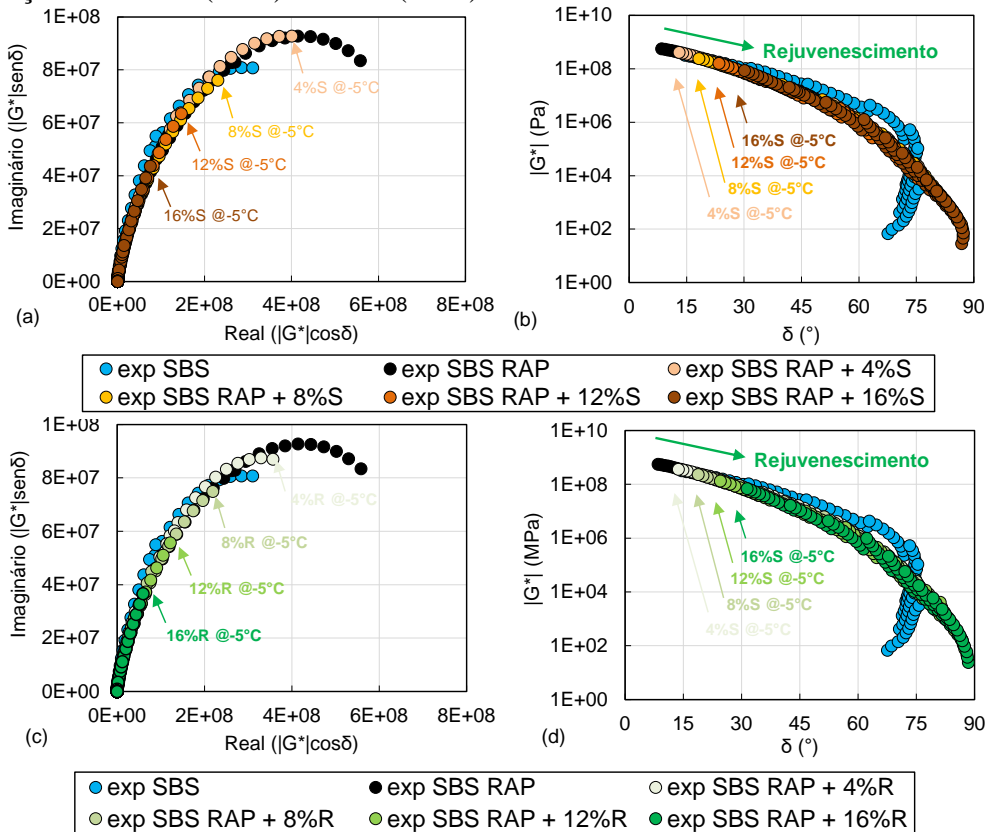


Figura 107 – Espaço cole cole e diagrama black para o ligante SBS RAP com diferentes concentrações de AR S (a e b) e AR R (d e d)



De modo geral, os agentes rejuvenescedores restauram as propriedades reológicas em termos de rigidez e ângulo de fase dos ligantes RAPs. No entanto, as respostas dos materiais em diferentes temperaturas e frequências (curvas mestras) não são similares aos ligantes virgens. Uma análise mais detalhada pode ser observada na Figura 108 e Figura 109, para os ligantes Neat e SBS com diferentes concentrações de ARs respectivamente, no qual plotaram-se os dados experimentais de $|G^*|$ e δ nas temperaturas de -5 a 75°C e frequência de $11,6$ Hz.

A concentração de 8% reestabelece a rigidez dos ligantes RAPs em temperaturas inferiores a 25°C . Em temperaturas superiores a 35°C , teores entre 12% e 16% são necessários. No entanto, o ângulo de fase não foi restaurado independente do tipo e da concentração do AR nas temperaturas acima de 25°C .

Figura 108 – $|G^*|$ e δ experimental em diferentes temperaturas e frequência $11,6$ Hz para o ligante Neat RAP com diferentes concentrações de AR S (a e b) e AR R (d e d)

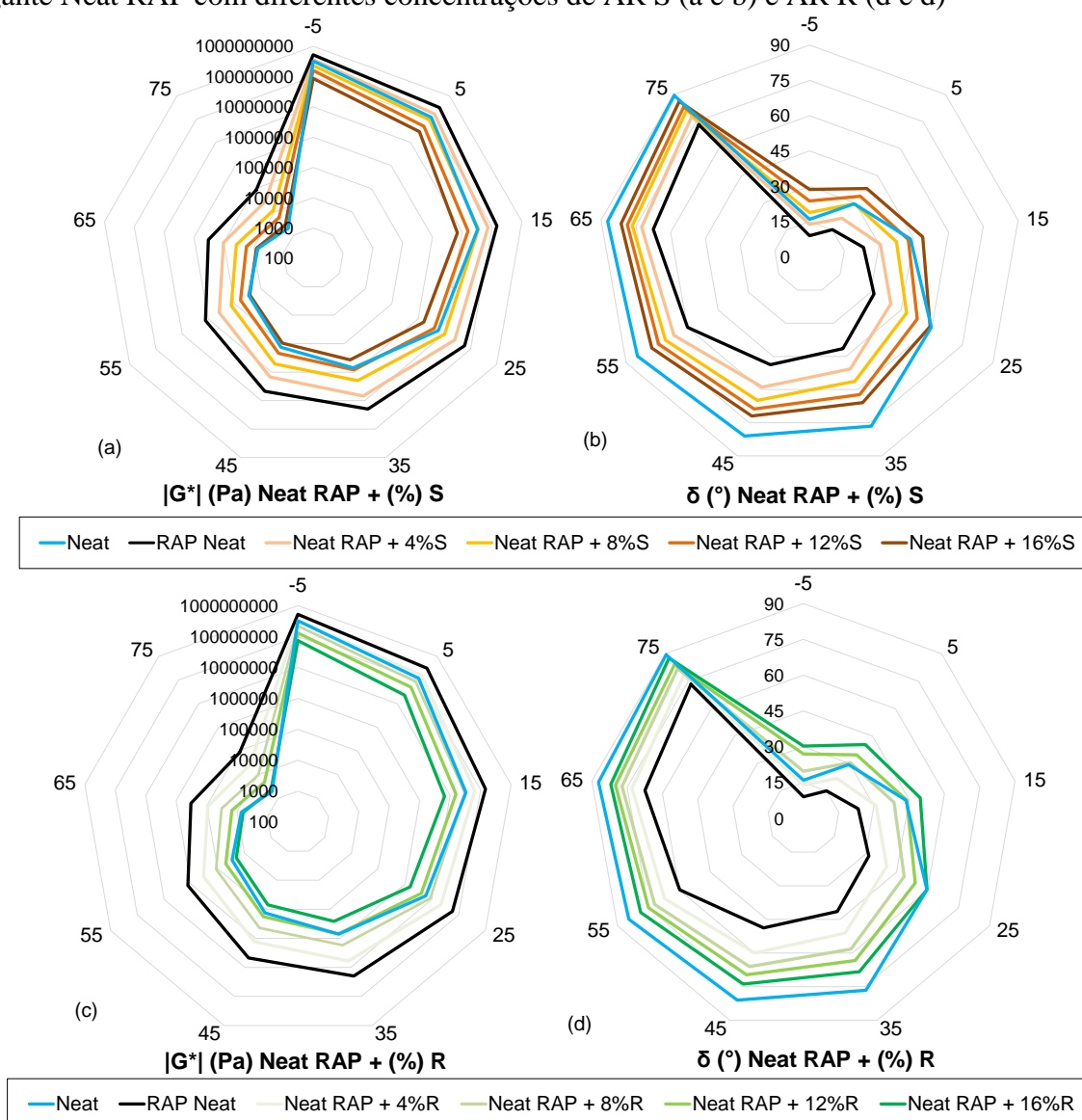
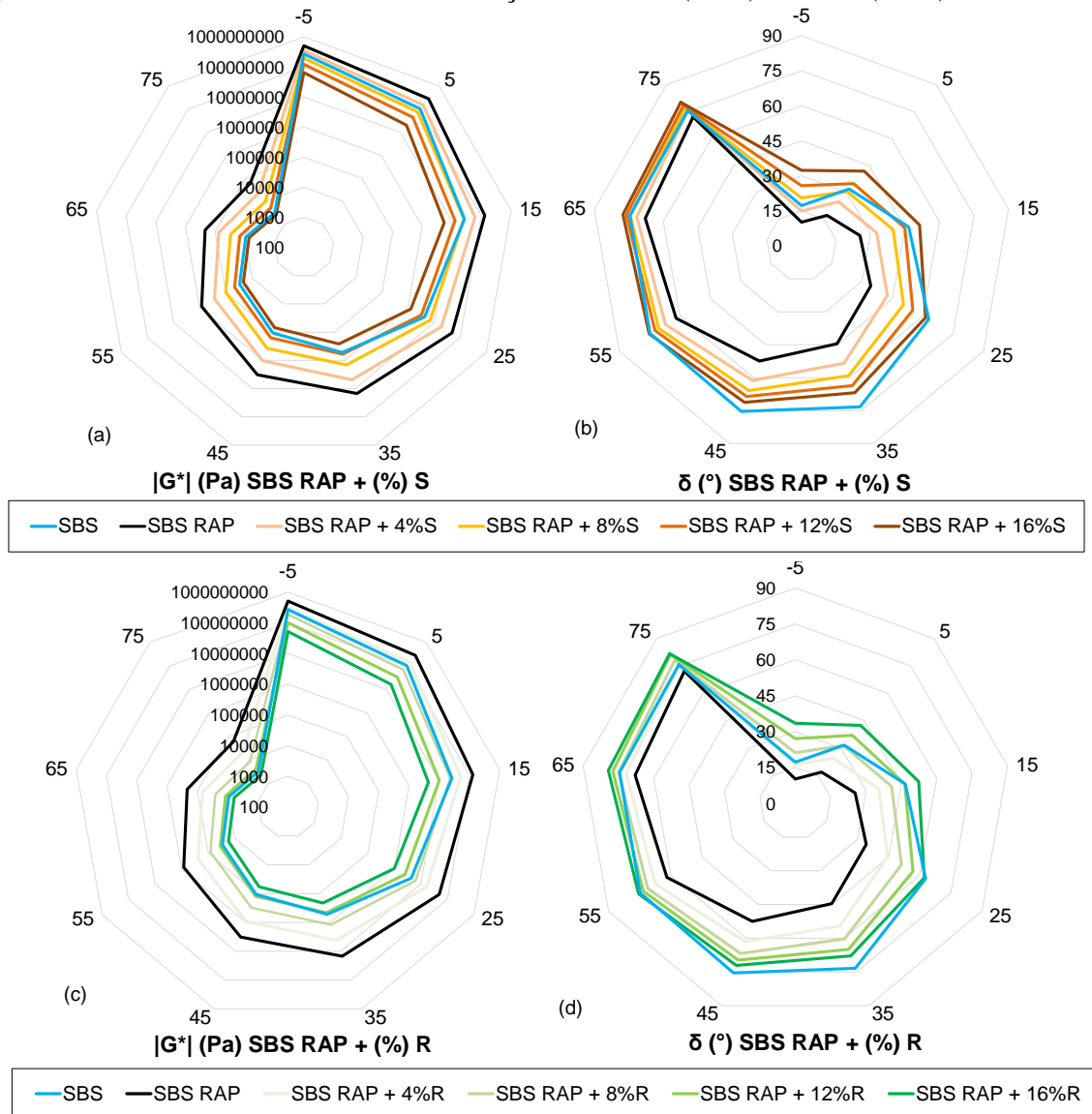


Figura 109 – $|G^*|$ e δ experimental em diferentes temperaturas e frequência 11,6 Hz para o ligante SBS RAP com diferentes concentrações de AR S (a e b) e AR R (d e d)



Assim, esse pressuposto é a primeira comprovação da hipótese mencionada na seção 0: dependendo da posição do parâmetro escolhido para dosar agente rejuvenescedor no domínio da temperatura e frequência, diferentes teores ótimos serão determinados. Afim de discretizar de modo geral esse impacto, os valores de RAI foram extraídos das curvas mestras (Figura 104 e Figura 106) e utilizados para construção dos gráficos de misturas das Figura 110 e Figura 112 entre os ligantes RAP e as diferentes concentrações de ARs. Foram considerados as mesmas faixas de frequência utilizadas para analisar o efeito do envelhecimento: RAI_{DP} , RAI_{FAD} e RAI_{TOTAL} .

Uma excelente correlação em modelo linear decrescente é identificada entre o teor de incorporação do AR vs RAI, com redução da área abaixo da curva mestra de $|G^*|$ com o

aumento do teor de AR. Um maior teor de AR é exigido para restaurar os níveis de rigidez no domínio da deformação permanente, enquanto que um menor teor já atinge níveis semelhantes no domínio da fadiga, como pode ser verificado nas Figura 111 e Figura 113. Ao considerar todo o espectro de frequência, resulta em um teor intermediário entre ambos os domínios.

Figura 110 – Gráfico de mistura entre RAI em três domínio de frequência vs ligante Neat RAP com diferentes concentrações de AR S (a, c, e) e AR R (b, d, f)

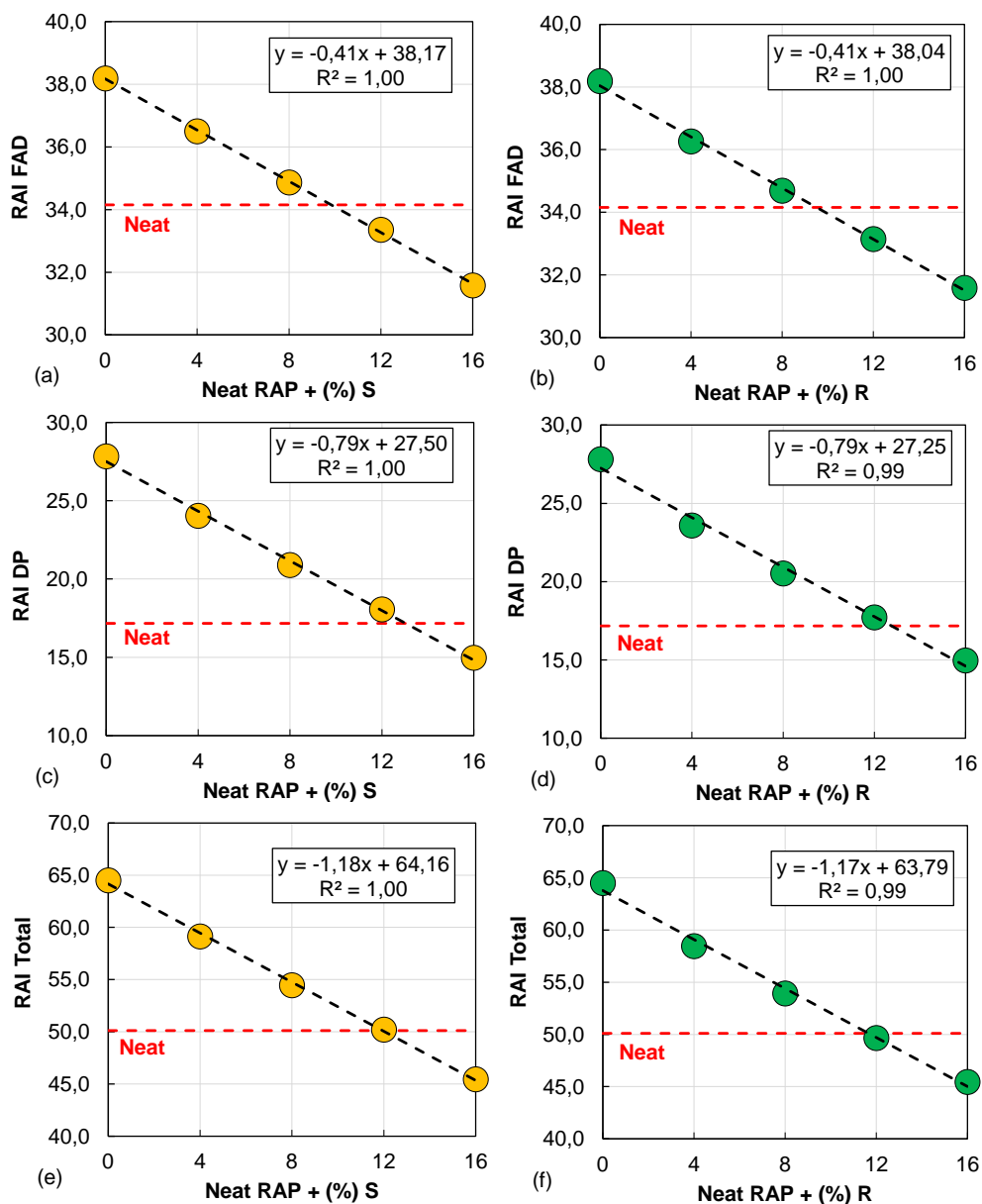


Figura 111 – Teor ótimo do AR S e R para o ligante Neat RAP de acordo com o parâmetro RAI em três domínios de frequência

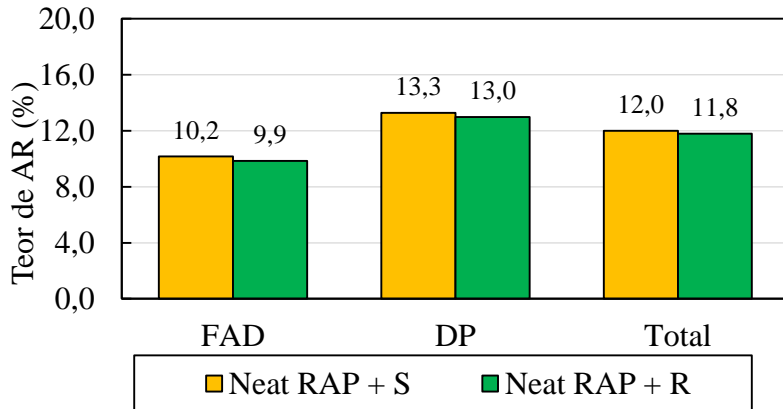


Figura 112 – Gráfico de mistura entre RAI em três domínio de frequência vs ligante SBS RAP com diferentes concentrações de AR S (a, c, e) e AR R (b, d, f)

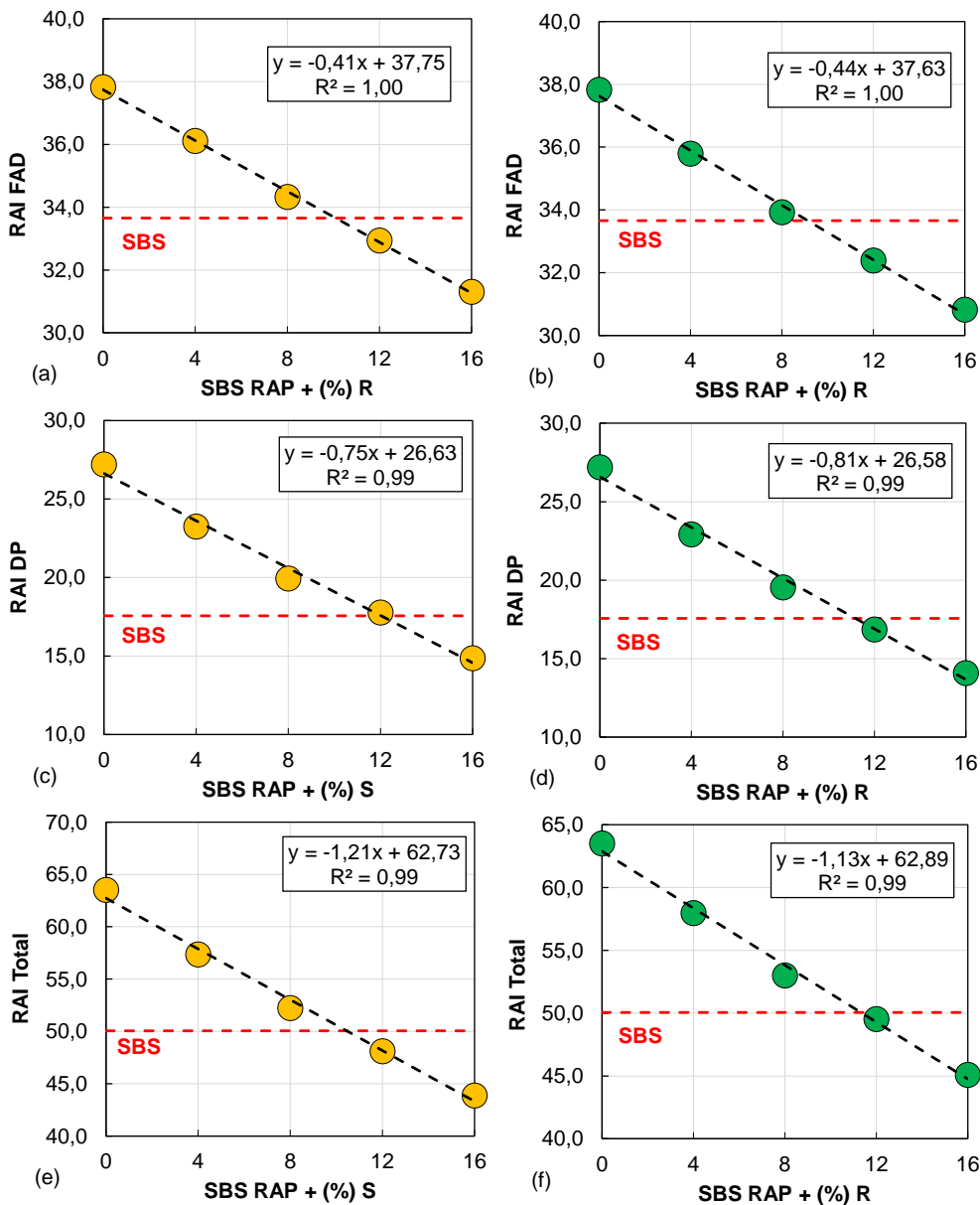
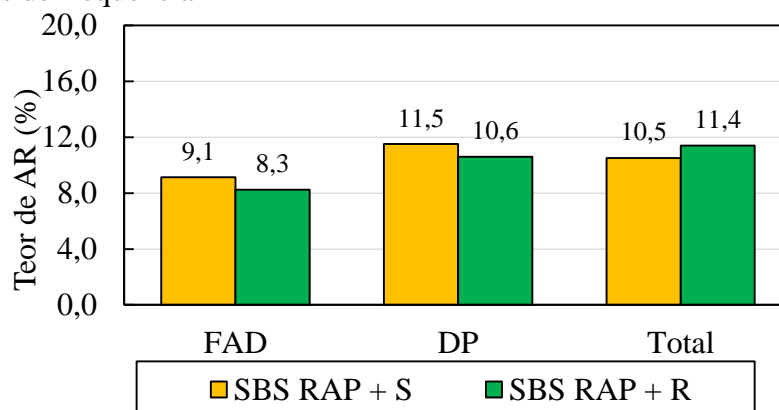


Figura 113 – Teor ótimo do AR S e R para o ligante SBS RAP de acordo com o parâmetro RAI em três domínios de frequência



Os parâmetros do 2S2P1D que modelaram o comportamento LVE dos ligantes rejuvenescidos estão na Tabela 26. Os parâmetros E_0 , k , h , δ e β apresentaram variação baixa ou nula com o aumento da concentração dos ARs. O parâmetro τ descreceu com o aumento do teor de AR com excelente correlação no modelo exponencial, conforme Figura 114, resultando nos teores ótimos da Figura 115.

Tabela 26 – Parâmetros do ajuste 2s2p1d para os ligantes com diferentes tipos e concentrações de agentes rejuvenescedores

Ligantes	2s2p1d parâmetros						
	E_{00}	E_0	K	h	d	t_E	b
Neat	0	7,6E+08	0,23	0,55	1,80	3,5E-06	130
Neat RAP	0	8,8E+08	0,23	0,56	3,60	5,0E-04	600
Neat RAP + 4% S	0	8,2E+08	0,25	0,58	4,00	7,6E-05	320
Neat RAP + 8% S	0	8,2E+08	0,25	0,58	4,00	1,1E-05	350
Neat RAP + 12% S	0	8,2E+08	0,25	0,58	4,00	2,3E-06	350
Neat RAP + 16% S	0	8,2E+08	0,25	0,58	4,00	4,5E-07	350
Neat RAP + 4% R	0	8,0E+08	0,25	0,58	4,00	6,0E-05	320
Neat RAP + 8% R	0	8,2E+08	0,25	0,58	4,00	9,0E-06	350
Neat RAP + 12% R	0	8,2E+08	0,29	0,58	4,00	2,2E-06	300
Neat RAP + 16% R	0	8,2E+08	0,25	0,58	4,00	4,5E-07	350
SBS	5	6,0E+08	0,33	0,80	4,50	3,5E-05	500
SBS RAP	0	8,4E+08	0,28	0,66	7,50	2,0E-03	140
SBS RAP + 4% S	0	8,2E+08	0,28	0,66	6,50	1,5E-04	140
SBS RAP + 8% S	0	8,2E+08	0,28	0,66	6,50	2,0E-05	150
SBS RAP + 12% S	0	8,2E+08	0,25	0,66	6,50	5,0E-06	190
SBS RAP + 16% S	0	8,2E+08	0,28	0,66	6,50	1,2E-06	150
SBS RAP + 4% R	0	7,0E+08	0,31	0,67	6,50	1,7E-04	140
SBS RAP + 8% R	0	7,0E+08	0,31	0,67	6,50	2,2E-05	140
SBS RAP + 12% R	0	8,2E+08	0,28	0,66	6,50	3,0E-06	190
SBS RAP + 16% R	0	8,2E+08	0,28	0,66	6,50	8,0E-07	150

Figura 114 – Gráfico de mistura entre coeficiente τ do modelo 2S2P1D vs ligante Neat RAP (a, b) e SBS RAP (c, d) com diferentes tipos e concentrações de AR S e R

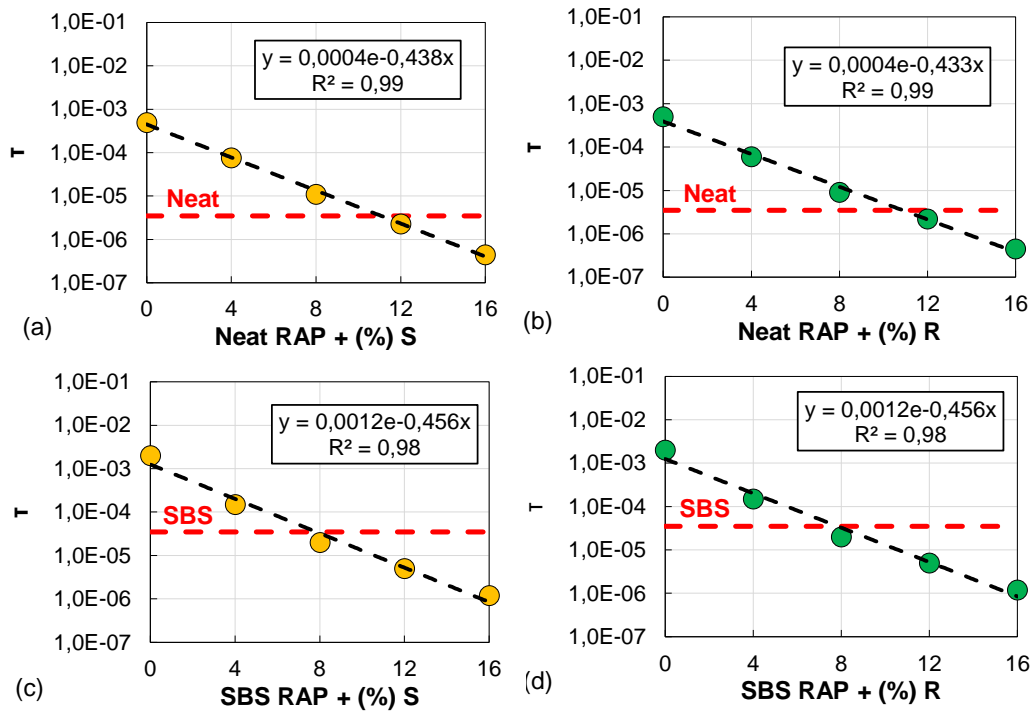
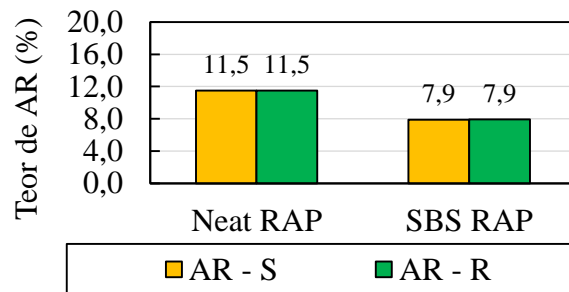


Figura 115 - Teor ótimo do AR S e R para o ligante Neat RAP e SBS RAP de acordo com o coeficiente τ do modelo 2S2P1D



Os diferentes índices reológicos avaliados no processo de envelhecimento também foram abordados na análise do rejuvenescimento. O primeiro parâmetro que analisa as propriedades de rigidez e relaxamento é o G-R, que com o envelhecimento resulta em valores mais elevados e indica uma maior susceptibilidade do material ao trincamento. A Figura 116 e a Figura 119 apresentam os valores de $|G^*|$ vs δ em 15°C e $0,005$ rad/s para os ligantes Neat RAP e SBS RAP, respectivamente, em diferentes tipos e concentrações de AR no diagrama black. A incorporação do AR desloca a relação no sentido da posição dos ligantes virgens, revertendo assim, os efeitos do envelhecimento.

Uma excelente correlação de potência é encontrada no gráfico de mistura entre o parâmetro G-R vs concentração de agente rejuvenecedor, conforme exibido nos gráficos da

Figura 117 e da Figura 120 para os ligantes Neat RAP e SBS RAP, respectivamente. As dosagens ótimas estão apresentadas nas Figura 118 e Figura 121. Apesar do parâmetro ser extraído a 15°C, os valores de $|G^*|$ e δ na frequência indicada extrapola o parâmetro para uma análise em altas temperaturas, ou seja, dentro do domínio da deformação permanente.

Figura 116 – $|G^*|$ e δ do ligante Neat RAP em 15°C e 0,005 rad/s com diferentes concentrações de AR S e R no diagrama black

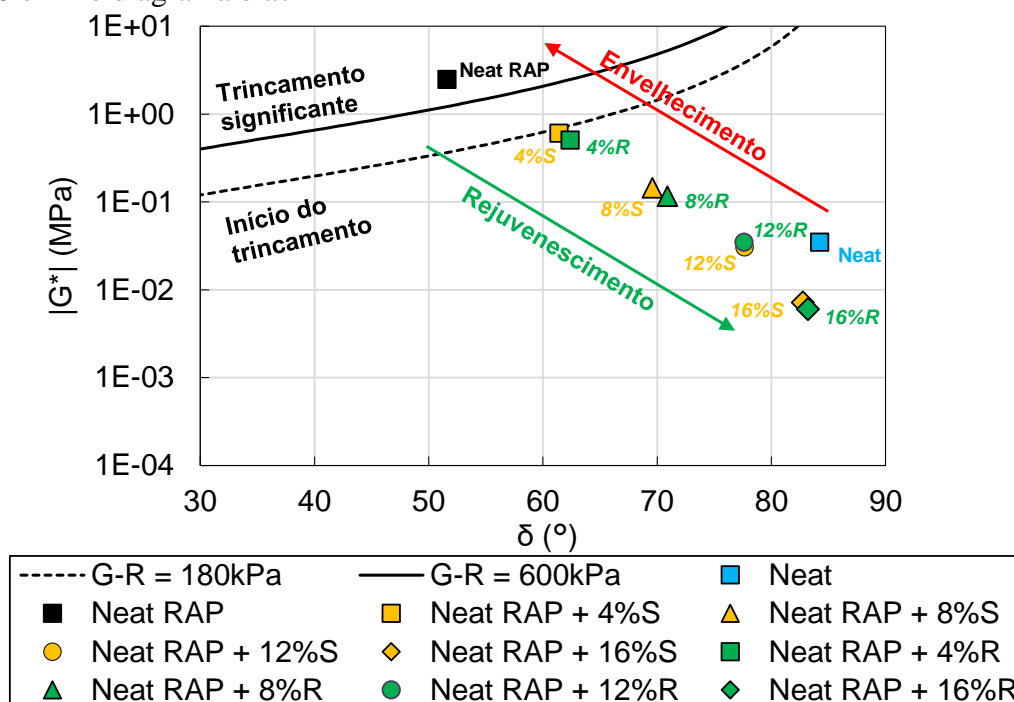


Figura 117 – Gráfico de mistura entre G-R e diferentes concentrações de AR S (a) e R (b) no ligante Neat RAP

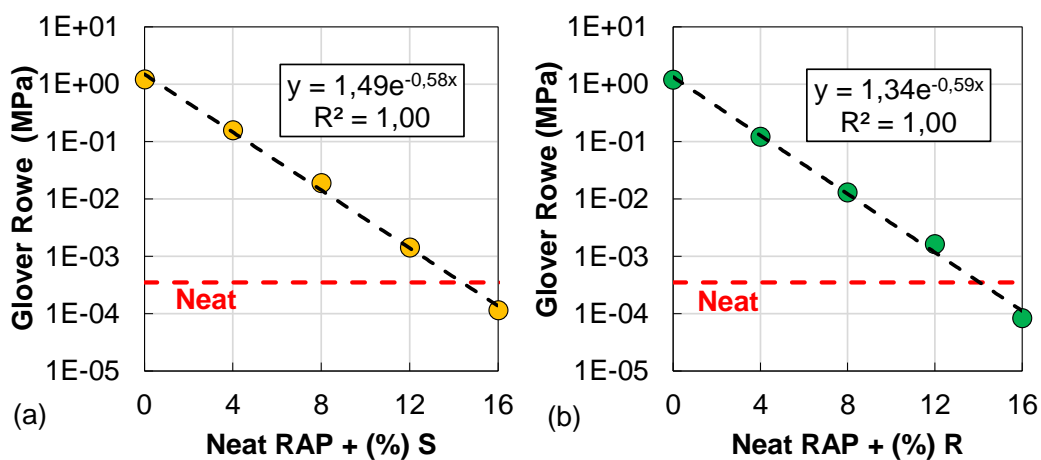


Figura 118 – Teor ótimo do AR S e R para o ligante Neat RAP de acordo com o parâmetro Glover Rowe

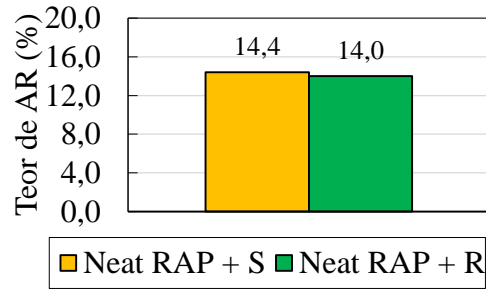


Figura 119 – $|G^*|$ e δ do ligante SBS RAP em 15°C e 0,005 rad/s com diferentes concentrações de AR S e R no diagrama black

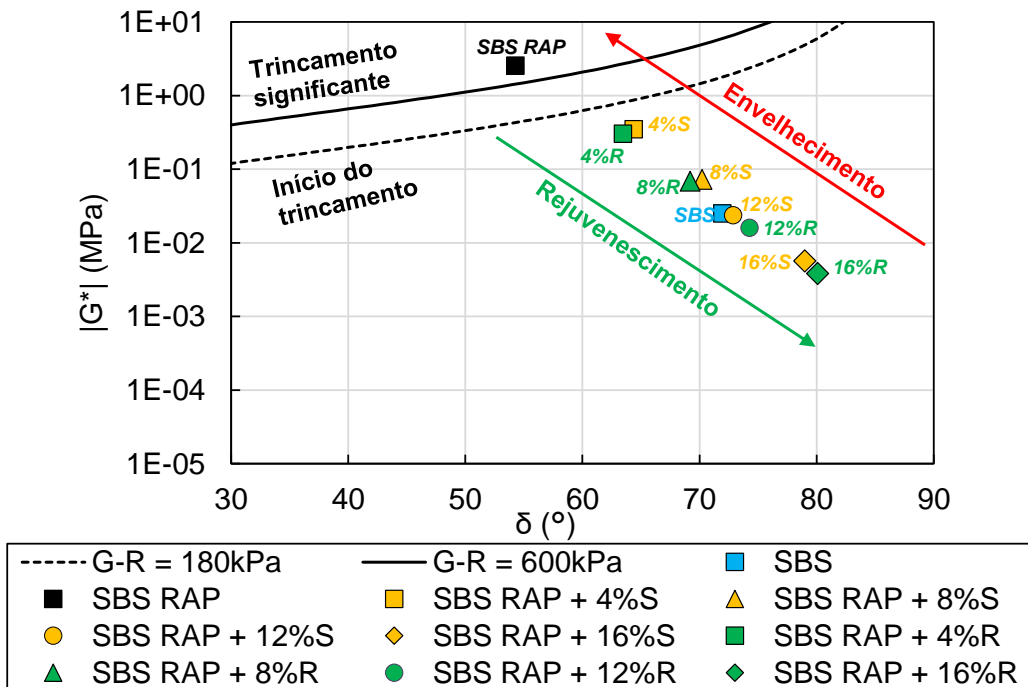


Figura 120 – Gráfico de mistura entre G-R e diferentes concentrações de AR S (a) e R (b) no ligante SBS RAP

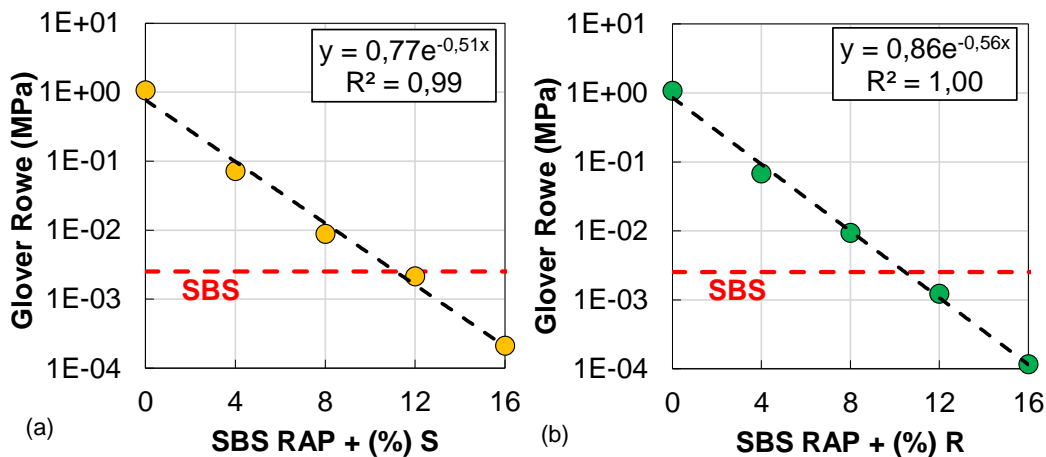
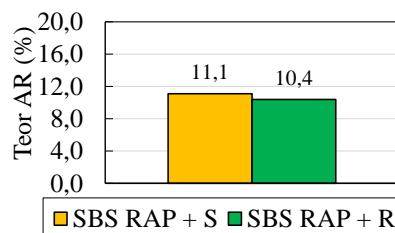


Figura 121 – Teor ótimo do AR S e R para o ligante SBS RAP de acordo com o parâmetro Glover Rowe



O segundo parâmetro avaliado refere-se à frequência de cruzamento ($\delta = 45^\circ$), identificada nas curvas mestras $|G^*|$ e δ , espaço cole cole e diagrama black da Figura 122 para o Neat RAP + R em diferentes concentrações. Tendência semelhante foi exibida pelos demais ligantes com agentes rejuvenescedores. O aumento da concentração de AR desloca o ω_c em direção das altas frequências, revertendo os efeitos do envelhecimento constatados na Figura 75 e na Figura 76. Os gráficos de mistura da Figura 123 para os ligantes Neat RAP (a, b) e SBS RAP (c, d), entre a variável ω_c vs concentração dos agentes R e S, exibiram excelentes correlações em modelo exponencial. Os teores ótimos extraídos dos gráficos de mistura estão na Figura 124.

Figura 122 – Identificação da frequência de cruzamento na curva mestra de $|G^*|$ (a) e δ (b), espaço cole cole (c) e diagrama black (d) para o ligante Neat RAP + R

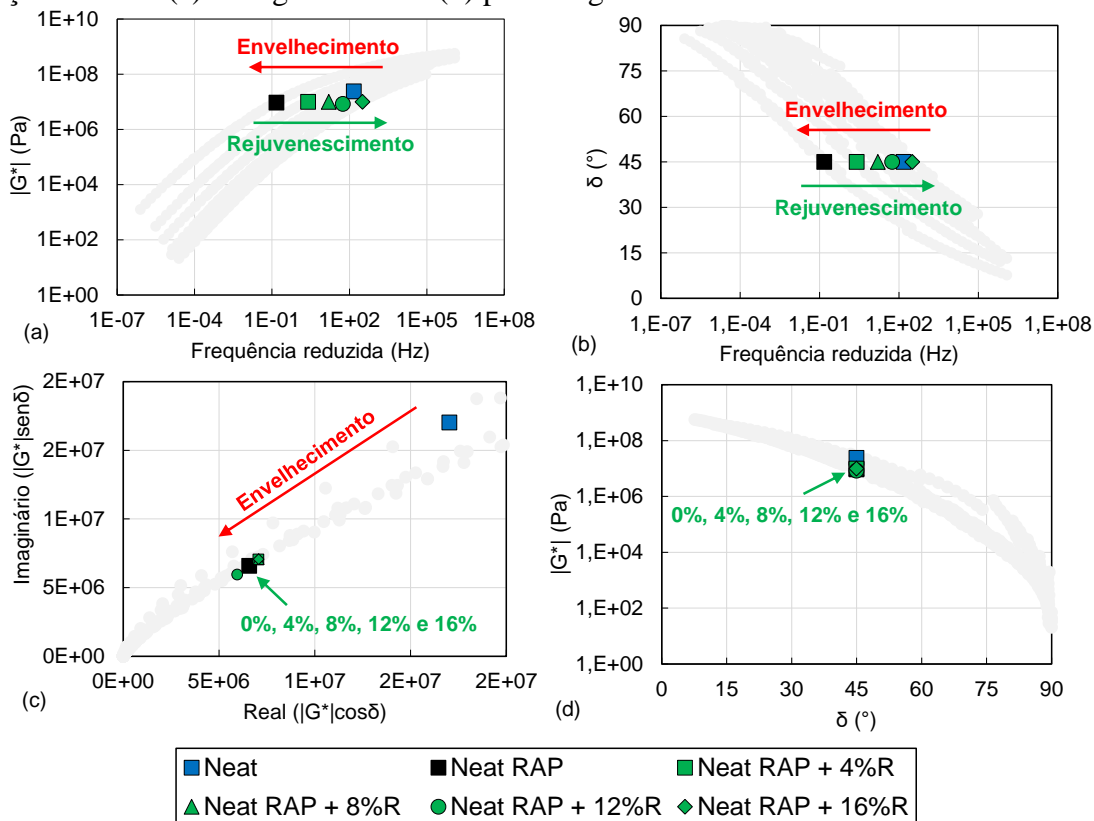


Figura 123 – Gráfico de mistura entre ω_c e diferentes concentrações de AR S e R para os ligantes Neat RAP (a, b) e SBS RAP (c, d)

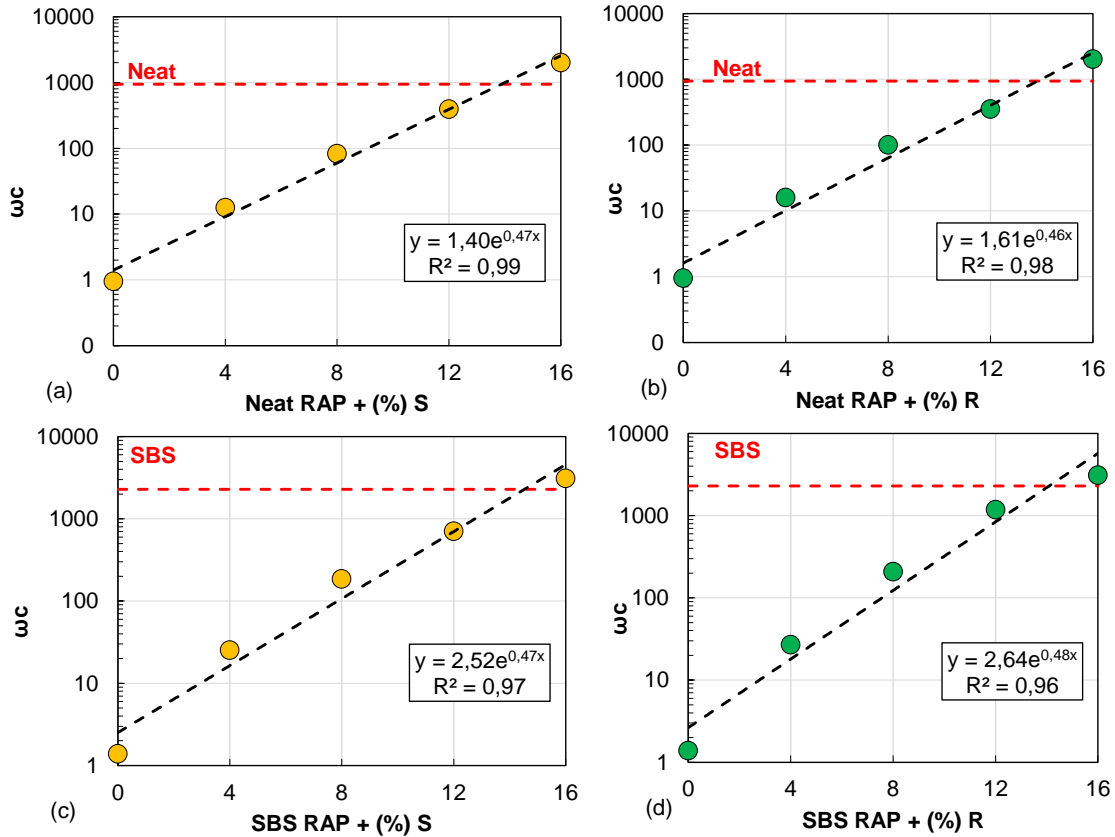
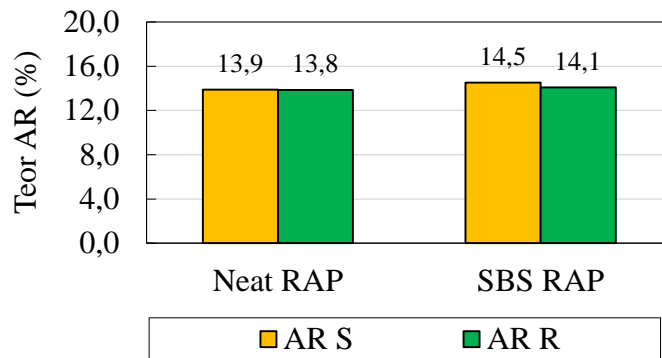


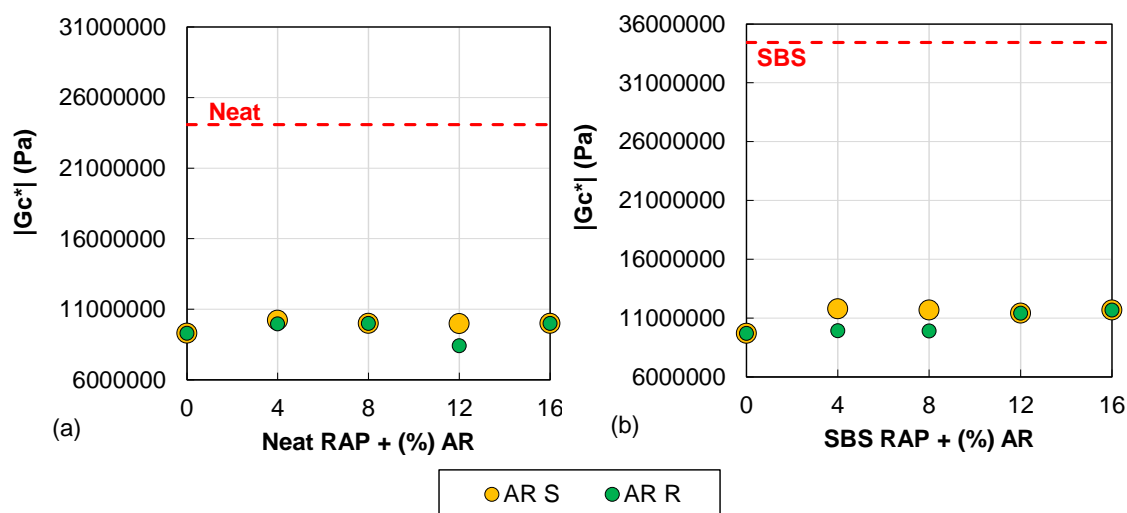
Figura 124 – Teor ótimo do AR S e R para os ligantes Neat RAP e SBS RAP de acordo com o parâmetro ω_c



O módulo de cruzamento $|G_c^*|$, extraído da Figura 122, permanece constante independente da concentração, conforme gráfico de mistura da Figura 125. Assim, os ARs não revertem os efeitos do envelhecimento no $|G_c^*|$. Como $|G_c^*|$ entra no cálculo do Rheological index, esta variável também permanece constante frente a diferentes concentrações do aditivo. Além disso, situação similar acontece para o parâmetro R/ω_c proposto por Farrakhzade, Sabouri

e Tabatabaee (2022) como um indicador potencialmente melhor para avaliação de envelhecimento e a susceptibilidade de trincamento de ligantes.

Figura 125 – Gráfico de mistura entre $|G_c^*|$ e diferentes concentrações de AR S e R para os ligantes Neat RAP (a) e SBS RAP (b)



Com isso, os índices $|G_c^*|$, Rheological index e Rheological index/ ω_c não foram sensíveis quanto ao rejuvenescimento. Assim, todas as análises que envolvam estes três parâmetros não são mais exploradas neste estudo.

O estabelecimento da temperatura de transição entre o comportamento sólido-líquido para os ligantes com ARs, dado pela temperatura de cruzamento ($T_{\delta=45^\circ}$), estão no gráfico de mistura da Figura 126. Assim, ao contrário do efeito do envelhecimento, o rejuvenescimento reestabelece uma menor temperatura para a obtenção da transição sólido-fluído. Os teores ótimos para obtenção da $T_{\delta=45^\circ}$ similar aos ligantes virgens estão na Figura 127.

Figura 126 – Gráfico de mistura entre $T_{\delta=45^\circ}$ vs ligante Neat RAP (a, b) e SBS RAP (c, d) com diferentes tipos e concentrações de AR S e R

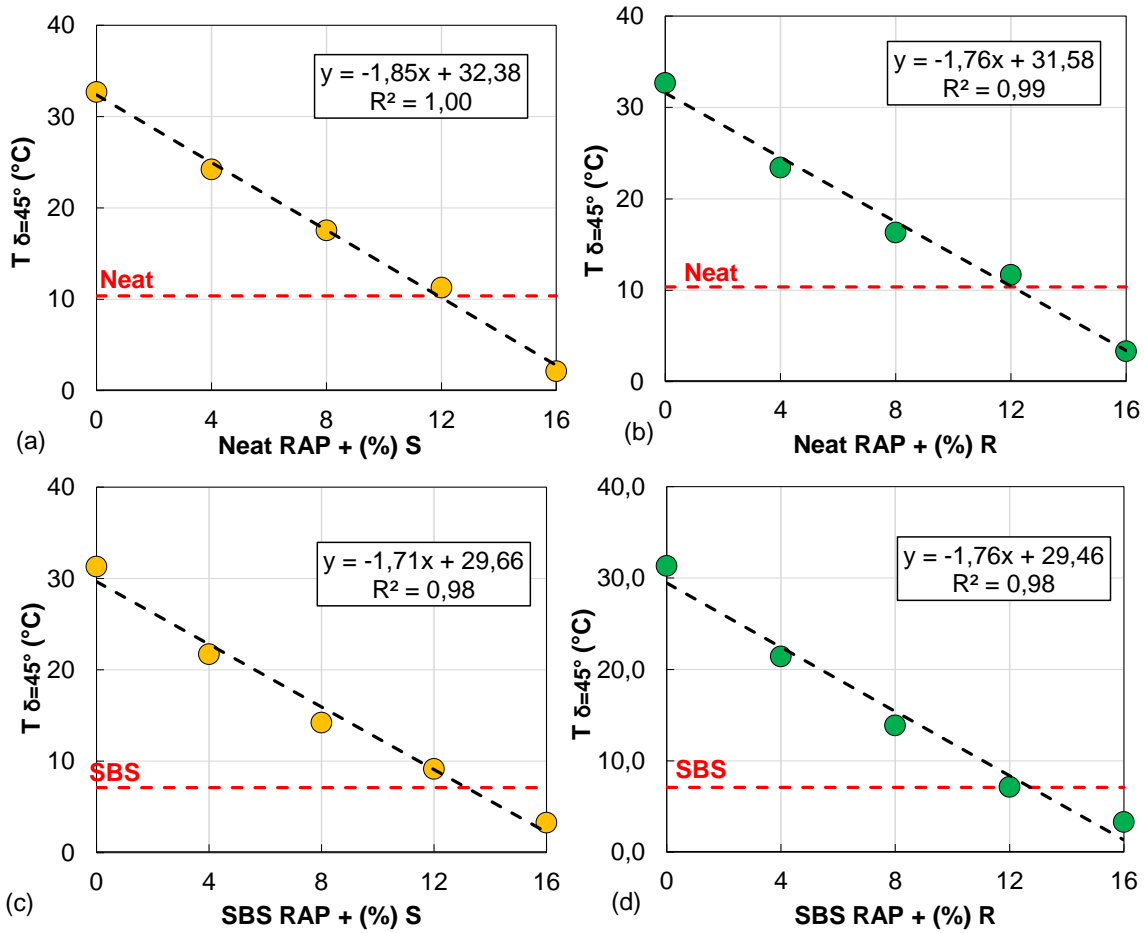
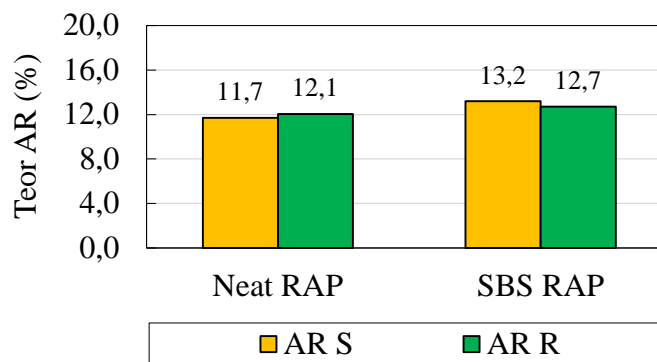


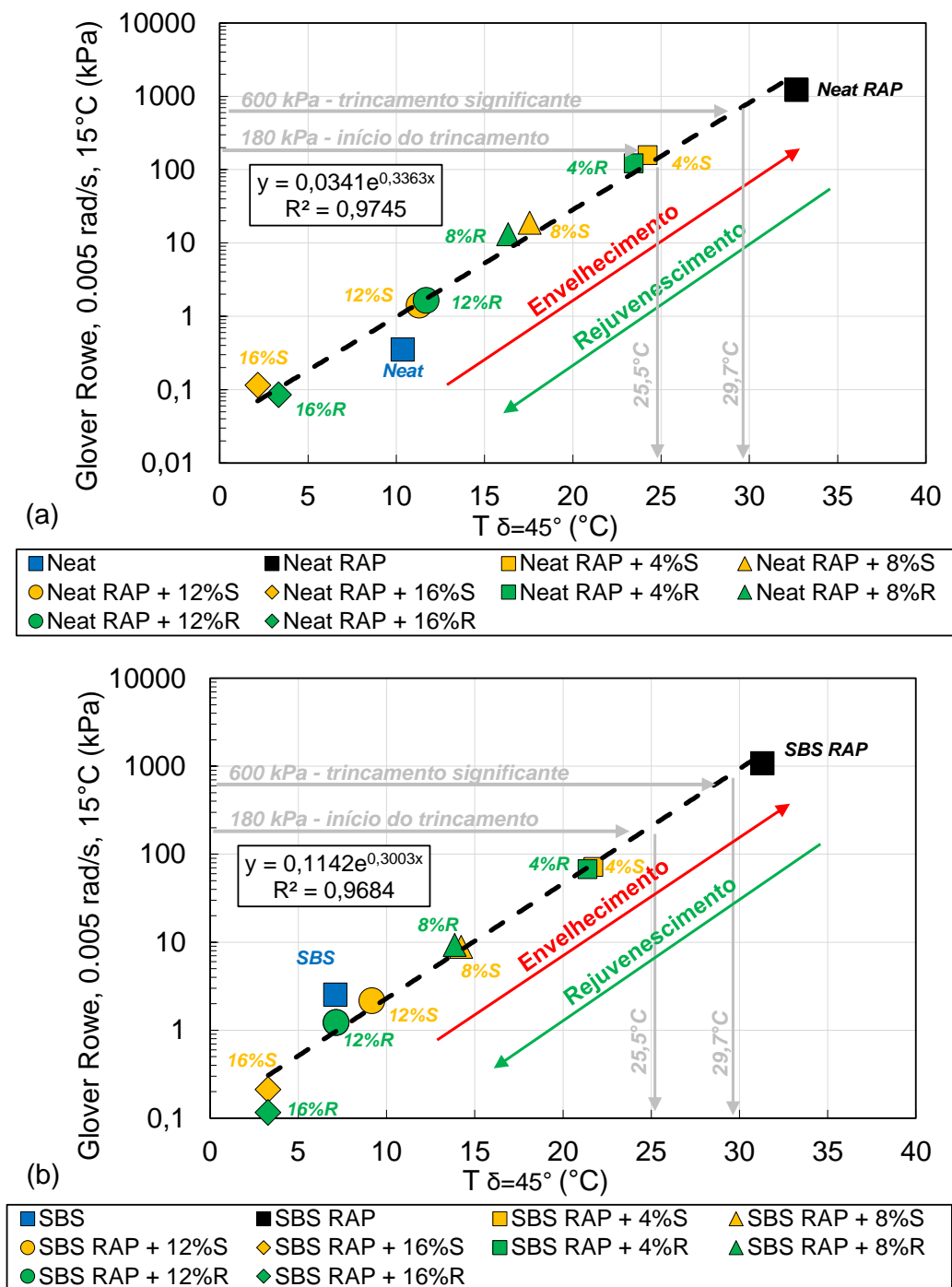
Figura 127 – Teor ótimo do AR S e R para os ligantes Neat RAP e SBS RAP de acordo com o parâmetro $T_{\delta=45^\circ}$



Os limites de performance para $T_{\delta=45^\circ}$ estabelecidos a partir do G-T por Cucalon et al. (2018) estão apresentados na Figura 128 para os ligantes com diferentes concentrações de ARs. Assim como identificado no envelhecimento, uma excelente correlação em modelo exponencial

é exibida pelas duas variáveis, revertendo o efeito do envelhecimento. Os teores ótimos em que os ligantes RAPs atingiram as condições originais estão próximos a 12%.

Figura 128 – G-R vs $T_{\delta=45^\circ}$ dos ligantes Neat RAP (a) e SBS RAP (b) com diferentes concentrações de AR S e R



A Tabela 27 e a Figura 129 apresentam resumidamente os teores ótimos com base em diferentes índices reológicos extraídos da caracterização LVE. Os parâmetros extraídos do

domínio das altas temperaturas, que sofreram maior impacto do envelhecimento, exigem maiores teores para serem reestabelecidos, enquanto que parâmetros determinados nos domínios de intermediária e baixa temperatura, com menor influência do envelhecimento, exigiram menores teores de aditivo.

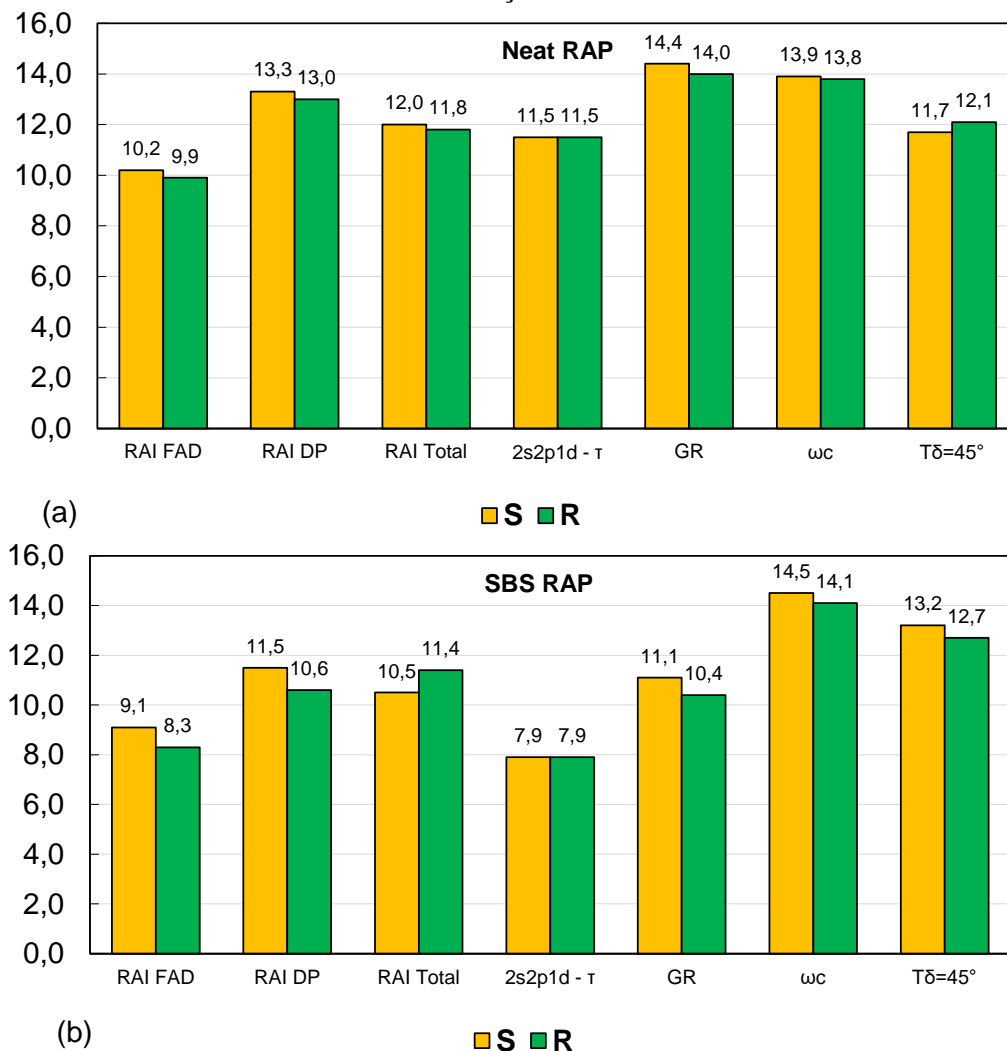
Tabela 27 - Teor ótimo do AR S e R para os ligantes Neat RAP e SBS RAP determinado por diferentes índices extraídos da caracterização LVE

Ligantes	Teor ótimo de AR (%)						
	RAI		2s2P1D		G-R	ω_c	T $\delta=45^\circ$
	FAD	DP	Total	τ			
Neat RAP + S	10,2	13,3	12,0	11,5	14,4	13,9	11,7
Neat RAP + R	9,9	13,0	11,8	11,5	14,0	13,8	12,1
SBS RAP + S	9,1	11,5	10,5	7,9	11,1	14,5	13,2
SBS RAP + R	8,3	10,6	11,4	7,9	10,4	14,1	12,7

No entanto, independente da concentração determinada pelo parâmetro de dosagem, as respostas gerais LVE dos ligantes rejuvenescidos quando submetidos a diferentes temperaturas e frequências de carregamento não são iguais aos ligantes originais. Assim, tem-se um material totalmente novo de propriedades específicas que deve ser avaliado no conjunto total de reologia e principalmente quanto ao desempenho.

Por fim, o Neat RAP exigiu maiores concentrações de ARs em relação ao SBS RAP como resultado do maior nível de envelhecimento. No comparativo entre os tipos de ARs, os teores foram similares, com o agente R em concentração um pouco menor que o agente S. De modo geral, é possível afirmar que os agentes produziram desempenhos similares quanto a análise reológica.

Figura 129 - Teor ótimo do AR S e R para os ligantes Neat RAP (a) e SBS RAP (b) determinado por diferentes índices extraídos da caracterização LVE



4.6.2.3. Performance grade: temperaturas críticas

A Figura 130 e a Figura 131 apresentam o gráfico de mistura entre o PGH_{cont} e diferentes concentrações de AR S e R com os ligantes Neat RAP e SBS RAP, respectivamente, considerando $G^*/\text{sen } \delta$ mínimo de 1kPa para condição original (AASHTO M 332, 2018), e a situação mais desfavorável entre $G^*/\text{sen } \delta$ de 1kPa (original) e de 2,2 kPa (RTFOT) (AASHTO M 320, 2017).

Os gráficos de mistura indicam uma excelente correlação em modelo linear decrescente ($R^2 > 0,99$) entre o PGH contínuo vs concentração de AR, ou seja, o PGH contínuo decresce com o aumento do teor de AR. O AR R exibiu um maior potencial redutor do PGH contínuo pelo maior coeficiente angular em módulo em relação aos ligantes com AR S.

Figura 130 – Gráfico de mistura entre PGH cont. vs diferentes concentrações de AR S e R para os ligantes Neat RAP considerando a condição original (a, b) e entre original e RTFOT (c, d)

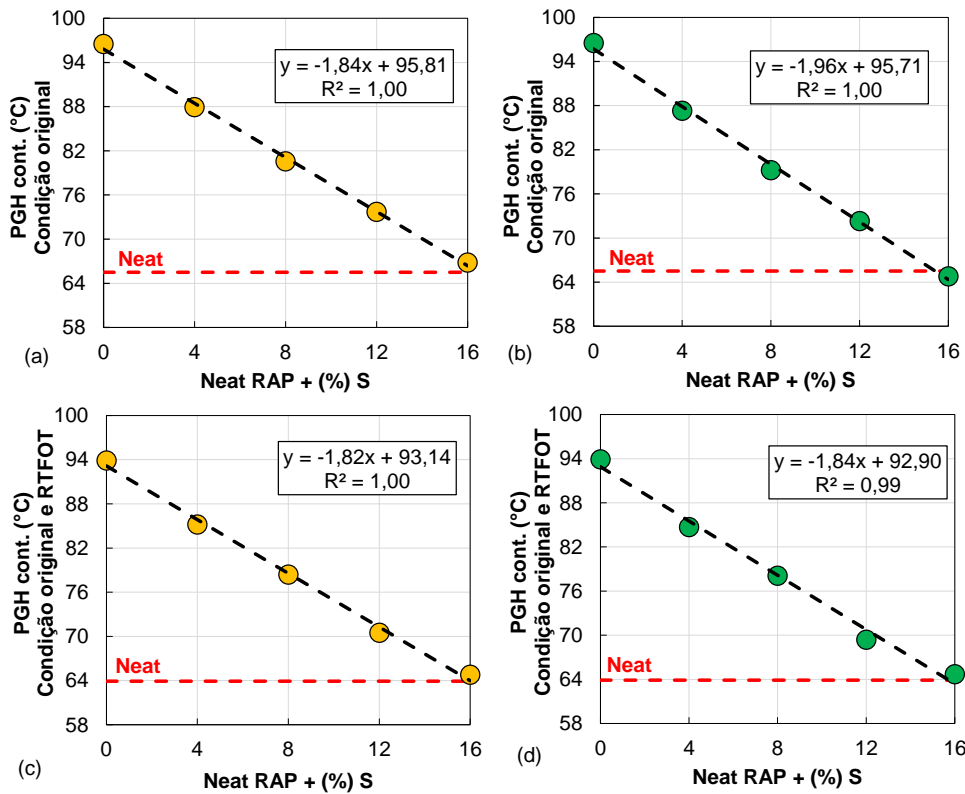
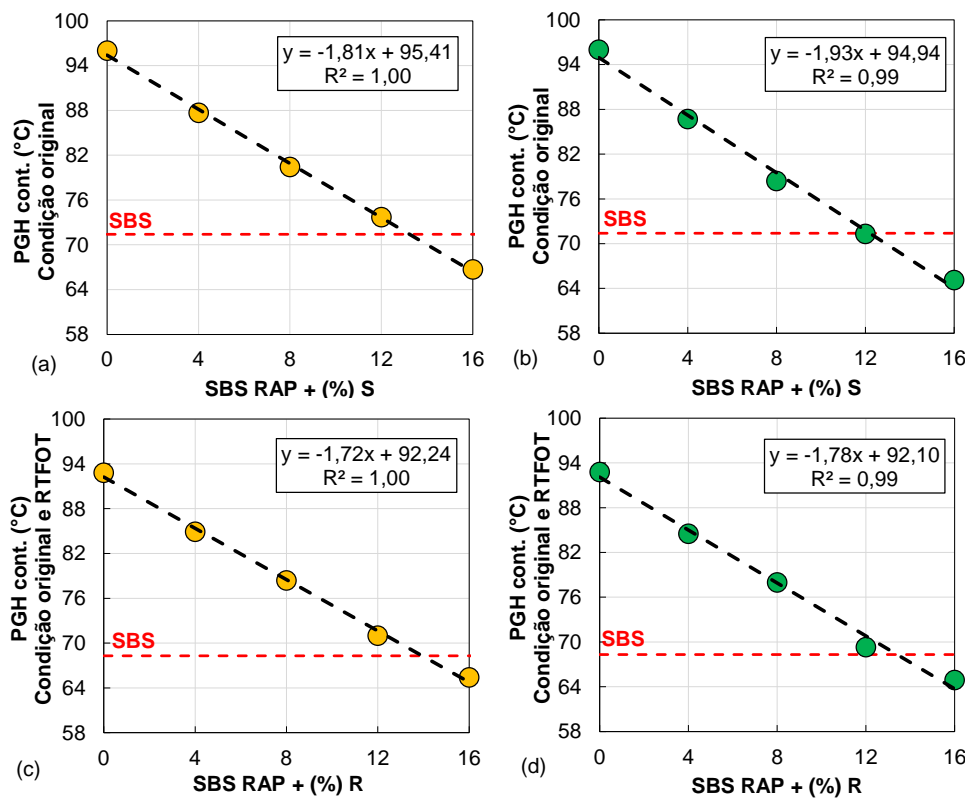
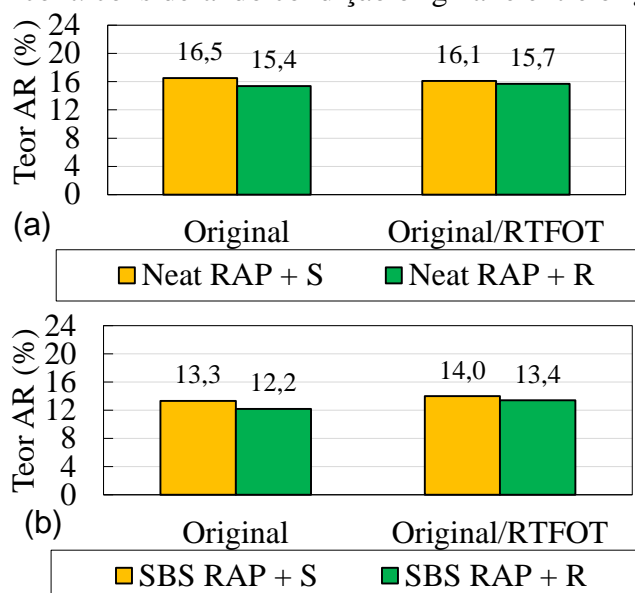


Figura 131 – Gráfico de mistura entre PGH cont. vs diferentes concentrações de AR S e R para os ligantes SBS RAP considerando a condição original (a, b) e entre original e RTFOT (c, d)



Os teores ótimos dos agentes rejuvenescedores a fim de restaurar o grau de desempenho contínuo dos ligantes RAPs ao nível dos seus respectivos ligantes originais estão apresentados na Figura 132. Com a proximidade entre os PGHcont de ambos os ligantes RAPs, e com o PGHcont alvo para o SBS maior em relação ao Neat, um maior teor de AR foi necessário para reestabelecer o PGHcont do ligante Neat RAP em relação ao SBS RAP. Além disso, os teores determinados entre a condição original e a pior situação entre original/RTFOT foram muito similares. Apesar de não ser um dos objetivos do estudo, isso mostra que os agentes rejuvenescedores não são susceptíveis ao envelhecimento de curto prazo.

Figura 132 – Teor ótimo do AR S e R para os ligantes Neat RAP (a) e SBS RAP (b) de acordo com o parâmetro PGH cont. considerando condição original e entre original e RTFOT.



Com relação ao PGI, a Figura 133 apresenta o parâmetro $|G^*|.sen \delta$ dos ligantes Neat RAP (a, b) e SBS RAP (c, d) com diferentes concentrações dos agentes S e R, obtidos no DSR em temperaturas intermediárias. Os valores de $|G^*|.sen \delta$ reduzem linearmente ($R^2 > 0,97$) com o aumento da temperatura. O aumento da concentração dos ARs promove a redução da rigidez e aumento no ângulo de fase dos ligantes RAPs, tornando mais viscosa a natureza dos materiais e resultando no deslocamento curva linear de $|G^*|.sen \delta$ vs temperatura para região inferior do gráfico, ao contrário do obtido com o envelhecimento.

Dessa forma, com o aumento da concentração de AR, o critério para definição da temperatura crítica intermediária (5000 kPa) é obtido em uma menor temperatura, como pode ser identificado na Figura 134. Observa que os teores de 8% para ambos os ARs resultam em Tcrit. Int. similar aos ligantes de referência. Os gráficos de mistura entre Tcrit. int. vs diferentes

concentrações de AR S e R para os ligantes Neat RAP (a, b) e SBS RAP (c, d) estão na Figura 135, no qual é obtido uma excelente correlação em modelo exponencial ($R^2 > 0,98$) entre as variáveis. Os teores ótimos extraídos dessa correlação estão exibidos na Figura 136.

De modo geral, observa-se por meio da inferência da rigidez com o dano por fadiga, que os agentes rejuvenescedores restauraram a vida de fadiga dos ligantes RAP a níveis similares e maiores que os ligantes de referência. Além disso, é verificado que os teores ótimos para os ARs S e R são similares para ambos os materiais RAP, e inferiores aos teores encontrados por meio de índices reológicos da seção anterior, e o próprio PGH.

Diferentemente do identificado em relação ao envelhecimento, que promoveu aumento mais significativo no PHG em relação ao PGI, o processo de rejuvenescimento resulta em redução de intensidade similar tanto na propriedade de alta como na propriedade de temperatura intermediária. Essa constatação foi realizada ao se comparar a relação entre a redução do PGH e PGI pelo teor ótimo médio (entre S e R) dos ARs, resultando na redução em 1,8 a 2,0 °C/% no PGH e de 2,4 °C/% para o PGI.

Figura 133 – Parâmetro $\log(|G^*| \cdot \text{sen } \delta)$ de 15°C a 35°C e 10 rad/s dos ligantes Neat RAP (a, b) e SBS RAP (c, d) com diferentes concentrações dos agentes S e R

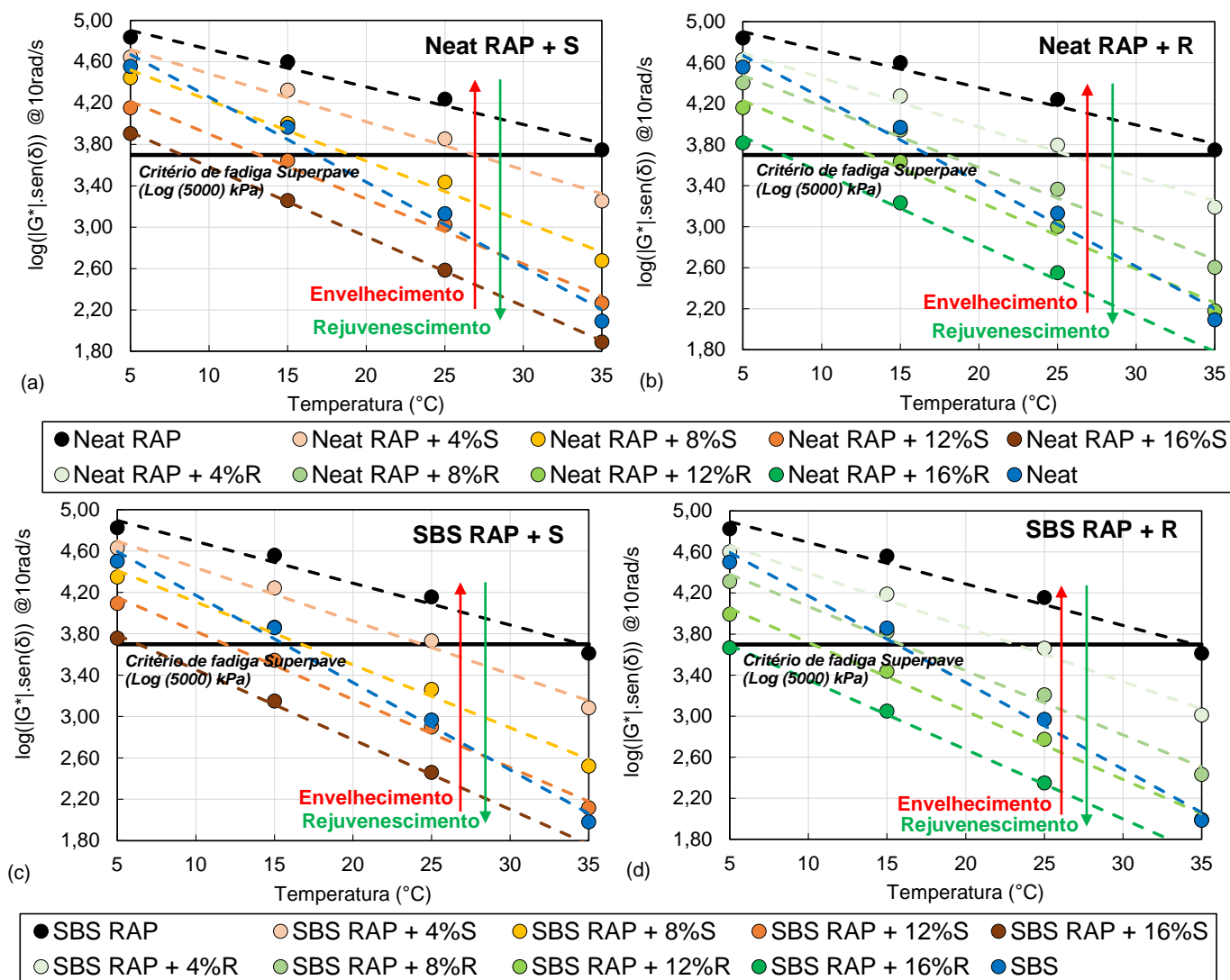


Figura 134 – $T_{crit. int.}$ para os ligantes Neat RAP e SBS RAP com diferentes concentrações de AR S e R

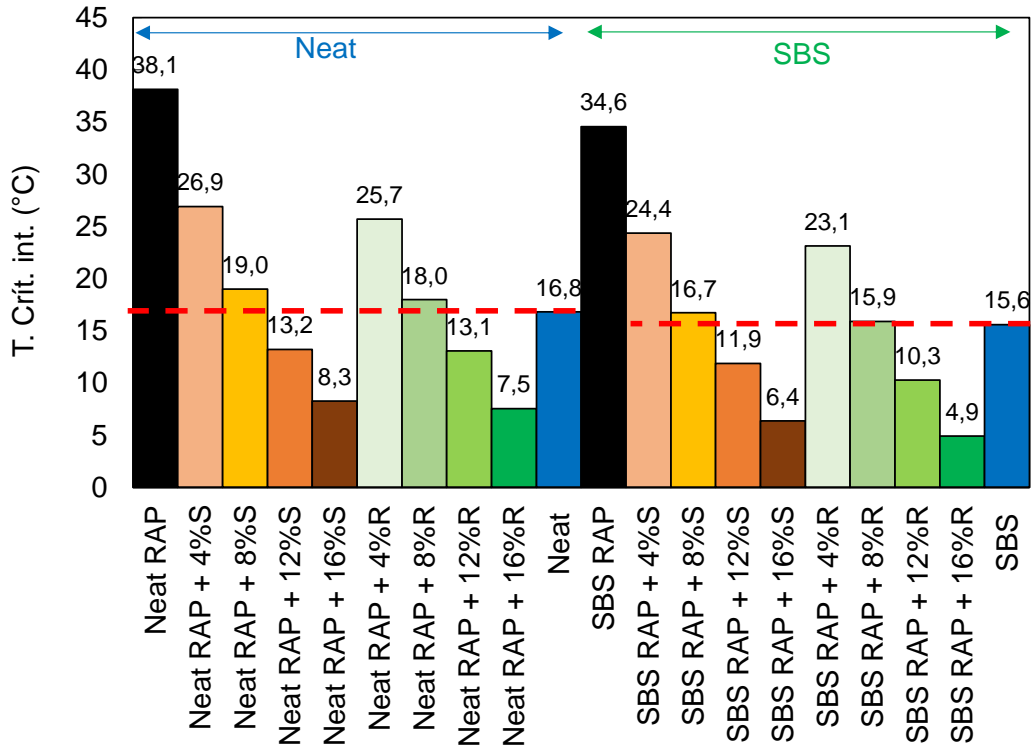


Figura 135 – Gráfico de mistura entre $T_{crit. int.}$ vs diferentes concentrações de AR S e R para os ligantes Neat RAP (a, b) e SBS RAP (c, d)

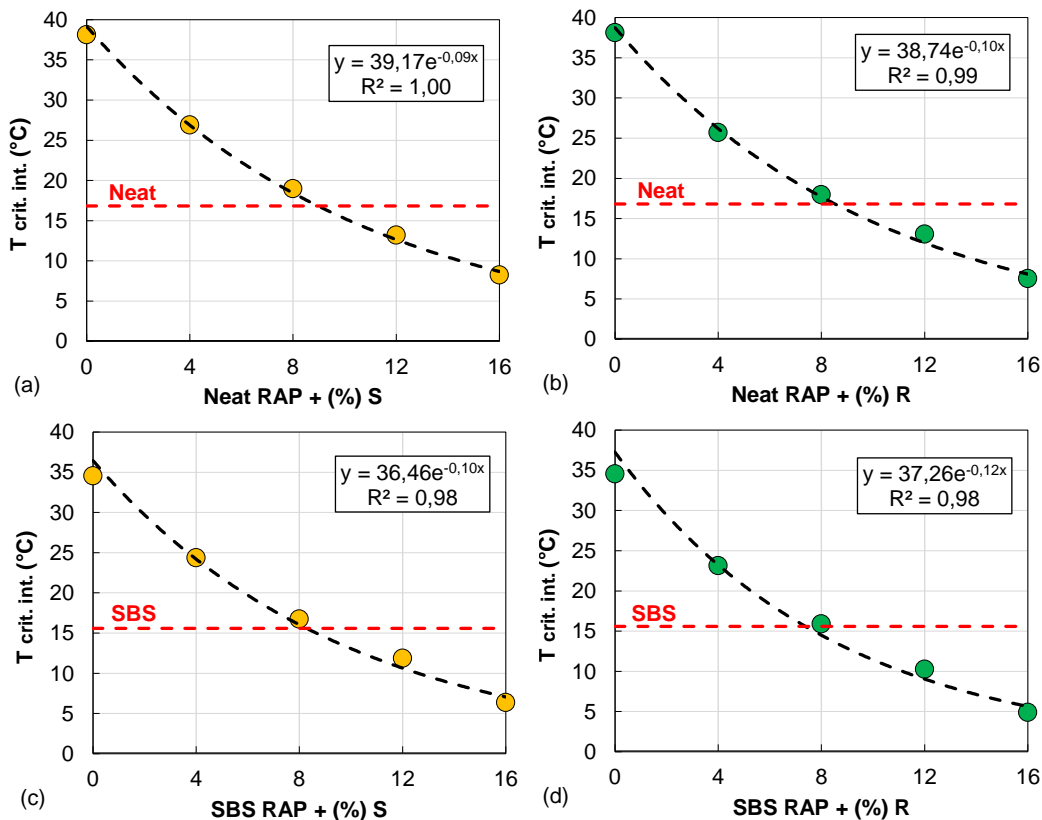
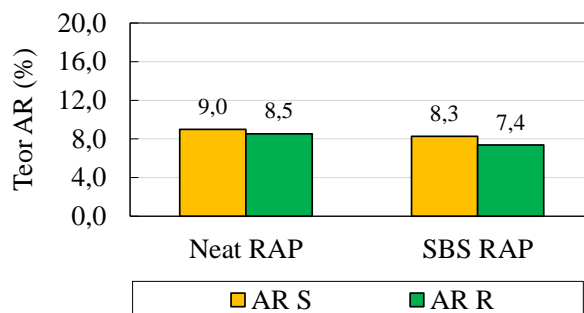


Figura 136 – Teor ótimo do AR S e R para os ligantes Neat RAP e SBS RAP de acordo com o parâmetro $T_{crit. int.}$



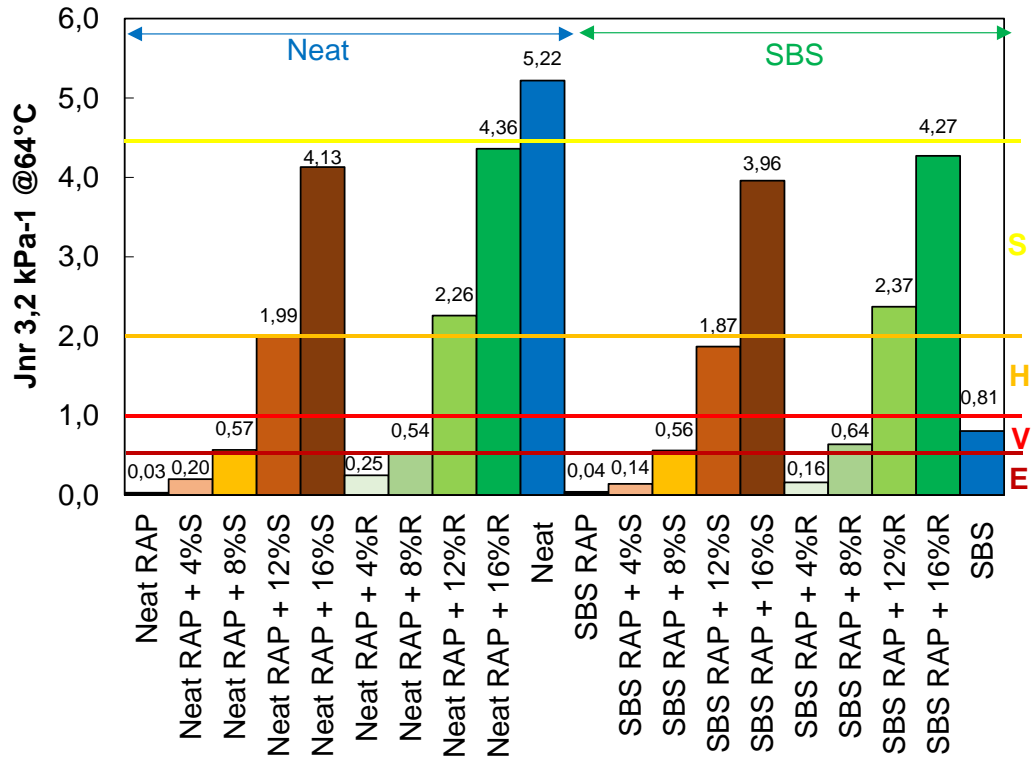
4.6.2.4. Multiple Stress Creep and Recovery:

A performance à deformação permanente dos ligantes rejuvenescidos foi avaliada com base nos resultados do teste de MSCR conduzido a 64°C. Os resultados da compliância não recuperável em 3,2 kPa para ambos os ligantes RAPs com diferentes concentrações dos agentes S e R estão apresentados na Figura 137, juntamente com os limites de classificação quanto ao tráfego. Os resultados demonstram um aumento do Jnr com a maior concentração dos agentes rejuvenescedores, ou seja, os ligantes perdem a capacidade de retornar a sua condição original quando submetido à deformação cisalhante (maior deformação não recuperável), indicando redução da tolerância do material à deformação permanente.

Para o ligante Neat RAP, o Jnr 3,2 kPa é inferior ao ligante controle Neat mesmo com uma concentração de 16%. Resultado similar é identificado para o ligante SBS RAP até 8% em relação ao ligante controle SBS. Neste caso, o Jnr alvo corresponde a um tráfego V, enquanto para o ligante sem modificação, o tráfego alvo é S.

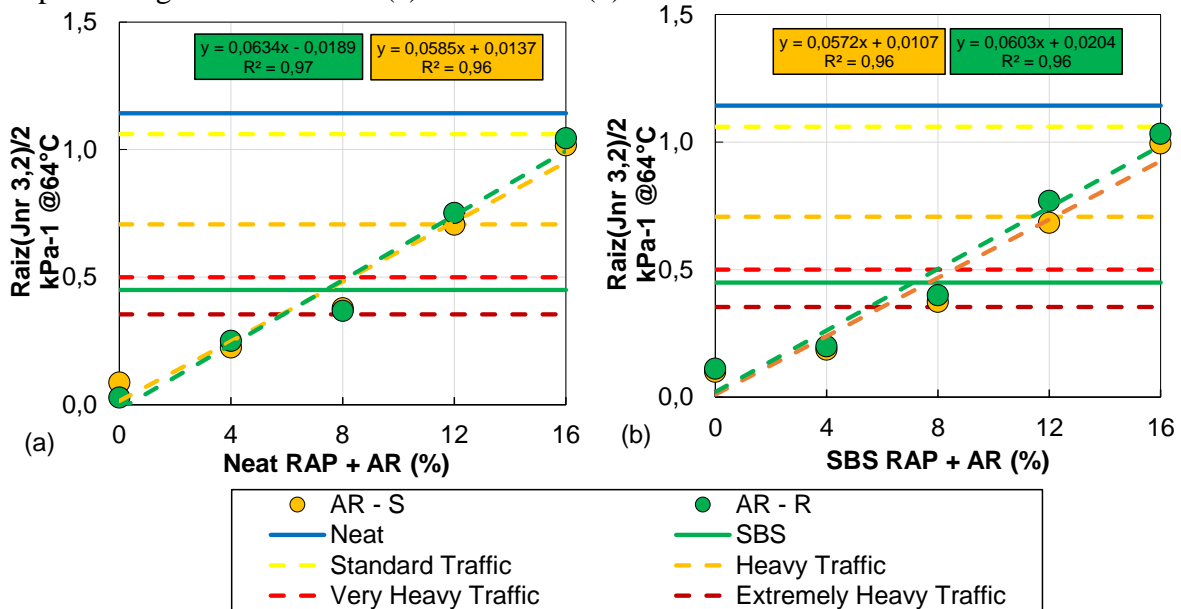
Os gráficos de mistura entre Jnr 3,2 kPa a 64°C. vs diferentes concentrações de AR S e R para os ligantes Neat RAP (a) e SBS RAP (b) estão exibidos na Figura 138. Os dados experimentais de Jnr vs teor apresentam excelente correlação polinomial de segunda ordem ($R > 0,99$). No entanto, devido à dificuldade para determinação dos teores ótimos a partir de modelo dessa natureza, uma transformação da variável Jnr foi realizada a fim de obter-se a linearização da função, resultando também em uma excelente correlação. É possível verificar que ambos os ligantes RAPs apresentam resposta similar em relação a adição dos diferentes tipos de agentes rejuvenescedores.

Figura 137 – Jnr 3,2 kPa em 64°C para os ligantes Neat RAP e SBS RAP com diferentes concentrações de AR S e R



Nota: S: Standard traffic; H: Heavy traffic; V: Very Heavy traffic; E: Extremely Heavy Traffic.

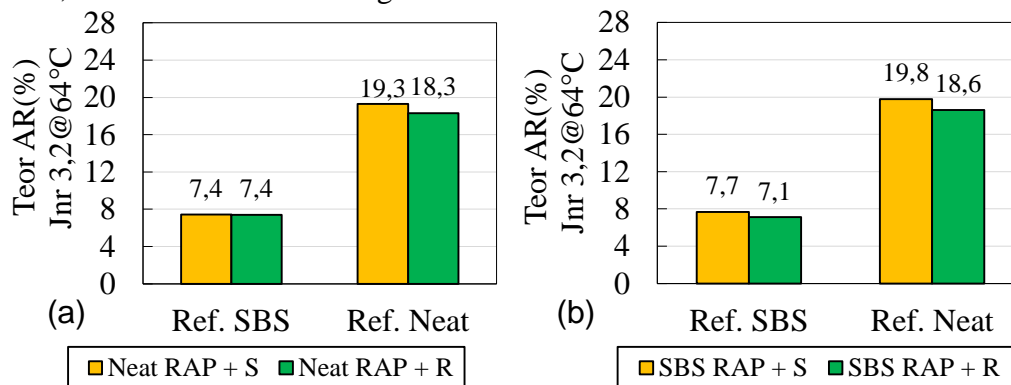
Figura 138 – Gráfico de mistura entre Jnr 3,2 kPa à 64°C. vs diferentes concentrações de AR S e R para os ligantes Neat RAP (a) e SBS RAP (b)



Além disso, os ligantes RAPs exibem classificação de tráfego E até próximo ao teor de 8%, próximo ao tráfego H até 12% e S até 16%, considerando uma região com PGH de 64°C. Para determinação do teor ótimo com base no Jnr, duas simulações foram testadas: para cada

ligante RAP foi obtido o teor para restaurar o Jnr 3.2 kPa tomando como base os Jnrs alvos dos ligantes Neat e SBS. Os resultados estão apresentados na Figura 139. A partir dos resultados, verifica-se que adotando como alvo o Jnr do ligante controle Neat, o teor ótimo é superior ao dobro do teor quando se utiliza o Jnr do ligante controle SBS.

Figura 139 – Teor ótimo do AR S e R para os ligantes Neat RAP (a) e SBS RAP (b) de acordo com o Jnr 3,2 kPa à 64°C alvo dos ligantes Neat e SBS



De modo geral, os agentes rejuvenescedores reverteram os efeitos do envelhecimento nos ligantes asfálticos. No entanto, reverter os efeitos do envelhecimento em termos de deformação permanente é tornar os materiais asfálticos mais susceptíveis ao mecanismo de danificação. Na seção 5.6.3, os resultados de *Flow Number* em misturas asfálticas evidenciam que mesmo com o maior teor de 16%, as misturas apresentaram boa resistência à deformação permanente. Maiores detalhes são fornecidos naquela seção.

4.6.2.5. Linear Amplitude Sweep Test

Os resultados do teste LAS conduzidos conforme 4.5.4.2 em ligantes Neat RAP e SBS RAP com diferentes concentrações dos agentes S e R estão apresentados e discutidos nesta seção. Assim, foram avaliados os efeitos do rejuvenescimento por meio da análise de diferentes definições de falha, critérios de ruptura e equações para previsão de desempenho. Além disso, foram construídos os gráficos de mistura com os diferentes parâmetros de fadiga.

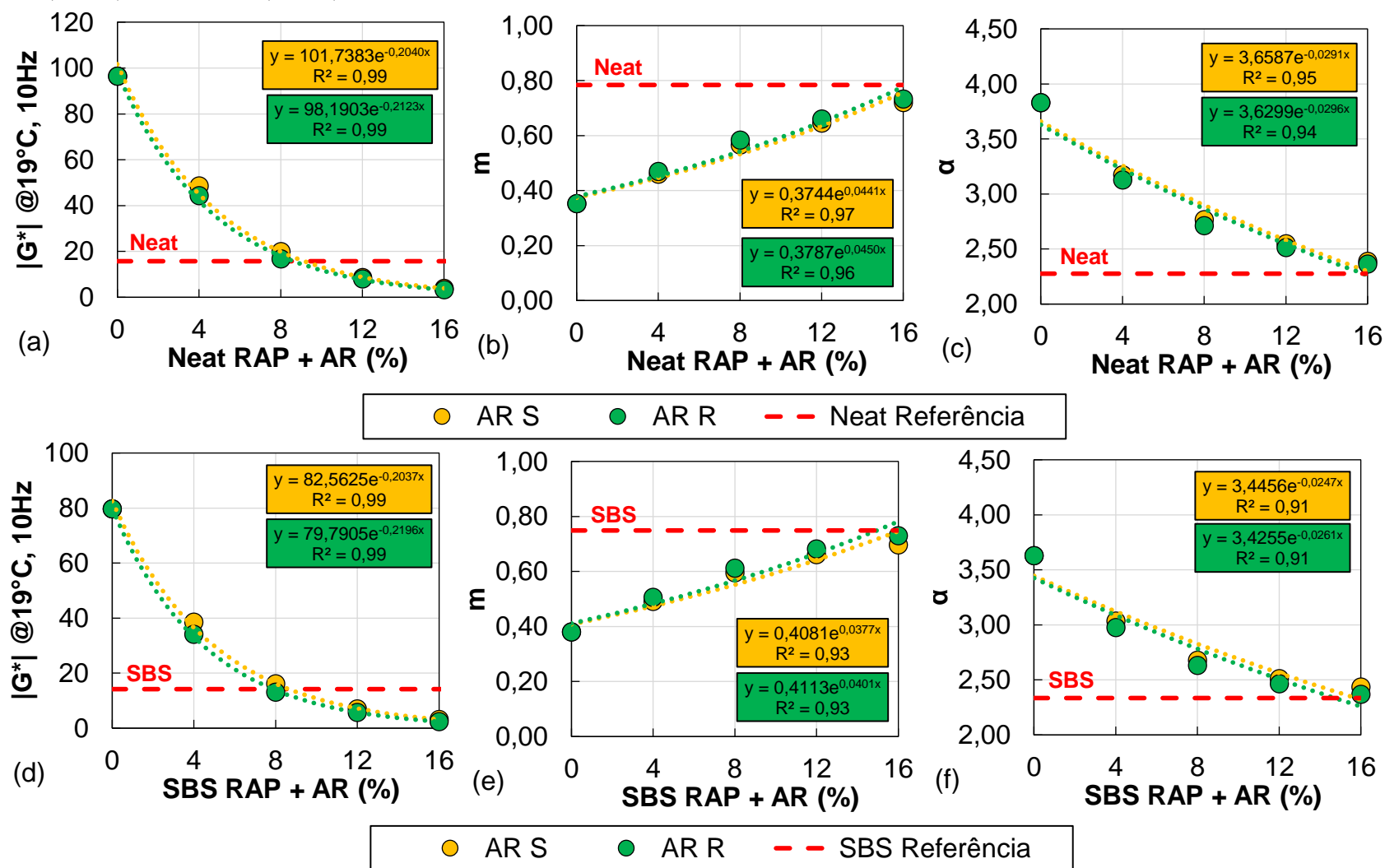
A Tabela 28 apresenta os parâmetros de caracterização LVE provenientes da primeira etapa do teste. Os DMRs ficaram no intervalo entre 0,95 e 1,05. Os gráficos de mistura de $|G^*|$ a 19°C e 10 Hz, m e α vs diferentes concentrações de S e R estão exibidos na Figura 140 com excelentes correlações em modelo exponencial ($R^2 > 0,91$). Os agentes rejuvenescedores

reverteram os efeitos do envelhecimento nas propriedades LVE do teste LAS, resultando na redução de $|G^*|$ e α , com aumento de m .

Tabela 28 - Dados de caracterização LVE do ligantes obtidos a partir do teste LAS para os ligantes Neat RAP e SBS RAP com diferentes concentrações de AR S e R

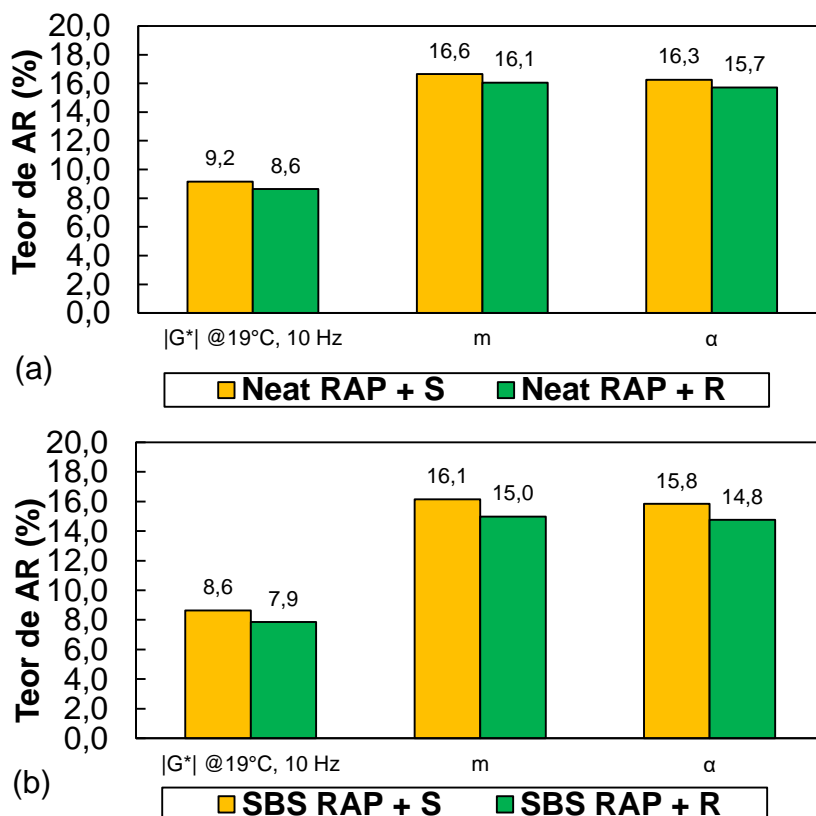
Ligantes	Caracterização LVE		
	$ G^* $ @19°C, 10 Hz	α	m
Neat RAP	96,48	3,83	0,35
Neat RAP + 4%S	48,55	3,17	0,46
Neat RAP + 8%S	19,89	2,77	0,57
Neat RAP + 12%S	8,64	2,55	0,65
Neat RAP + 16%S	3,86	2,39	0,72
Neat RAP + 4%R	44,31	3,13	0,47
Neat RAP + 8%R	16,77	2,71	0,58
Neat RAP + 12%R	8,06	2,51	0,66
Neat RAP + 16%R	3,24	2,36	0,73
Neat	15,70	2,28	0,78
SBS RAP	79,79	3,63	0,38
SBS RAP + 4%S	38,63	3,04	0,49
SBS RAP + 8%S	16,13	2,68	0,60
SBS RAP + 12%S	7,00	2,51	0,66
SBS RAP + 16%S	3,19	2,44	0,70
SBS RAP + 4%R	34,19	2,98	0,51
SBS RAP + 8%R	13,17	2,63	0,61
SBS RAP + 12%R	5,71	2,47	0,68
SBS RAP + 16%R	2,42	2,37	0,73
SBS	14,20	2,33	0,75

Figura 140 – Gráfico de mistura entre dados de caracterização LVE obtidos no teste LAS vs diferentes concentrações de AR S e R com os ligantes Neat RAP (a, b, c) e SBS RAP (a, b, c)



A Figura 141 exibe os teores ótimos extraídos dos gráficos de mistura. Verifica-se que a dosagem para restaurar m e α é aproximadamente o dobro de $|G^*|$, o que pode ser explicado pelas Figura 108 e Figura 109. As propriedades de relaxação (m e α) exigem teores mais elevados em relação a propriedade de rigidez ($|G^*|$).

Figura 141 – Teor ótimo do AR S e R para os ligantes Neat RAP (a) e SBS RAP (b) com base nos dados de caracterização LVE do teste LAS



4.6.2.5.1. Definições de falha

Os resultados do ciclo de falha pelas seis definições investigadas estão apresentadas na Figura 142 e na Figura 143 para o ligante Neat RAP + AR, e na Figura 144 e Figura 145 para o ligante SBS RAP + AR. Os gráficos de mistura entre N_f (@CSR 0,001) por diferentes definições de falha vs concentração de agente rejuvenescedor estão exibidos na Figura 146 (Neat RAP + AR) e na Figura 147 (SBS RAP + AR). Por fim, na Figura 148 e na Figura 149 estão os teores ótimos extraídos dos gráficos de mistura nos três CSRs para os ligantes Neat RAP e SBS RAP, respectivamente.

A partir dos dados, a presença e a concentração do agente rejuvenescedor no ligante asfáltico resulta nas seguintes respostas com relação ao ciclo de falha (N_f):

- a) De modo geral, uma excelente correlação ($R^2 > 0,92$) em modelo linear crescente foi identificada entre o ciclo de falha vs concentração de agente rejuvenescedor independente da definição de falha;
- b) Ganho na vida de fadiga dos materiais com o aumento da concentração dos agentes rejuvenescedores independente do CSR, tipo de ligante e definição de falha, revertendo os efeitos identificados no envelhecimento que foi a redução da vida de fadiga;
- c) Teores acima da dosagem alvo resultaram em maior vida de fadiga que os ligantes de referência;
- d) O agente R apresenta desempenho levemente superior em relação ao agente S em recuperar a vida de fadiga dos materiais asfálticos, como resultado do menor teor encontrado;
- e) O perfil de carregamento no LAS resultou em diferentes teores ótimos. Não se identifica uma tendência direta com relação ao CSR e o teor ótimo nas diferentes definições. No entanto, de modo geral, as definições do C.N e C².N.(1-C) resultaram em teores ótimos similares, exibindo uma independência quanto ao perfil de carregamento.

Figura 142 – Análise das definições de falha de (a) queda de 50% |G*|, (b) queda de 35% C, (c) pico de C.N para o ligante Neat RAP com diferentes concentrações de AR S e R e CSRs

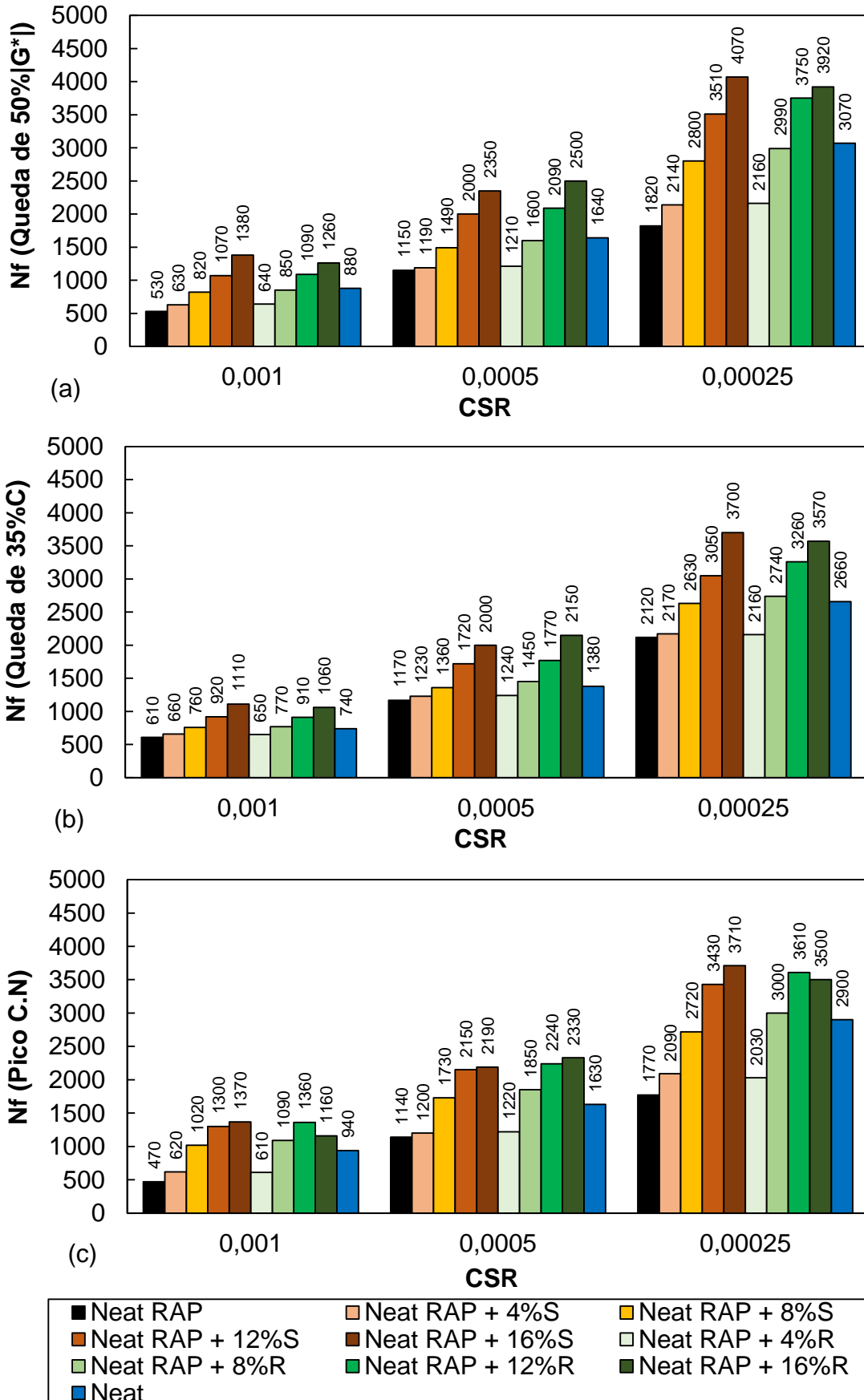


Figura 143 – Análise das definições de falha de (a) pico do Wsr, (b) pico do δ , e (c) pico do C².N.(1-C) para o ligante Neat RAP com diferentes concentrações de AR S e R e CSRs

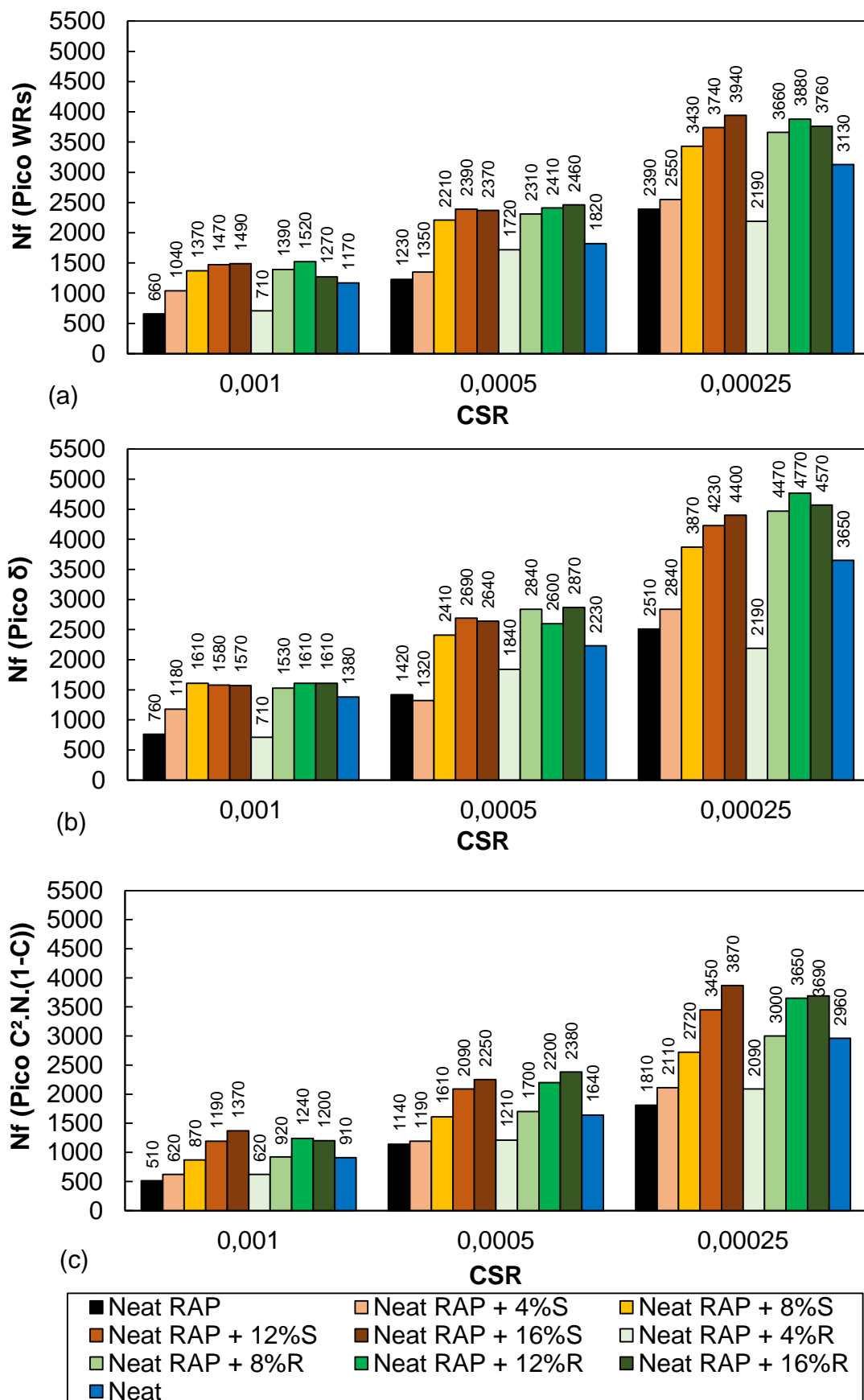


Figura 144 – Análise das definições de falha de (a) queda de 50% |G*|, (b) queda de 35% C, (c) pico de C.N para o ligante SBS RAP com diferentes concentrações de AR S e R e CSRs

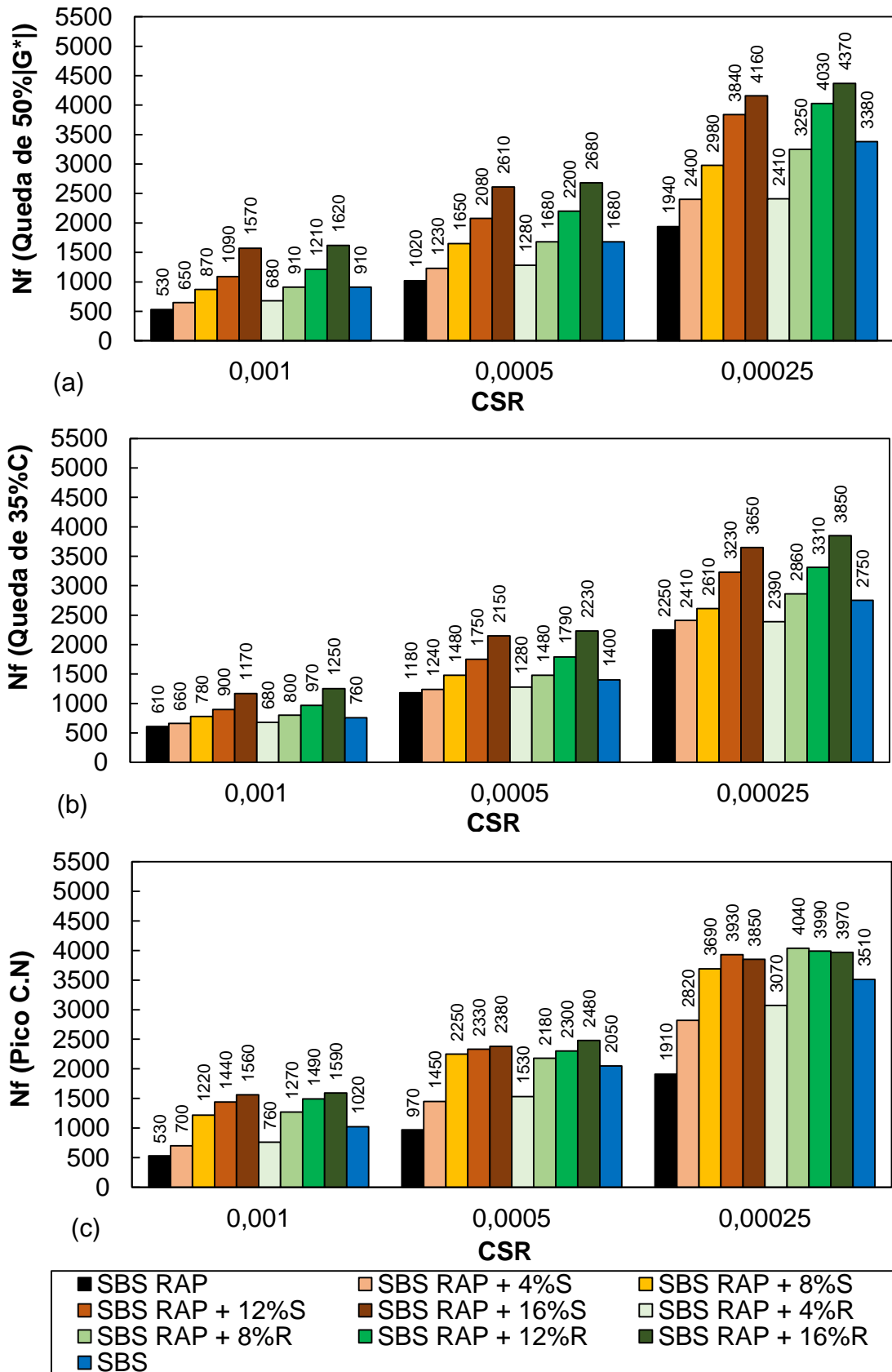


Figura 145 – Análise das definições de falha de (a) pico do Wsr, (b) pico do δ , e (c) pico do $C^2.N.(1-C)$ para o ligante SBS RAP com diferentes concentrações de AR S e R e CSRs

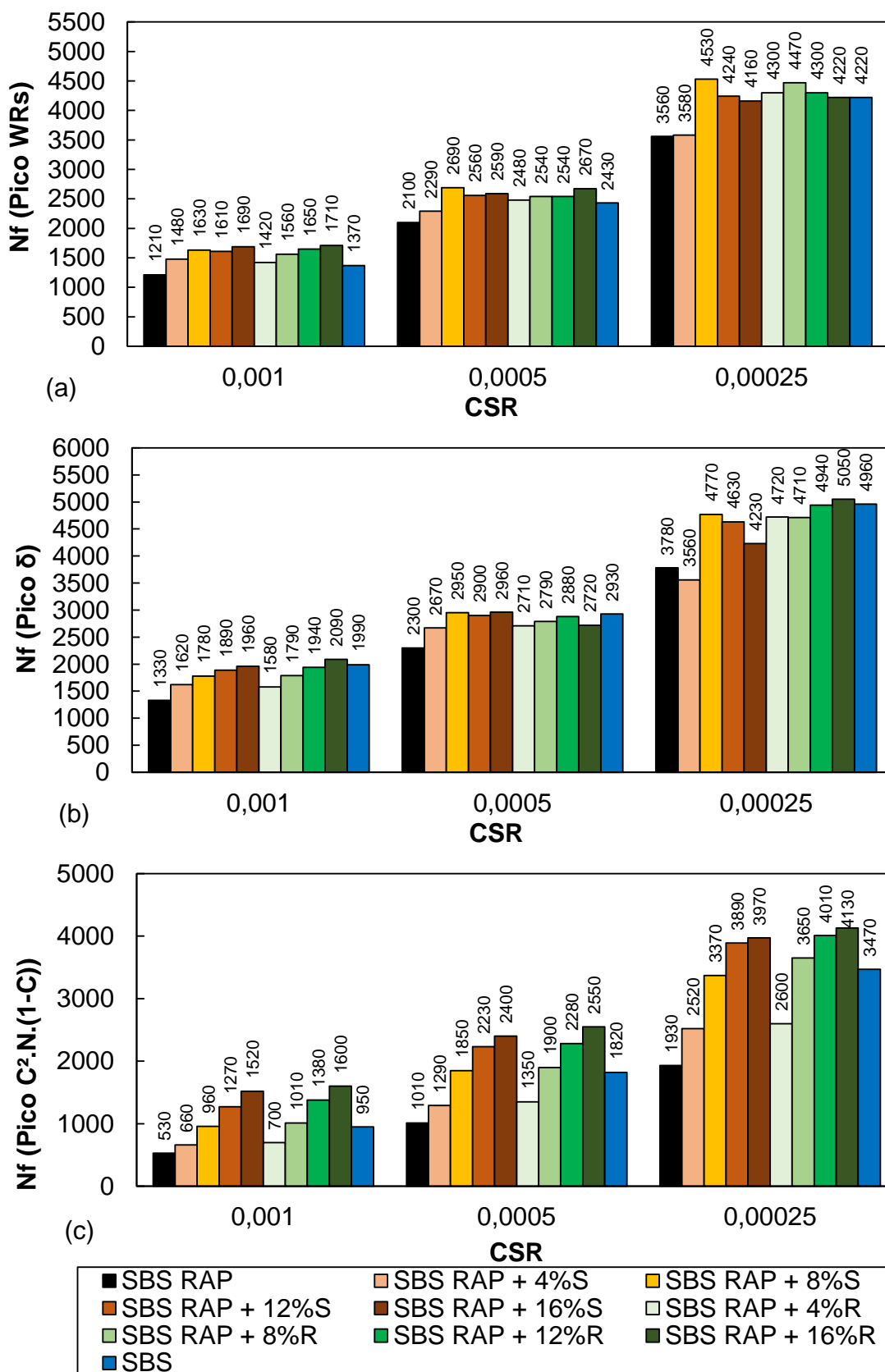


Figura 146 – Gráfico de mistura entre definições de falha vs diferentes concentrações de AR S e R com o ligante Neat RAP e CSR 300

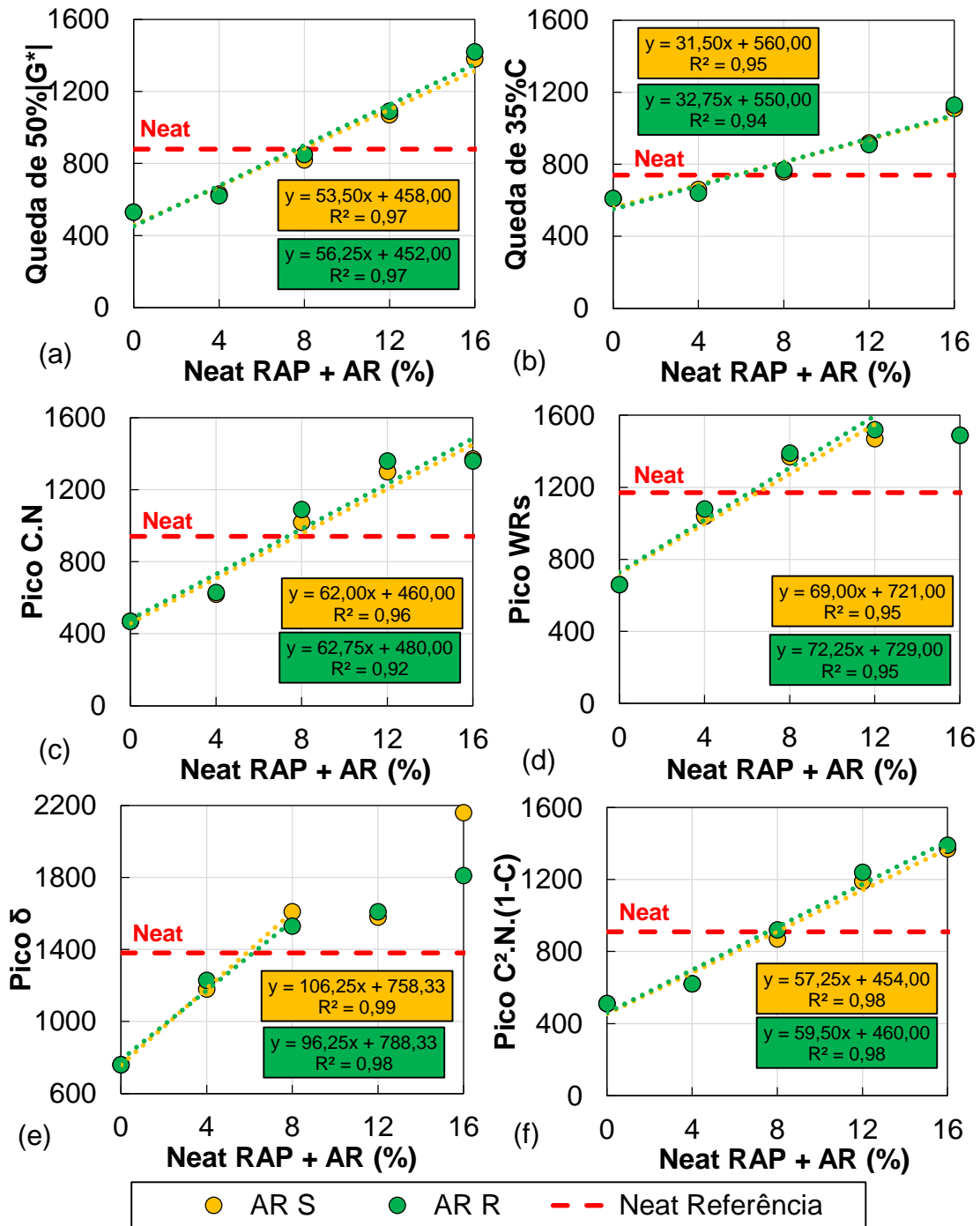


Figura 147 – Gráfico de mistura entre definições de falha vs diferentes concentrações de AR S e R com o ligante SBS RAP e CSR 300

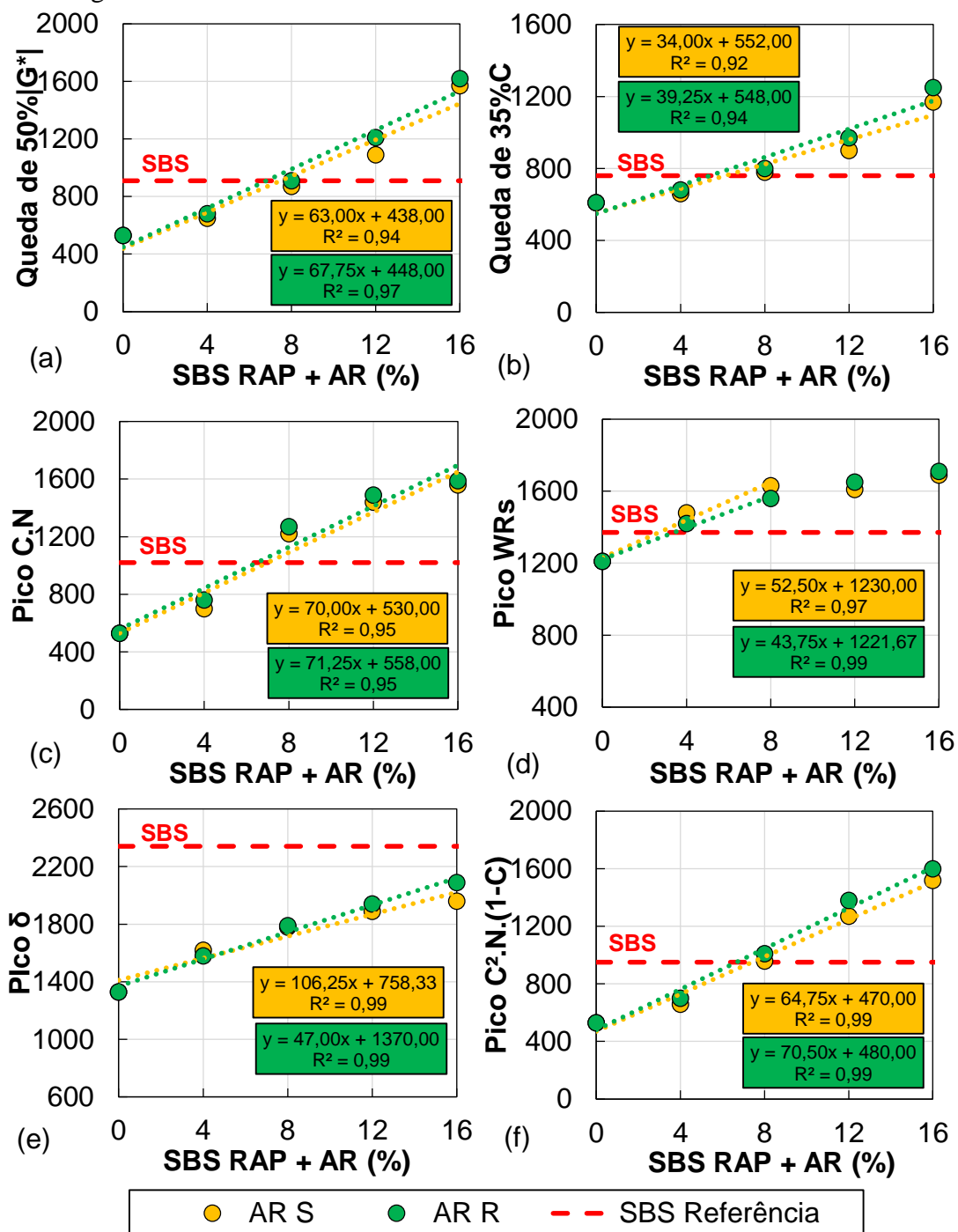


Figura 148 – Teor ótimo do AR S (a) e R (b) para os ligantes Neat RAP com base em diferentes definições de falhas e CSRs

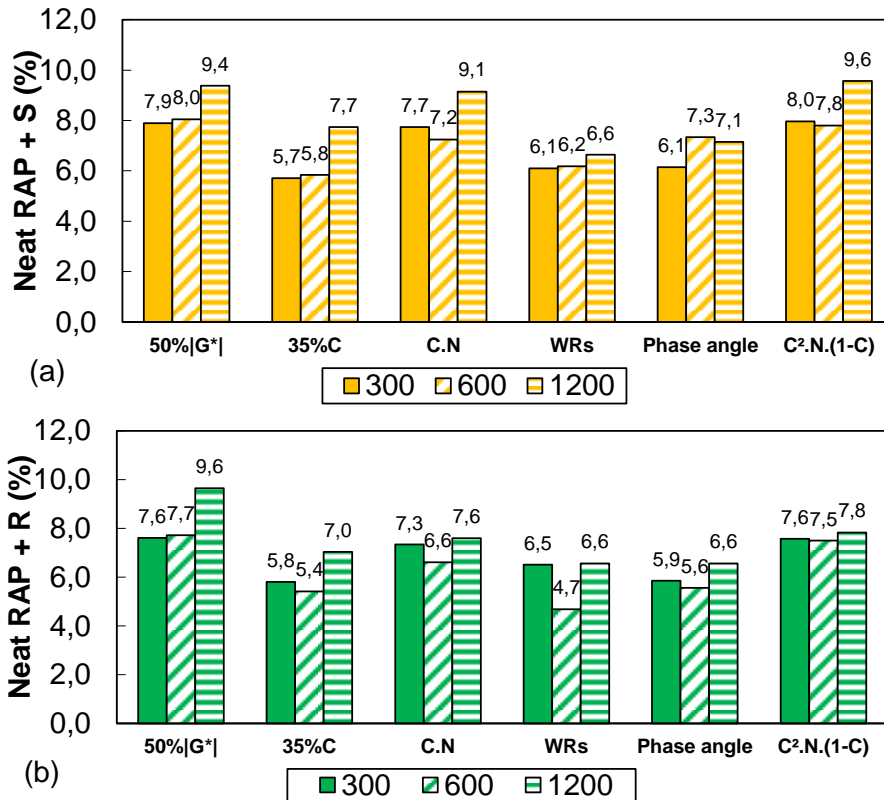
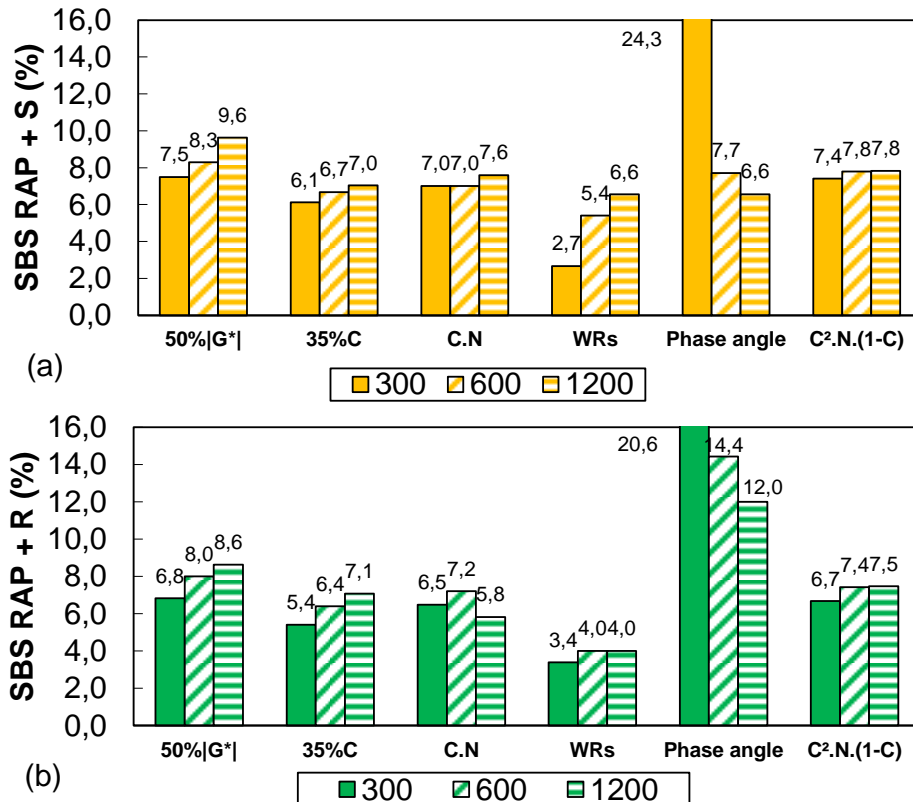


Figura 149 – Teor ótimo do AR S (a) e R (b) para os ligantes SBS RAP com base em diferentes definições de falhas e CSRs



4.6.2.5.1. Curvas características de dano e critérios de ruptura

O dano na falha (Sf), os coeficientes de ajuste da C vs S, e os coeficientes de ajuste dos envoltórios de ruptura do G^R vs Nf, W_{Sum}^R vs SE, Cum (1-C) v Nf e o D^R determinados por diferentes definições de falha estão apresentados na Tabela 51 e na Tabela 56 do Apêndice D.

Quanto aos coeficientes da C vs S, a Tabela 29 analisa a influência da definição de falha nos valores médios de C_1 e C_2 para um mesmo tipo de ligante asfáltico. Diferentemente do obtido com o envelhecimento, no qual os coeficientes mostraram-se independentes da definição, a adição dos agentes rejuvenescedores resultou em pouca variação no C_1 e alta variação no C_2 quando se compara os valores obtidos a partir das diferentes definições de falha para um mesmo ligante asfáltico. No entanto, com a realização de dois agrupamentos (1° - $50\%|G^*|$, $35\%C$, $C.N$ e $C^2.N.(1-C)$; 2° - PSE e ângulo de fase), uma baixa variação em C_2 foi identificada. Dessa forma, considerando os dois agrupamentos de definição de falha, o rejuvenescimento produz curvas C vs S similares, diferindo-se apenas no Sf.

As curvas características de dano em diferentes definições de falhas e concentrações de agentes rejuvenescedores são mostradas na Figura 150 e na Figura 151 para os ligantes Neat RAP e SBS RAP, respectivamente. O aumento da concentração dos agentes rejuvenescedores reverte o efeito do envelhecimento ao produzir curvas C (S) mais baixas e menor Sf independente da definição de falha. Além disso, no teor de 8%, os ligantes RAPs produziram curvas C (S) que colapsam sobre os ligantes de referência como alvo de dosagem, fornecendo um indicativo do teor de dosagem com base nas curvas características de dano.

As definições de $50\% |G^*|$, $35\% C$, $C.N$ e $C^2.N.(1-C)$ apresentaram falha com perda de integridade entre 0,6 e 0,4 de integridade, enquanto que as demais definições de ângulo de fase e W_S^R a falha ocorreu após perda de 0,4 de integridade.

Os efeitos do rejuvenescimento nos três envoltórios de ruptura estudados estão apresentados da Figura 211 a Figura 234 do Apêndice E. De modo geral, o envoltório do Cum(1-C) vs Nf, que não tinha exibido sensibilidade em identificar o envelhecimento, também não foi influenciado pelas diferentes concentrações dos ARs. Essa constatação se deve a não alteração do coeficiente angular da reta (D^R) devido aos efeitos do envelhecimento e rejuvenescimento que poderia classificar os ligantes quanto ao desempenho à fadiga.

Tabela 29 – Comparação entre C1 e C2 para diferentes definições de falha

Ligantes	C1 (todas definições)			C2 (todas definições)			C2 (50% G* , 35%C, C.N e C ² .N.(1-C))			C2 (PSE e ângulo de fase)		
	MD ¹	DP ²	CV (%) ³	MD ¹	DP ²	CV (%) ³	MD ¹	DP ²	CV (%) ³	MD ¹	DP ²	CV (%) ³
Neat	0,61	0,02	2,48%	0,53	0,20	37,84%	0,54	0,01	1,87%	0,52	0,00	0,00%
Neat RAP + 4%S	0,41	0,01	1,31%	0,52	0,20	38,00%	0,53	0,00	0,60%	0,49	0,01	1,16%
Neat RAP + 8%S	0,59	0,02	2,79%	0,47	0,18	38,03%	0,49	0,01	1,82%	0,45	0,01	1,43%
Neat RAP + 12%S	0,79	0,02	1,91%	0,45	0,17	37,86%	0,45	0,01	2,22%	0,44	0,01	1,45%
Neat RAP + 16%S	1,13	0,10	8,69%	0,48	0,18	38,53%	0,46	0,01	2,44%	0,51	0,06	11,92%
Neat RAP + 4%R	0,42	0,01	3,48%	0,51	0,19	37,90%	0,52	0,01	1,33%	0,49	0,01	1,15%
Neat RAP + 8%R	0,62	0,02	3,04%	0,47	0,18	38,05%	0,48	0,01	2,17%	0,44	0,01	1,77%
Neat RAP + 12%R	0,79	0,02	1,98%	0,44	0,17	37,87%	0,44	0,01	2,49%	0,44	0,01	3,25%
Neat RAP + 16%R	0,94	0,04	3,97%	0,43	0,16	37,98%	0,44	0,02	4,48%	0,42	0,00	0,84%
Neat RAP	0,28	0,00	0,00%	0,52	0,20	37,82%	0,52	0,01	0,96%	0,51	0,00	0,00%
SBS	0,63	0,02	3,95%	0,49	0,19	38,16%	0,50	0,01	2,50%	0,46	0,02	4,66%
SBS RAP + 4%S	0,44	0,01	2,85%	0,48	0,18	38,38%	0,49	0,03	5,82%	0,45	0,02	4,60%
SBS RAP + 8%S	0,62	0,02	3,75%	0,42	0,16	38,49%	0,43	0,04	9,82%	0,41	0,01	1,37%
SBS RAP + 12%S	0,84	0,02	2,66%	0,42	0,16	37,91%	0,43	0,01	3,02%	0,41	0,00	0,68%
SBS RAP + 16%S	1,17	0,03	2,42%	0,43	0,16	37,86%	0,43	0,01	1,69%	0,44	0,02	3,90%
SBS RAP + 4%R	0,47	0,01	3,00%	0,46	0,18	38,28%	0,47	0,03	7,21%	0,44	0,01	1,93%
SBS RAP + 8%R	0,68	0,03	4,50%	0,43	0,17	38,62%	0,44	0,05	10,22%	0,42	0,01	1,53%
SBS RAP + 12%R	0,89	0,02	2,06%	0,42	0,16	37,86%	0,42	0,01	2,66%	0,42	0,01	2,89%
SBS RAP + 16%R	1,35	0,14	10,23%	0,46	0,18	38,41%	0,45	0,02	3,47%	0,49	0,06	11,70%
SBS RAP	0,31	0,01	1,80%	0,52	0,20	38,31%	0,54	0,01	1,76%	0,48	0,01	1,49%

Figura 150 – C vs S determinados por diferentes definições de falhas para os ligantes Neat RAP com diferentes concentrações do agente R

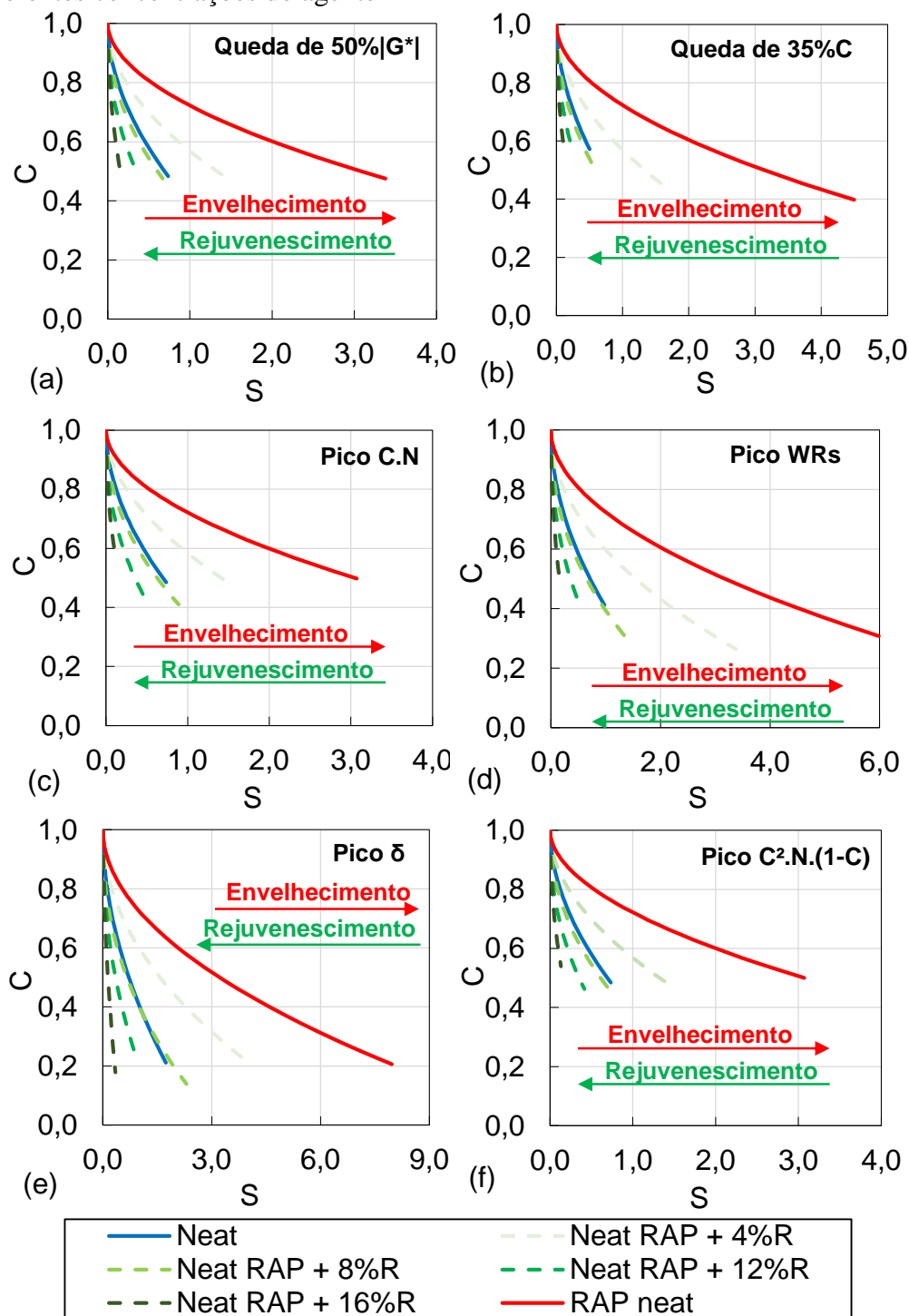
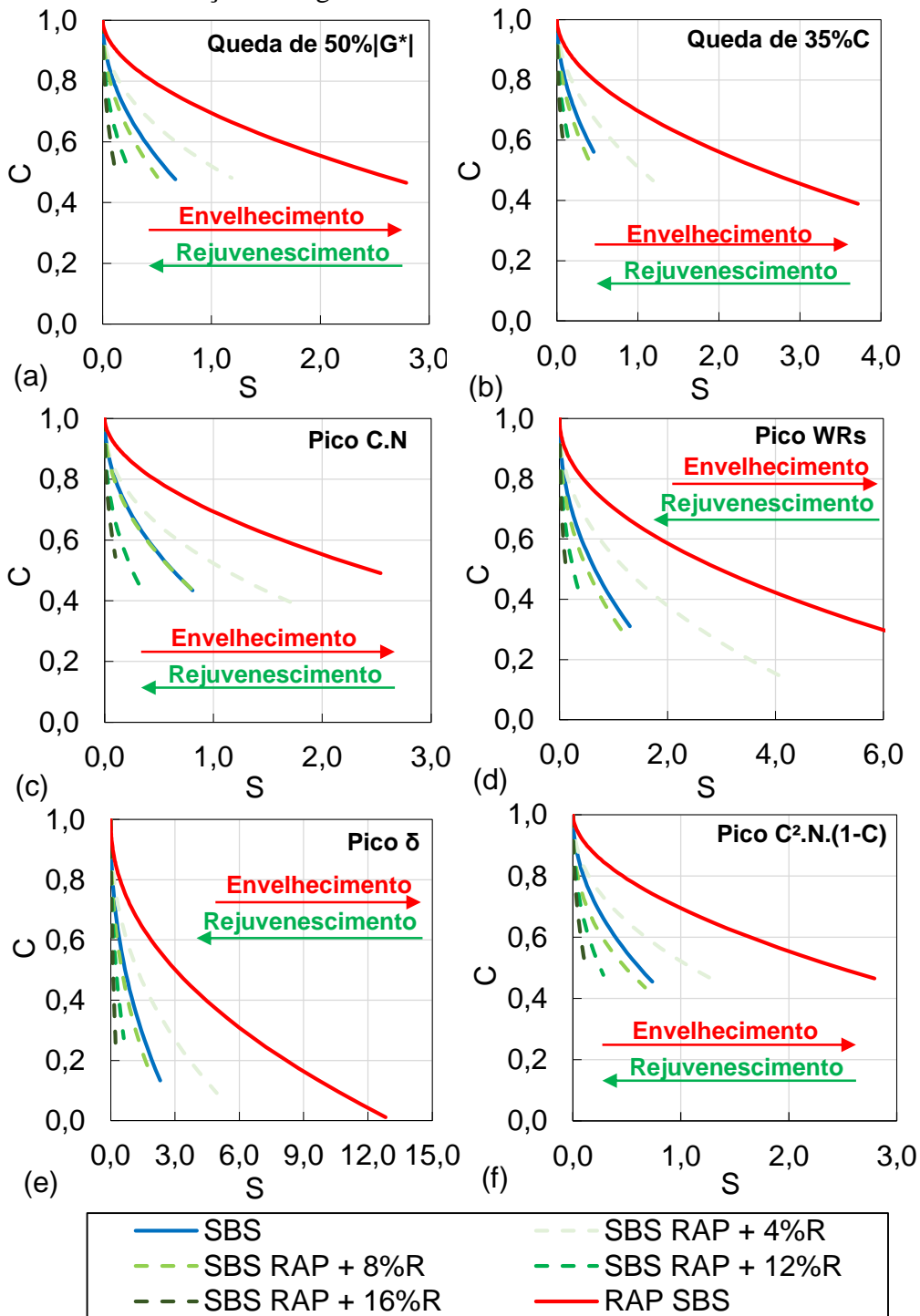


Figura 151 – C vs S determinados por diferentes definições de falhas para os ligantes SBS RAP com diferentes concentrações do agente R



Quanto aos G^R vs Nf e W_{Sum}^R vs SE, o efeito da presença e da concentração dos agentes rejuvenescedores é identificado por meio do deslocamento dos envoltórios no sentido contrário ao identificado com o envelhecimento. De modo geral, G^R vs Nf tende a ocupar posição inferior no gráfico como resposta a maior concentração dos ARs, independente da definição observada.

Para o W_{Sum}^R vs SE, o aumento na concentração dos ARs aproxima o envoltório da origem cartesiana.

Como citado na seção 4.6.1.5.2, a tendência única e oposta apresentada por esses dois envoltórios como resposta ao envelhecimento e rejuvenescimento dos materiais asfálticos pode fornecer um bom indicador para dosar o agente rejuvenescedor. Essa constatação é evidenciada a partir da excelente correlação ($R^2 > 0,90$) em modelo exponencial identificada no gráfico de mistura entre os parâmetros G^R , W_{Sum}^R e SE vs diferentes concentrações de ARs, também exibidos no Apêndice E, independente da definição de falha utilizada na formulação de cálculo. O dano na falha (Sf) também apresentou correlação similar com as diferentes concentrações.

Adicionalmente, foram construídos os gráficos de mistura com o Cum(1-C) e D^R . No entanto, não se encontrou correlação com a concentração de agente rejuvenescedor para algumas definições de falha. Assim, por não identificar os efeitos do envelhecimento e rejuvenescimento, essa abordagem não é um bom indicador para os objetivos propostos nesta pesquisa.

Os teores ótimos extraídos dos gráficos de mistura com base nos envoltórios de ruptura estão apresentados na seção seguinte, juntamente com a simulação da vida de fadiga.

4.6.2.5.1. Previsão da vida de fadiga

Com os dados de caracterização viscoelástica, das curvas características de dano e os coeficientes do S-VECD, foi avaliada a previsão da vida de fadiga conforme a seção 4.5.4.2. Assim, as formulações de Wang et al. (2015), Wang et al. (2018) e Safaei (2017) foram utilizadas para análise dos efeitos do rejuvenescimento na vida de fadiga de ligantes, calculadas a partir das diferentes definições de falhas investigadas em amplitudes de deformações de 1%, 2,5% e 5%. Os resultados obtidos estão apresentados nas Figura 235 a Figura 252 do Apêndice F.

Uma análise prévia indica que o efeito dos agentes rejuvenescedores na vida de fadiga é evidenciado em amplitude de deformação de 5% para as três formulações de simulação, independente da definição de falha. Em baixos níveis de deformação, os efeitos do envelhecimento, como identificado na Tabela 24, e do rejuvenescimento não ficam demonstrados. Assim, foram construídos gráficos de mistura entre a vida de fadiga simulada em 5% de deformação vs concentração dos ARs, também exibidos no Apêndice C.

De modo geral, as simulações indicam que os agentes rejuvenescedores restauram a vida de fadiga dos ligantes envelhecidos ao nível do ligante de referência alvo, independente da definição de falha. No entanto, o ganho de tolerância ao dano por fadiga não cresce proporcionalmente com o aumento da concentração dos AR, o que compromete as correlações conforme apresentado nos gráficos de mistura por determinadas formulações e definições de falha. Em resumo, os resultados demonstram que a performance à fadiga melhora até determinado teor de agente rejuvenescedor, que os gráficos de mistura sugerem ser em torno de 12%.

Os teores ótimos extraídos dos gráficos de mistura das simulações de vida de fadiga estão apresentados na Figura 152, Figura 153, Figura 154, Figura 155, Figura 156, Figura 157, calculadas pelas definições de falha de queda de 50%G, queda de 35%C, pico do C.N, pico do W_S^R , pico do δ e pico do $C^2.N.(1-C)$, respectivamente. Os teores ótimos obtidos dos gráficos de mistura dos envoltórios de ruptura e do Sf também estão apresentados.

De modo geral, verificando os valores dentro de uma mesma definição de falha, os teores ótimos convergem para valores similares independente do critério de ruptura, formulações de simulação de vida de fadiga e tipo de agente rejuvenescedor, com exceção do Cum (1-C) e D^R .

A Tabela 30 e Tabela 31 comparam os diferentes parâmetros utilizados para determinação do teor ótimo para o ligante Neat RAP e SBS RAP, respectivamente, agrupadas por tipo de definição de falha. O m , α , Cum (1-C) e D^R foram excluídos da determinação do teor médio, do desvio padrão e do coeficiente de variação entre os diferentes índices.

Os resultados evidenciam que os teores ótimos determinados pelos diferentes índices (rigidez, ciclo de falha nos diferentes CSRs, C vs S, envoltórios de ruptura e simulação da vida de fadiga) resultaram nos menores coeficientes de variação quando calculados pela queda de 50%|G*| (7%), $C^2.N.(1-C)$ (entre 7% e 9%) e pico do C.N (entre 10% e 11%). Além disso, o coeficiente de variação entre os teores ótimos médios dessas definições é inferior a 5,5%, independente do ligante e do tipo de agente rejuvenescedor.

Portanto, uma análise global quanto a sensibilidade em identificar o envelhecimento e rejuvenescimento pelo teste LAS reportam para a interpretação e determinação dos parâmetros S-VECD pelas definições de falha de queda de 50%|G*|, ou pico do $C^2.N.(1-C)$ ou pico do C.N. A partir da comparação com os resultados de dano por fadiga em mistura na seção 5.6.5.1, as melhores correlações foram obtidas pelo pico do $C^2.N.(1-C)$ e pico do C.N.

Figura 152 – Teor ótimo do AR S e R para os ligantes Neat RAP (a) e SBS RAP (b) com base no Sf, critérios de rupturas e vida de fadiga determinados com base na queda de 50% |G*|

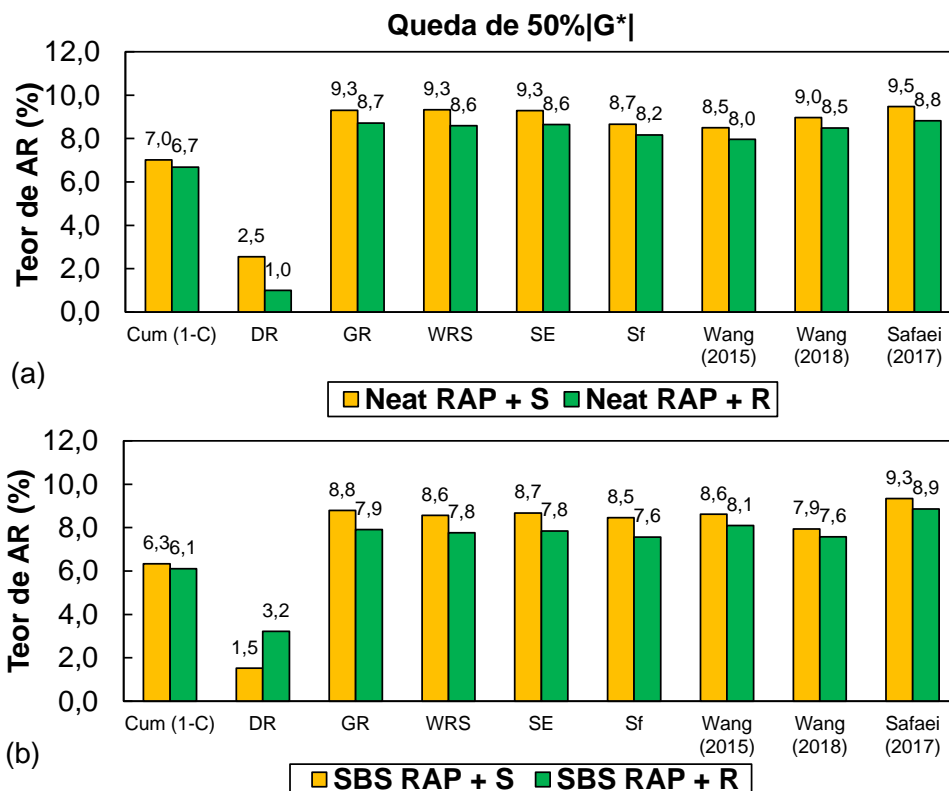


Figura 153 – Teor ótimo do AR S e R para os ligantes Neat RAP (a) e SBS RAP (b) com base no Sf, critérios de rupturas e vida de fadiga determinados com base na queda de 35% C

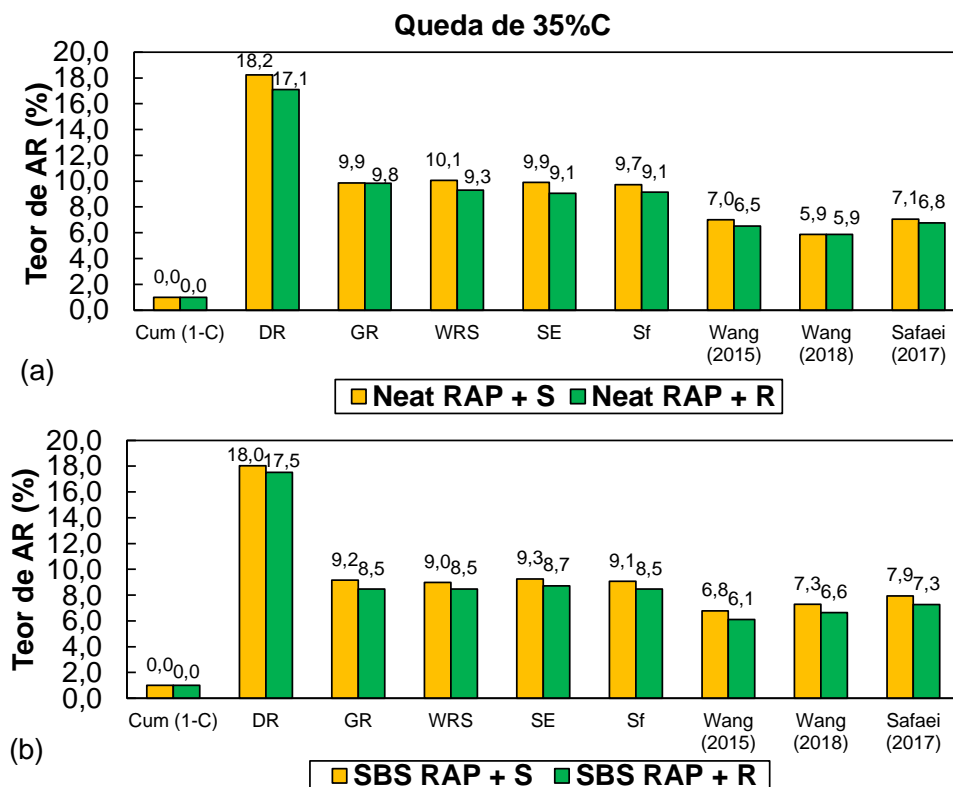


Figura 154 – Teor ótimo do AR S e R para os ligantes Neat RAP (a) e SBS RAP (b) com base no Sf, critérios de rupturas e vida de fadiga determinados com base na pico de C.N

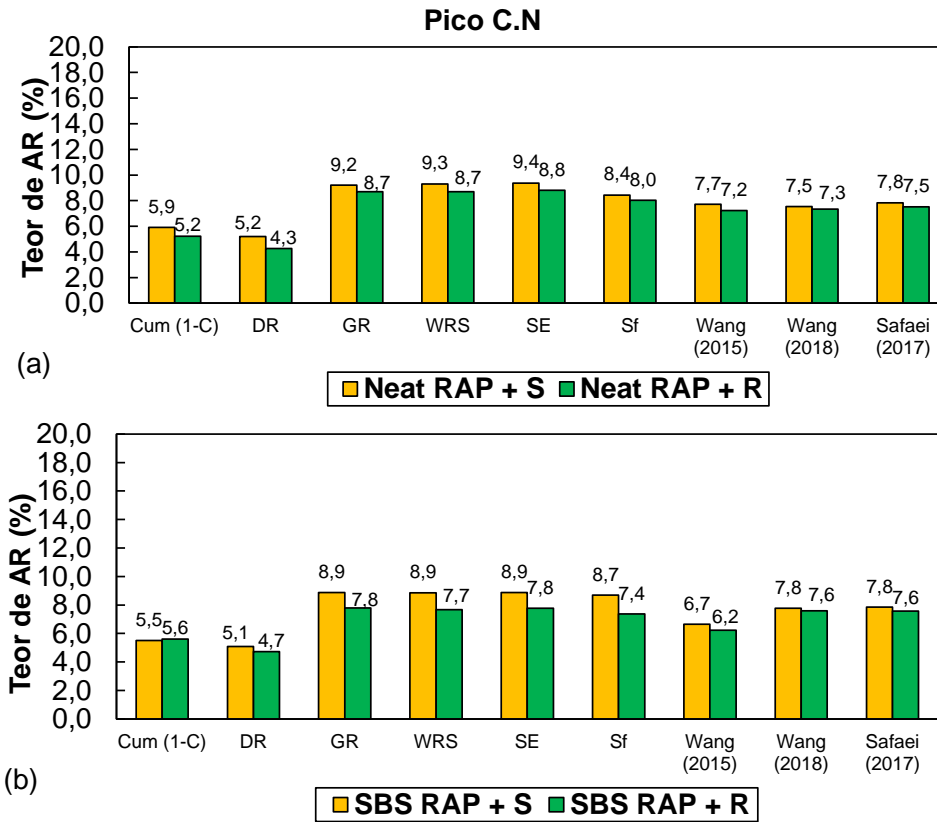


Figura 155 – Teor ótimo do AR S e R para os ligantes Neat RAP (a) e SBS RAP (b) com base no Sf, critérios de rupturas e vida de fadiga determinados com base na pico de W_S^R

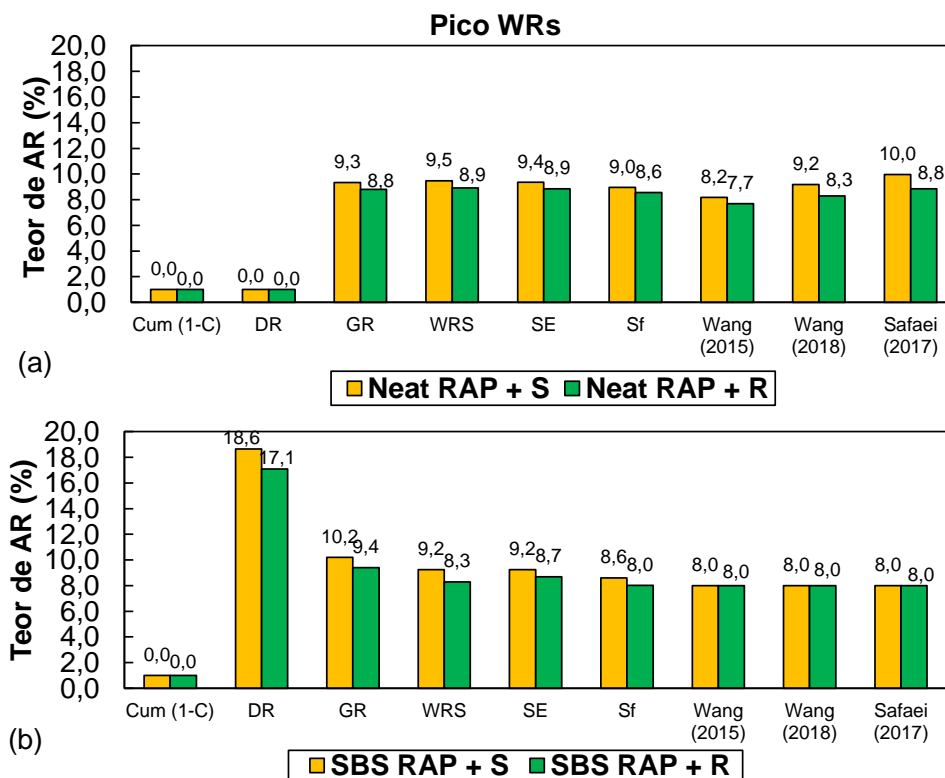


Figura 156 – Teor ótimo do AR S e R para os ligantes Neat RAP (a) e SBS RAP (b) com base no Sf, critérios de rupturas e vida de fadiga determinados com base na pico do δ

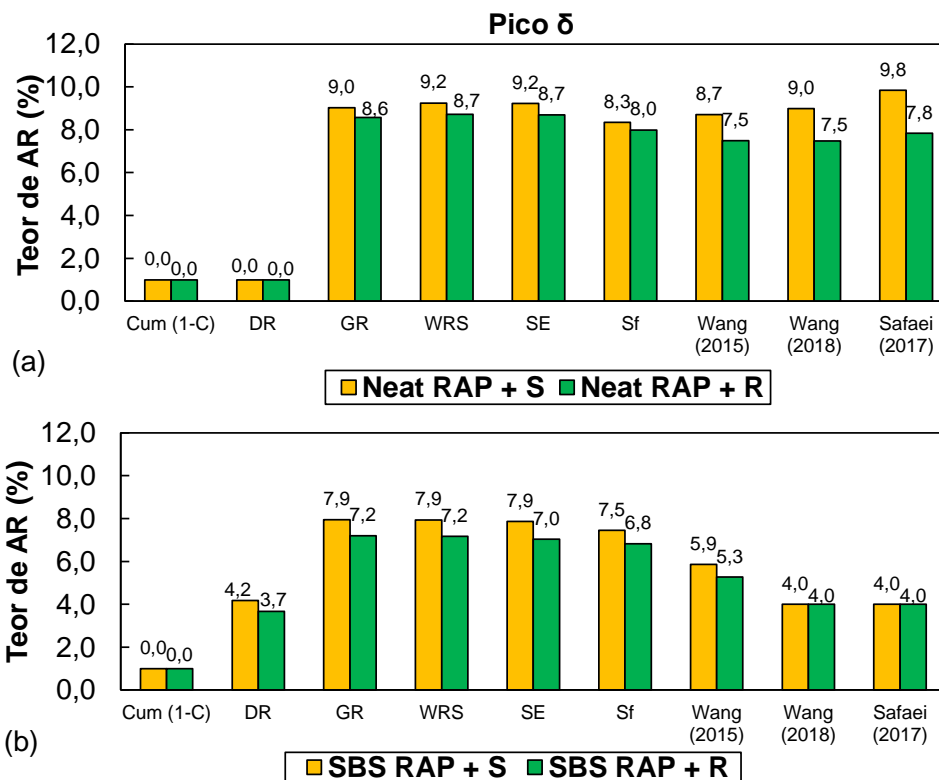


Figura 157 – Teor ótimo do AR S e R para os ligantes Neat RAP (a) e SBS RAP (b) com base no Sf, critérios de rupturas e vida de fadiga determinados com base na pico do $C^2.N.(1-C)$

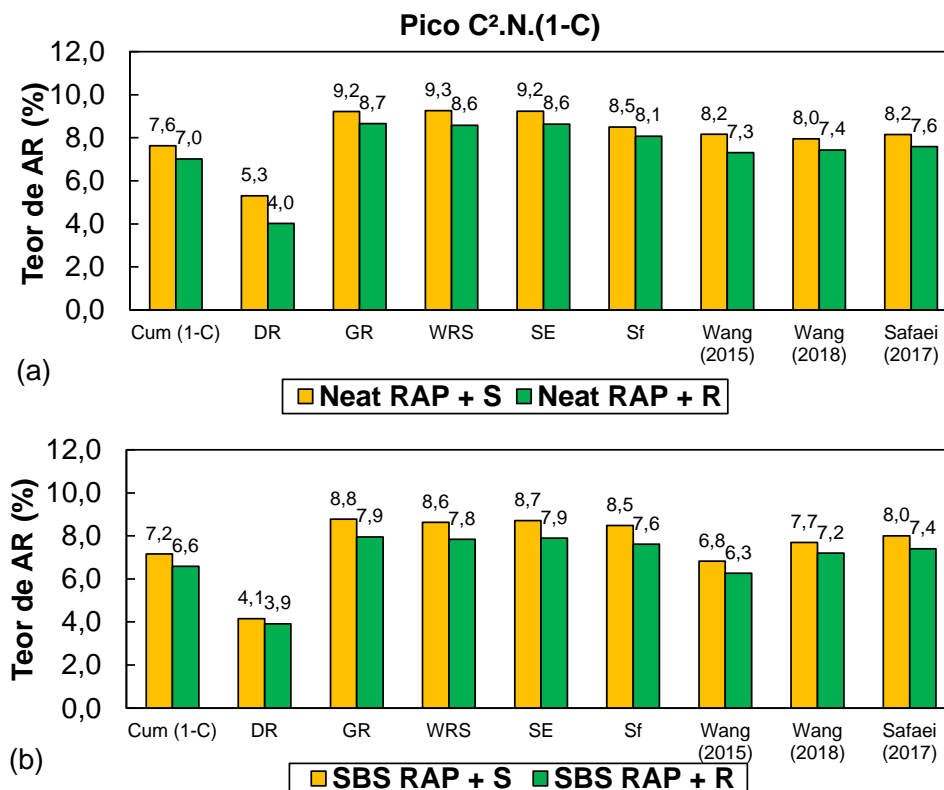


Tabela 30 - Teores ótimos de ARs com base em diferentes parâmetros de fadiga extraídos do teste LAS do ligante Neat RAP

Parâmetros de fadiga		Neat RAP + S						Neat RAP + R					
		Queda de 50% G*	Queda de 35%C	Pico C.N	Pico WRs	Pico δ	Pico C ² .N.(1-C)	Queda de 50% G*	Queda de 35%C	Pico C.N	Pico WRs	Pico δ	Pico C ² .N.(1-C)
LVE	G* @19°C e 10Hz	9,2						8,6					
	m	16,6						16,1					
	alfa	16,3						15,7					
Ciclo de falha	Nf 300	7,9	5,7	7,7	6,1	6,1	8,0	7,6	5,8	7,3	6,5	5,9	7,6
	Nf 600	8,0	5,8	7,2	6,2	7,3	7,1	7,7	5,4	6,6	4,7	5,6	7,5
	Nf 1200	9,4	7,7	9,1	6,6	7,1	9,6	9,6	7,0	7,6	6,6	6,6	7,8
C vs S	C vs S	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0
	Sf	8,7	9,7	8,4	9,0	8,3	8,5	8,2	9,1	8,0	8,6	8,0	8,1
Critério de ruptura	Cum (1-C)	7,0	NI	5,9	NI	NI	7,6	6,7	NI	5,2	NI	NI	7,0
	DR	2,5	18,2	5,2	NI	NI	5,3	1,0	17,1	4,3	NI	NI	4,0
	GR	9,3	9,9	9,2	9,3	9,0	9,2	8,7	9,8	8,7	8,8	8,6	8,7
	WRs	9,3	10,1	9,3	9,5	9,2	9,3	8,6	9,3	8,7	8,9	8,7	8,6
	SE	9,3	9,9	9,4	9,4	9,2	9,2	8,6	9,1	8,8	8,9	8,7	8,6
Simulação de desempenho	Wang et al. (2015)	8,5	7,0	7,7	8,2	8,7	8,2	8,0	6,5	7,2	7,7	7,5	7,3
	Wang et al. (2018)	9,0	5,9	7,5	9,2	9,0	8,0	8,5	5,9	7,3	8,3	7,5	7,4
	Safaei (2017)	9,5	7,1	7,8	10,0	9,8	8,2	8,8	6,8	7,5	8,8	7,8	7,6
Média		8,8	7,7	8,3	8,3	8,3	8,5	8,4	7,4	7,8	7,7	7,5	7,9
Desvio Padrão		0,7	1,7	0,9	1,5	1,2	0,8	0,6	1,6	0,8	1,4	1,1	0,5
Coeficiente Variação		7%	23%	10%	18%	14%	9%	7%	22%	10%	18%	15%	7%

Nota: não foram considerados no cálculo os valores de m, alfa, Cum(1-C) e D^R.

Tabela 31 - Teores ótimos de ARs com base em diferentes parâmetros de fadiga extraídos do teste LAS do ligante SBS RAP

Parâmetros de fadiga		SBS RAP + S						SBS RAP + R					
		Queda de 50% G*	Queda de 35% C	Pico C.N	Pico WRs	Pico δ	Pico C ² .N.(1-C)	Queda de 50% G*	Queda de 35% C	Pico C.N	Pico WRs	Pico δ	Pico C ² .N.(1-C)
LVE	G* @19°C e 10Hz	8,6						7,9					
	m	16,1						15,5					
	alfa	15,8						14,8					
Ciclo de falha	Nf 300	7,5	6,1	7,0	2,7	24,3	7,4	6,8	5,4	6,5	3,4	20,6	6,7
	Nf 600	8,3	6,7	7,0	5,4	7,7	7,8	8,0	6,4	7,2	4,0	14,4	7,4
	Nf 1200	9,6	7,0	7,6	6,6	6,6	7,8	8,6	7,1	5,8	4,0	12,0	7,5
C vs S	C vs S	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0
	Sf	8,5	9,1	8,7	8,6	7,5	8,5	7,6	8,5	7,4	8,0	6,8	7,6
Critério de ruptura	Cum (1-C)	6,3	NI	5,5	NI	NI	7,2	6,1	NI	5,6	NI	NI	6,6
	DR	1,5	18,0	5,1	18,6	4,2	4,1	3,2	17,5	4,7	17,1	3,7	3,9
	GR	8,8	9,2	8,9	10,2	7,9	8,8	7,9	8,5	7,8	9,4	7,2	7,9
	WRs	8,6	9,0	8,9	9,2	7,9	8,6	7,8	8,5	7,7	8,3	7,2	7,8
	SE	8,7	9,3	8,9	9,2	7,9	8,7	7,8	8,7	7,8	8,7	7,0	7,9
Simulação de desempenho	Wang et al. (2015)	8,6	6,8	6,7	8,0	5,9	6,8	8,1	6,1	6,2	8,0	5,3	6,3
	Wang et al. (2018)	7,9	7,3	7,8	8,0	4,0	7,7	7,6	6,6	7,6	8,0	4,0	7,2
	Safaei (2017)	9,3	7,9	7,8	8,0	4,0	8,0	8,9	7,3	7,6	8,0	4,0	7,4
Média		8,5	7,7	7,9	7,5	8,4	8,0	8,0	7,3	7,2	7,0	9,0	7,4
Desvio Padrão		0,6	1,1	0,8	2,2	5,8	0,6	0,6	1,1	0,8	2,2	5,2	0,6
Coeficiente Variação		7%	15%	11%	29%	69%	8%	7%	16%	11%	32%	59%	7%

Nota: não foram considerados no cálculo os valores de m, alfa, Cum(1-C) e D^R.

4.6.2.6. Dosagem dos agentes rejuvenescedores por diferentes critérios

A partir das análises anteriores, verificou-se que os critérios de dosagem do agente rejuvenescedor resultam em diferentes teores ótimos de acordo com a propriedade e o mecanismo de dano. A Figura 158 e a Figura 159 apresentam todos os parâmetros testados para determinação do teor ótimo dos ligantes Neat RAP e SBS RAP, respectivamente, separados no domínio LVE e de danificação por fadiga e deformação permanente.

Os resultados evidenciam as menores concentrações dos agentes rejuvenescedores para restaurar a vida de fadiga dos ligantes envelhecidos (7,1% a 9,6%). Em contrapartida, a resistência à deformação permanente exigiu os maiores teores (7,4% a 19,3%), enquanto que os parâmetros LVE exigiram um teor intermediário entre os dois domínios de danificação (9,9% a 15,1%). Outro dado importante se refere a variação entre os teores ótimos por diferentes parâmetros dentro de um mesmo domínio, conforme exibido na Tabela 32.

Nota-se que o desvio padrão e o coeficiente de variação apresentado pela média entre os parâmetros de fadiga estão entre 0,5-0,7% e 7-9%, respectivamente. No entanto, esses limites sobem para 2,0-2,7% e 15-22% para os parâmetros LVE e 4,8-5,1% e 34-37% para os parâmetros de deformação permanente. Assim, a resposta pelos diferentes parâmetros de fadiga apresenta-se de forma homogênea com relação aos outros domínios.

Tabela 32 – Valores médios, desvio padrão e coeficiente de variação dos teores ótimos com base em critérios LVE, fadiga e deformação permanente

Ligante	Neat RAP + S		
Propriedade	Fadiga	LVE	Deformação permanente
Teor ótimo	8,6 ± 0,7%	13,5 ± 2,1%	14,2 ± 5,1%
Coeficiente variação	9%	16%	36%
Ligante	Neat RAP + R		
Propriedade	Fadiga	LVE	Deformação permanente
Teor ótimo (%)	8,0 ± 0,5%	13,3 ± 2,0%	13,5 ± 4,6%
Coeficiente variação (%)	7%	15%	34%
Ligante	SBS RAP + S		
Propriedade	Fadiga	LVE	Deformação permanente
Teor ótimo	8,1 ± 0,6%	12,2 ± 2,7%	14,2 ± 5,1%
Coeficiente variação	7%	22%	36%
Ligante	SBS RAP + R		
Propriedade	Fadiga	LVE	Deformação permanente
Teor ótimo	7,7 ± 0,6%	11,8 ± 2,6%	13,2 ± 4,8%
Coeficiente variação	8%	22%	37%

Figura 158 – Teor ótimo do AR S e R para os ligantes Neat RAP (a) e SBS RAP (b) com base no Sf, critérios de rupturas e vida de fadiga determinados com base na pico do δ

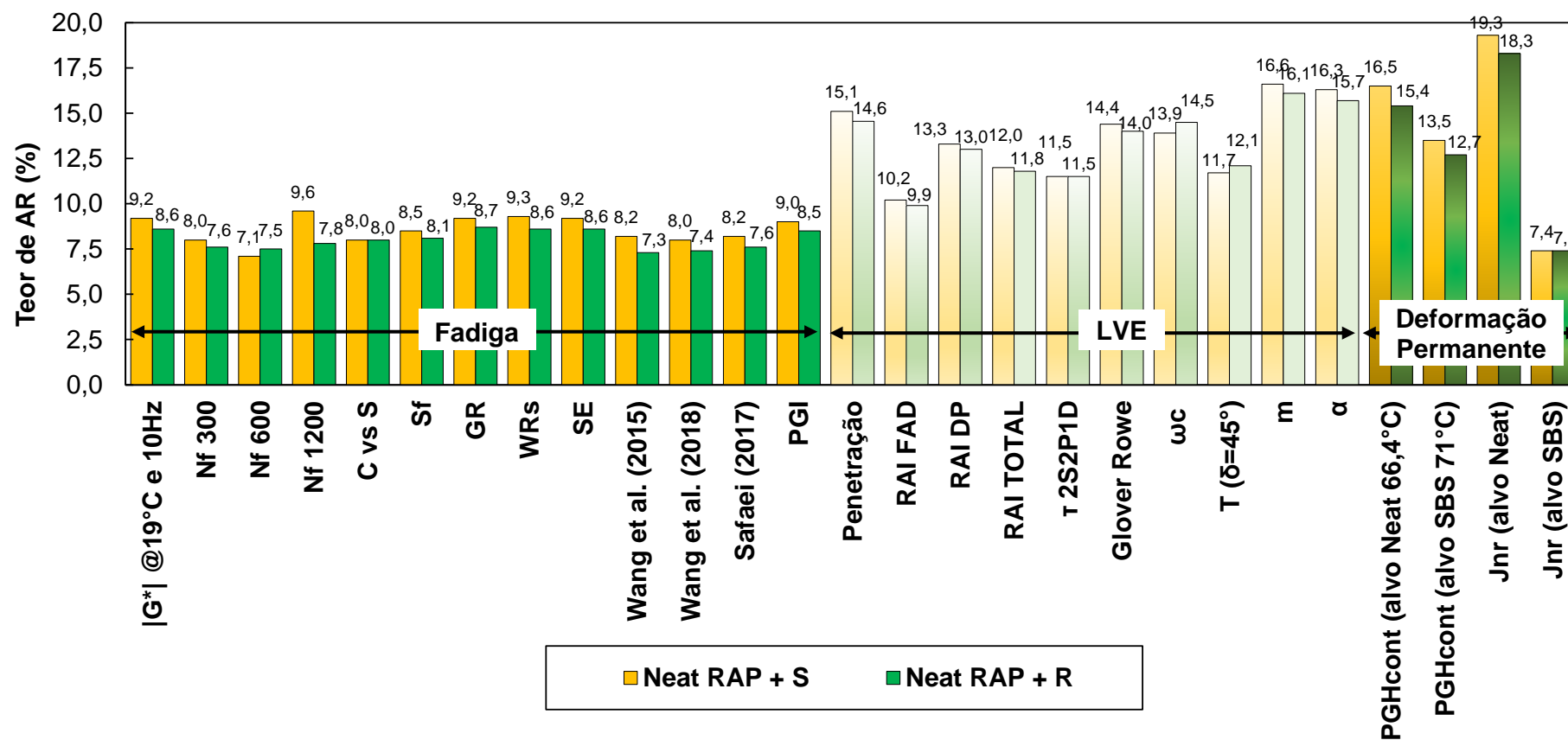
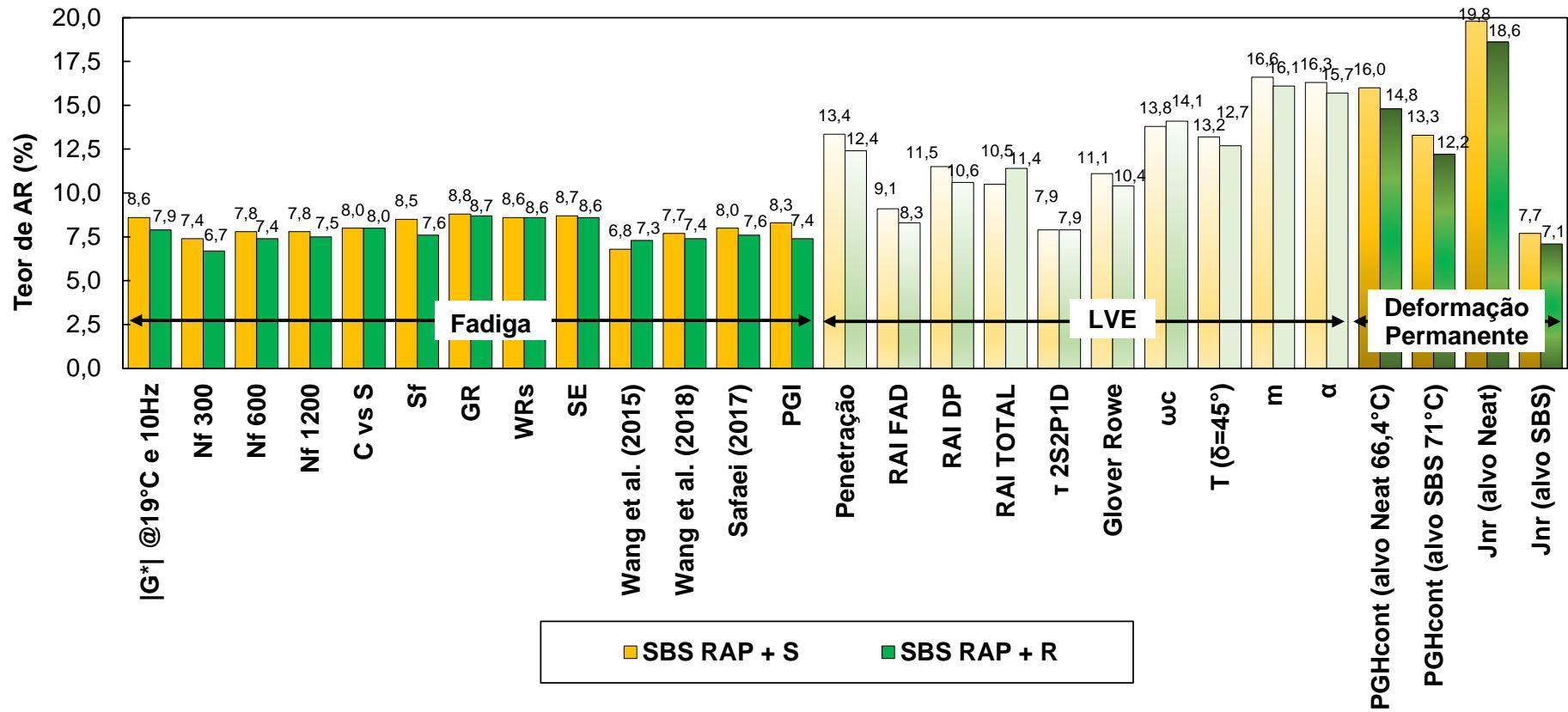


Figura 159 – Teor ótimo do AR S e R para os ligantes Neat RAP (a) e SBS RAP (b) com base no Sf, critérios de rupturas e vida de fadiga determinados com base na pico do δ



4.7. CONCLUSÕES

Esta seção investigou os efeitos do envelhecimento e do rejuvenescimento em propriedades convencionais, reológicas e de desempenho em ligantes asfálticos, com foco principal em identificar parâmetros de seleção e dosagem do agente rejuvenescedor com base no fenômeno de fadiga, e compará-los aos demais parâmetros LVE e de deformação permanente. A partir das evidências fornecidas pelos resultados, as conclusões estão descritas a seguir.

O envelhecimento reduziu a penetração, o ângulo de fase, o Jnr e aumentou a rigidez, o PGH contínuo e o R_{3,2} dos ligantes asfálticos. Além disso, a intensidade dos efeitos do envelhecimento varia de acordo com a temperatura, frequência e o regime reológico dos testes. As alterações são mais intensas em propriedades de alta temperatura e baixa frequência que em temperaturas e frequências intermediárias. Assim, de acordo com a posição do parâmetro escolhido para dosar o agente rejuvenescedor dentro desses regimes, diferentes teores ótimos são encontrados.

O rejuvenescimento reverteu os efeitos do envelhecimento em todas as propriedades anteriormente citadas, com exceção do R_{3,2} nos ligantes poliméricos. O envelhecimento promove a degradação da cadeia polimérica, o que não é recomposto com o agente rejuvenescedor.

Além disso, os resultados indicaram maior nível de envelhecimento dos ligantes extraídos de RAPs com relação aos envelhecidos artificialmente em laboratório até 80 horas de PAV. Esse maior nível oxidativo é resultado dos mecanismos de envelhecimento adicionais de campo em relação ao processo em laboratório. Essa constatação ficou evidenciada na análise do envelhecimento pelas diferentes definições de falha no teste LAS.

Todas as definições de falha identificaram a redução da vida de fadiga dos ligantes RAPs. Em contrapartida, essa sensibilidade não foi verificada nos ligantes envelhecidos em laboratório com RTFOT + PAV. Resposta similar aos ligantes RAPs foi identificada ao submeter os ligantes 80PAV a um envelhecimento adicional no suntest por 48 horas. A partir disso, concluiu-se que a utilização de ligantes envelhecidos em laboratório para investigação e proposição de parâmetros para dosagem do agente rejuvenescedor não é efetiva para esta finalidade.

A redução da vida de fadiga como resultado do envelhecimento foi identificada na C vs S, nos critérios de ruptura e nas equações de previsão da vida de fadiga, todos determinados nas

diferentes definições de falha investigadas. Por outro lado, os dois agentes rejuvenescedores restauraram a vida de fadiga com base na resposta de diferentes parâmetros oriundos do teste LAS. Os teores ótimos com base em 12 parâmetros resultaram em teores médios próximos, com baixo desvio padrão e coeficientes de variação quando determinados pelas definições de falha de queda de $50\%|G^*|$, pico do C.N e pico do $C^2.N.(1-C)$. Essas três definições também se mostraram efetivas para identificação dos diferentes níveis de envelhecimento dos materiais.

Excelentes correlações (superior a 0,90) foram identificadas entre os resultados de fadiga ligantes e misturas quando calculados pelo pico do C.N e pico do $C^2.N.(1-C)$, conforme exibido na seção 5.6.5.1. Assim, as formulações de cálculo e a interpretação dos resultados experimentais pelo S-VECD com estas duas definições mostraram-se efetivas para selecionar e dosar os agentes rejuvenescedores com base no fenômeno da fadiga.

A concentração de agente rejuvenescedor para restaurar a vida de fadiga foi inferior (7,1% a 9,6%) aos parâmetros LVE e de deformação permanente. A resistência à deformação permanente exigiu os maiores teores (7,4% a 19,3%), enquanto que os parâmetros derivados da análise LVE um teor intermediário (9,9% a 15,1%) entre os dois domínios de danificação. Outro dado importante refere-se à variação entre os teores ótimos por diferentes parâmetros dentro de um mesmo domínio. Os parâmetros de fadiga exibiram uma menor variabilidade (7% a 9%) em comparação ao LVE (16% a 22%) e de deformação permanente (34% a 37%).

Por fim, o principal mecanismo de falha de misturas recicladas com alto teor de RAP é resultado do fenômeno de fadiga. Assim, a identificação de uma menor concentração de agente rejuvenescedor com base nesse mecanismo em comparação a outros critérios e a acurácia quanto ao material em reestabelecer a vida de fadiga pode resultar em ganhos econômicos e ambientais significantes, sem a perda de performance.

5 AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DE MISTURAS 100% RAP COM AGENTE REJUVENESCEDOR E TEOR DE LIGANTE OTIMIZADO

5.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Ao se projetar um concreto asfáltico com materiais convencionais, as relações empíricas e os critérios tradicionais como granulometria, volume de vazios, vazios no agregado mineral, relação betume-vazio e o teor de ligante, forneceram boa resposta por décadas, o que refletiu em um bom desempenho em campo. No entanto, quando se afasta dessa prática, e parte-se para misturas recicladas com altos teores RAP, esses critérios tradicionais podem não ser verdadeiros, assim como prever o comportamento destas misturas a partir de ensaios em ligante. Neste caso, é imperativo a busca por métodos de projeto com maior confiabilidade, principalmente os baseados em desempenho.

O material RAP, proveniente da fresagem de revestimentos asfálticos ao final da vida de serviço, tem grande potencial para ser utilizado novamente para produção do concreto asfáltico, promovendo economia de recursos naturais, recursos financeiros e redução na emissão de poluentes. No entanto, esse material, sem nenhum tratamento, pode conferir algumas de suas características que podem tornar a mistura reciclada susceptível a defeitos precocemente.

As características do ligante RAP como a elevada rigidez resulta em misturas excessivamente rígidas, com baixa propriedade coesiva (VUKOSAVLJEVIC, 2006; MOGAWER et al., 2012; BORIACK et al., 2014) e susceptíveis ao trincamento térmico e por fadiga (YOU e GOH, 2008; WEST et al., 2011; MOGAWER et al., 2012; ANDERSON e DANIEL, 2013; SABOURI et al., 2015; SONG et al., 2018). Diferentes metodologias ou materiais são utilizados para compensar a rigidez excessiva do RAP.

Uma das propostas é a adição de ligantes com alta penetração e baixa viscosidade (LIPHARDT et al., 2015; CARRION et al., 2017; YAN et al., 2018; JACOBS et al., 2021; PRADHAN e SAHOO, 2022). Outra solução é a dosagem balanceada, no qual otimiza o teor de ligante final da mistura com o objetivo de melhorar o desempenho à fadiga sem promover um desbalanceamento com relação à deformação permanente. Pesquisas como GDOT, 2013, Boeira (2018), Pires (2018), Norouzi et al. (2017) e Zaumanis et al. (2019) evidenciaram uma melhor resposta ao fenômeno de fadiga com o aumento no teor de ligante dentro de uma mesma mistura asfáltica.

Por fim, outra alternativa é a utilização dos agentes rejuvenescedores, que visam restaurar os componentes reológicos, químicos e de desempenho do ligante envelhecido (NAHAR et al., 2014; YU et al., 2014; ZAUMANIS et al., 2014)³ e também pode ser combinada junto a dosagem balanceada. O material age como um “lubrificante” que facilita o processo de produção, reduz a temperatura de usinagem e potencializa maiores teores de incorporação, além de auxiliar na ativação do ligante RAP (LO PRESTI et al., 2019). O teor de dosagem do material pode ser estabelecido com base na recomendação do fabricante, por propriedades convencionais (penetração, ponto de amolecimento e viscosidade) ou pelo grau de desempenho da especificação *Superpave* (ZAUMANIS, MALLICK e FRANK, 2013; ZAUMANIS, MALLICK e FRANK, 2014; YAN et al., 2014; ARÁMBULA-MERCADO et al., 2018).

Outros dois fatores que não são identificados em testes na escala de ligantes podem influenciar no desempenho de misturas recicladas: o *Degree of binder Activity* (DoA) e o *Degree of binder Blending* (DoB). O primeiro indica a quantidade mínima de ligante ativo que pode ser considerado em um projeto, e o segundo está relacionado a um fenômeno de mistura entre o ligante RAP e os materiais virgens adicionados (LO PRESTI et al., 2019).

O agente rejuvenescedor se mostrou efetivo em restaurar as propriedades de desempenho à fadiga na escala de ligantes conforme visto no Capítulo 4. No entanto, a reprodução dessa efetividade à nível de misturas e a correta identificação pelos testes mecânicos é verificada nesta seção.

Portanto, este Capítulo avalia o potencial de recuperação da vida de fadiga de misturas 100% RAP por meio de um agente rejuvenescedor comercial e da otimização do teor final com um ligante altamente modificado. Para isso, foram testados um conjunto de misturas sem agente rejuvenescedor, com diferentes concentrações de agente rejuvenescedor, com a combinação de agente rejuvenescedor e otimização do teor final por um ligante altamente modificado, e duas misturas de referência com ligante virgem. Todas as misturas recicladas foram produzidas na temperatura de máxima ativação.

Os resultados do teste de fadiga foram interpretados pelo modelo S-VECD com os critérios de ruptura do G^R e do D^R com a finalidade de identificar se ambos são sensíveis aos efeitos do envelhecimento e rejuvenescimento. As análises de performance dessas misturas foram simuladas e avaliadas por meio do FlexPAVETM. As propriedades reológicas e de deformação permanente também foram avaliadas.

Por fim, correlações entre o desempenho de fadiga entre ligantes e misturas foram desenvolvidas com o propósito de identificar e validar os parâmetros para seleção e dosagem

do agente rejuvenecedor com base neste mecanismo de danificação. Além disso, o grau de correlação entre as variáveis verificou se é possível prever o comportamento das misturas 100% RAP a partir da análise de ligantes.

5.2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

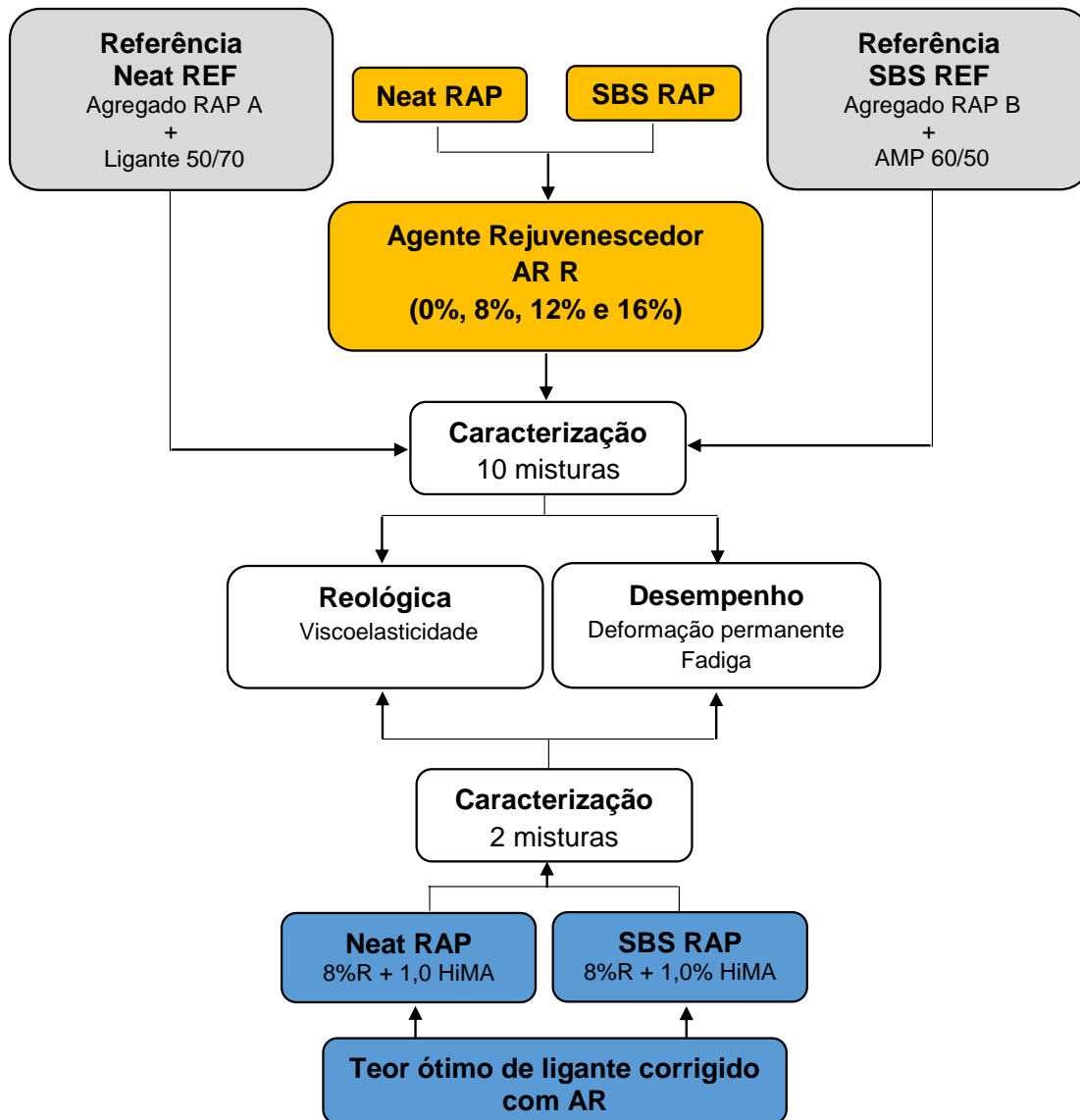
A Figura 160 exhibe o programa experimental conduzido para atingir os objetivos propostos. As duas fontes de RAP da seção 4.3.1 foram utilizadas para produção das misturas asfálticas recicladas e de referência. Três grupos de misturas asfálticas foram avaliadas:

- a) Misturas 100% RAP sem (0%) e com agente rejuvenecedor R nas concentrações de 8%, 12% e 16% (mesmas utilizadas na seção 4.6.2, em peso de ligante RAP), totalizando 8 misturas;
- b) Misturas 100% RAP com agente rejuvenecedor R (8%) e teor final otimizado em 1% por ligante altamente modificado HiMA, totalizando 2 misturas;
- c) Misturas de referência compostas pela granulometria e agregados RAPs queimados em um forno de ignição e posteriormente misturados com os ligantes virgens 50/70 (Neat) e AMP 60/85 (SBS) da seção 4.3.2, nos mesmos teores dos materiais RAPs, totalizando 2 misturas.

Inicialmente foram determinadas as temperaturas de máxima ativação dos materiais RAPs (seção 5.4.1) conforme a metodologia de Pires, Lo Presti e Airey (2019). Assim, foram fornecidas as condições de processamento dos RAPs como a temperatura de mistura e compactação. Além disso, essa temperatura resulta na maior disponibilidade do ligante RAP para processamento e mistura com os demais materiais adicionados (agente rejuvenecedor e HiMA).

As amostras para os testes mecânicos foram produzidas no Compactador Giratório Superpave (CGS) a uma altura de 170 mm e diâmetro de 100 mm. As condições volumétricas alvo exigidas para os testes reológicos (5.5 ± 0.5 %), de deformação permanente (7.0 ± 1.0 %) e de fadiga (5.5 ± 0.5 %) foram atingidas.

Figura 160 - Programa experimental para desenvolvimento e avaliação das misturas



Com relação aos agregados e a granulometria de cada material RAP, o único tratamento consistiu na retirada da fração retida na peneira $\frac{3}{4}$ ", sendo utilizado o material passante. Assim, com tipo de agregado e composição granulométrica fixa, foi possível verificar diretamente os efeitos do envelhecimento, da concentração do agente rejuvenescedor e da combinação do agente rejuvenescedor e otimização por HiMA nas propriedades das misturas asfálticas. Em sequência, serão apresentados os materiais, os projetos de misturas asfálticas, os métodos de teste e os resultados.

5.3. MATERIAIS

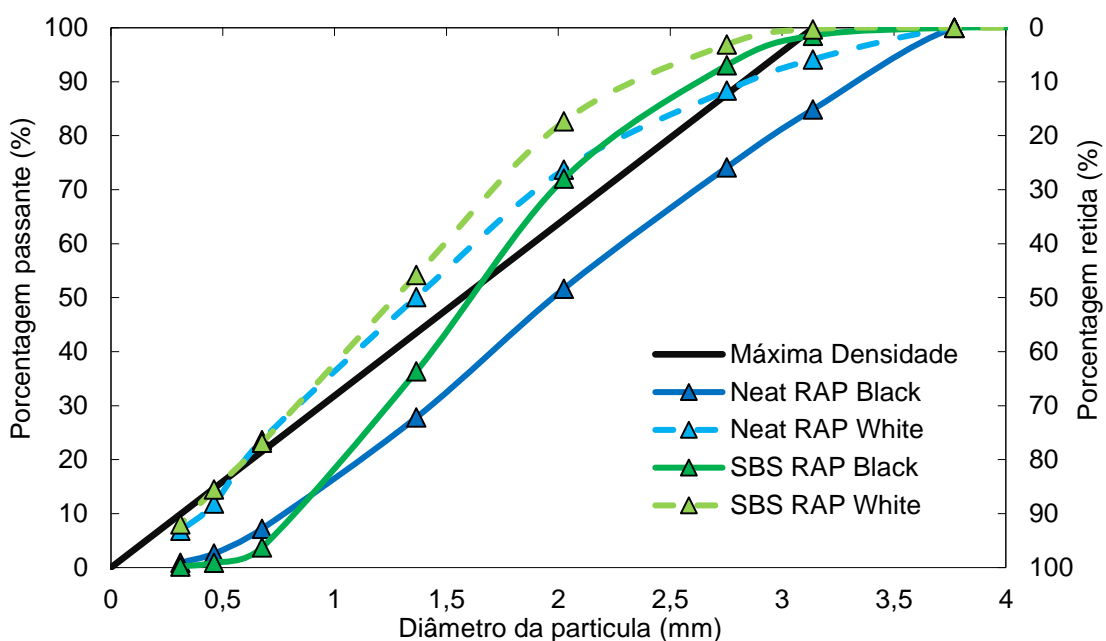
Os materiais utilizados para a produção das 12 misturas asfálticas estão descritos nesta seção. Estão apresentados os materiais RAPs, o agente rejuvenescedor e os ligantes virgens para produção das misturas de referência e para as misturas com teor final otimizado.

5.3.1. RAPs

As duas fontes de RAP com diferentes origens (Figura 57) e descritos na seção 4.3.1 foram utilizadas para produção das misturas asfálticas. O Neat RAP tem em sua composição um ligante 50/70 no teor de 5,38% (DNER ME 053, 1994), e gmm de 2,674 (ABNT NBR 15619, 2016). O SBS RAP é composto por um ligante SBS 60/85 no teor de 5,76% (DNER ME 053, 1994) e gmm de 2,542 (ABNT NBR 15619, 2016). Em ambos os RAPs, foi descartado o material retido na peneira 3/4". Posteriormente, ambos foram secos em estufa por 72 horas a 40°C para perda de umidade.

A Figura 161 exibe a granulometria *black* (DNER ME 83/99) e granulometria *white* (DNER ME 83/99) após queima no forno de ignição (ASTM D 6307, 2019) para os materiais Neat RAP e SBS RAP. A mesma composição foi utilizada para produção das misturas asfálticas.

Figura 161 - Composição granulométrica black e white do Neat RAP e SBS RAP



A determinação da temperatura de máxima ativação conforme de Pires, Lo Presti e Airey (2019) estão apresentadas na seção 5.4.1.

5.3.2. Ligantes asfálticos

Três ligantes virgens foram aplicados com diferentes propósitos na pesquisa. O ligante 50/70 (Neat) e AMP 60/85 (SBS) descritos e caracterizados na seção 4.3.2 foram utilizados para produção das duas misturas de referência juntamente com os agregados RAPs queimados no forno de ignição.

Por fim, um ligante altamente modificado com aproximadamente 7,5% de polímero SBS, denominado HiMA, foi utilizado combinadamente com o agente rejuvenescedor para produção de outras duas misturas recicladas. A Tabela 33 apresenta os testes de caracterização convencional do ligante HiMA.

Tabela 33 - Resultados de caracterização convencional do ligante HiMA

Propriedade	HiMA	Limite (AMP 65/90E) ¹
Penetração (100g, 5s, 25 °C)	55	40 a 70
Ponto de Amolecimento (°C)	87	65
Recuperação elástica (%)	85	90
Viscosidade Brookfield a 135°C (cp)	1865	3000 máx
Viscosidade Brookfield a 150°C (cp)	665	2000 máx
Viscosidade Brookfield a 177°C (cp)	242	1000 máx
Densidade relativa a 25°C (g/cm ³)	1,001	-

¹ Não há especificação para o ligante HiMA no Brasil

5.3.3. Agente rejuvenescedor

O agente rejuvenescedor utilizado para produção das misturas recicladas foi o Agente R descrito na seção 4.3.3. As concentrações do agente rejuvenescedor utilizadas foram 8%, 12% e 16% em peso de ligante RAP, as mesmas utilizadas no Capítulo 4, com exceção do 4%.

5.4. PROJETO DE MISTURAS ASFÁLTICAS

Este estudo contemplou doze misturas asfálticas divididas em três grupos. O primeiro grupo consistiu em oito misturas resultantes da incorporação de 0%, 8% 12% e 16% do agente R em duas fontes de RAP (Neat RAP e SBS RAP). O segundo grupo contempla uma

combinação de 8% do agente R e otimização do teor de ligante das duas fontes de RAP em 1% com ligante HiMA, resultado em outras duas misturas recicladas. Por fim, duas misturas controle constituídas por agregados RAP queimados no forno de ignição e ligantes virgens 50/70 e AMP 6085. A Tabela 34 resume as características das misturas, como a fonte de RAP, o teor de ligante RAP, virgem adicionado e o final das misturas, concentração do agente rejuvenescedor, a gmm e a nomenclatura utilizada durante o trabalho. A composição granulométrica das misturas foi apresentada na Figura 161.

O protocolo para determinação do *Degree of Binder Activity* e os procedimentos para usinagem das misturas e a compactação dos corpos de prova estão descritos a seguir.

5.4.1. Determinação do *Degree of Binder Activity*

O grau de atividade, chamado de *Degree of Binder Activity* (DoA), indica a quantidade mínima de ligante RAP ativo que pode ser considerada por um projetista em um projeto de mistura, sendo uma propriedade intrínseca do material e depende do tipo de RAP e das condições de processamento (temperatura e tempo de mistura) (LO PRESTI et al., 2019). Basicamente, propõe classificar o material de acordo com a facilidade ou dificuldade para ativar e mobilizar o ligante oxidado presente e eliminar a necessidade da extração e recuperação do ligante para caracterizar o RAP (GASPAR, 2019).

Para isso, analisou-se o efeito da temperatura como principal variável para ativação do ligante envelhecido, e a partir disso, identificou-se a melhor temperatura que resulta na maior ativação para processamento do material, ou seja, obtém-se o melhor que o material pode fornecer em relação a disponibilidade de ligante e, possivelmente, uma maior interação com outros materiais incorporados na mistura.

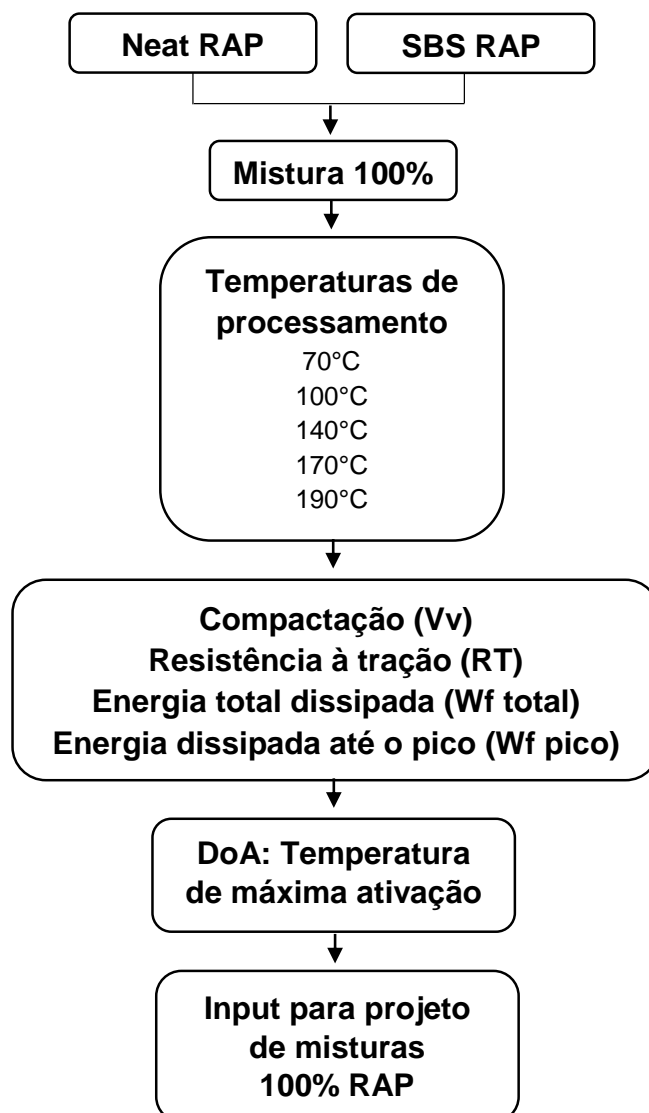
O índice DoA foi determinado pelo protocolo proposto por Pires, Lo Presti e Airey (2019) com adaptações de Gaspar (2019), sendo descrito na Figura 162. O procedimento consistiu em submeter amostras 100% RAP densificadas no compactador Marshall, produzidas em diferentes temperaturas de condicionamento, ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral.

Tabela 34 - Projeto das misturas: resumo do teor de ligante, concentração de agente rejuvenescedor, gmm e nomenclatura utilizada

Fonte RAP	Teor de ligante RAP	Teor de ligante Hima ¹	Teor de ligante 50/70 ¹	Teor de ligante AMP 60/85 ¹	Teor de ligante total	Agente R ³	Gmm	Nomenclatura
Neat RAP	5,38%	-	-	-	5,38%	-	2,674	Neat RAP
Neat RAP	5,38%	-	-	-	5,38%	8%	2,651	Neat RAP + 8%R
Neat RAP	5,38%	-	-	-	5,38%	12%	2,632	Neat RAP + 12%R
Neat RAP	5,38%	-	-	-	5,38%	16%	2,625	Neat RAP + 16%R
Neat RAP	5,38%	1,0%	-	-	6,38%	8%	2,587	Neat RAP + 8%R + 1%H
Neat RAP ²	-	-	5,38%	-	5,38%	-	2,671	Neat REF
SBS RAP	5,76%	-	-	-	5,38%	-	2,542	SBS RAP
SBS RAP	5,76%	-	-	-	5,38%	8%	2,507	SBS RAP + 8%R
SBS RAP	5,76%	-	-	-	5,38%	12%	2,508	SBS RAP + 12%R
SBS RAP	5,76%	-	-	-	5,38%	16%	2,509	SBS RAP + 16%R
SBS RAP	5,76%	1,0%	-	-	6,76%	8%	2,484	SBS RAP + 8%R + 1%H
SBS RAP ²	-	-	-	5,76	5,76%	-	2,552	SBS REF

Nota: ¹ ligantes virgens; ² utilizado somente o agregado e a composição granulométrica pós queima em forno de ignição; ³ em peso de ligante RAP

Figura 162 - Protocolo para determinação do DoA



Cinco temperaturas foram escolhidas para processamento (mistura e compactação), 70°C, 100°C, 140°C, 170°C e 190°C. As amostras foram condicionadas em estufa por quatro horas nas temperaturas selecionadas, e posteriormente misturadas em um misturador mecânico por 60 segundos. Após foram moldadas 5 amostras por temperatura com aproximadamente 100 mm de diâmetro e 63,5 mm de altura no compactador Marshall, com 50 golpes por face.

A densidade específica aparente (G_{mb}) das amostras compactadas foram determinadas por pesagem hidrostática, segundo AASHTO T 166 (2016). Como o volume de vazios excede 7%, foi utilizada a ASTM D 3203 (2017).

A determinação da temperatura de máxima ativação foi baseada em uma análise conjunta dos resultados experimentais de compactabilidade (volume de vazios – V_v),

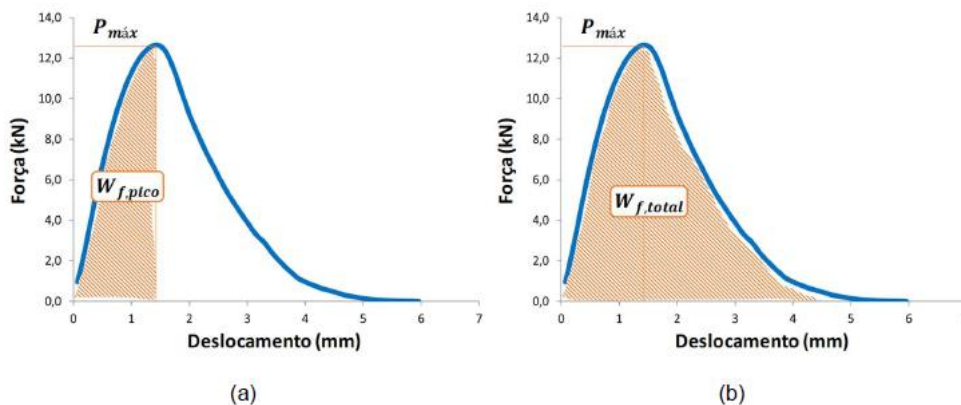
resistência à tração por compressão diametral, os índices de energia total dissipada - E^{total} e energia dissipada até o pico - $E^{\text{pré-pico}}$.

A resistência à tração por compressão diametral seguiu a norma ASTM D 6931 (2017). O teste foi conduzido na prensa hidráulica *Universal Testing Machine* (UTM – 25) da IPC Global, em amostras previamente condicionadas por 24 horas a 25°C. A resistência à tração (RT, em MPa) foi calculada pela Equação 33, onde $P_{\text{máx}}$ é a carga máxima aplicada no ensaio (em KN), t é a espessura da amostra (mm) e D é o diâmetro da amostra (mm).

$$RT = \frac{2000 \cdot P_{\text{máx}}}{\pi \cdot t \cdot D} \quad (33)$$

Os dados experimentais do teste permitiram a determinação de dois índices energéticos ao se plotar o gráfico de força (kN) versus deslocamento do atuador (mm) conforme a Figura 163, $E^{\text{pré-pico}}$ e o E^{total} .

Figura 163 - Definição da fratura do trabalho



Fonte: Gaspar (2019)

Os índices de energia (E) foram determinados calculando-se a área sobre a curva carga-deslocamento (trabalho - W). O trabalho até o pico de carga máxima está associado à energia necessária para iniciar a trinca. O trabalho total foi calculado pela Equação 34.

$$W = W_{\text{pré-pico}} + W_{\text{pós-pico}} = \int_0^{\Delta P_{\text{máx}}} P \cdot dx + \int_{\Delta P_{\text{máx}}}^{\Delta P_{\text{final}}} P \cdot dx \quad (34)$$

Onde P é o carregamento (kN) e x é o deslocamento do atuador (mm). A energia total foi calculada normalizando o trabalho total pela área da superfície da fratura gerada durante o teste. A área é estimada como um produto da altura da amostra (H) e o comprimento de uma

nova fissura formada durante o teste (referido como diâmetro da amostra – D). Assim, a energia pré-pico é dada pela Equação 35.

$$E^{pré-pico} = \frac{W^{pré-pico}}{H \cdot D} \quad (35)$$

Os quatro parâmetros acima citados foram plotados com as cinco temperaturas analisadas. As temperaturas que apresentaram os maiores valores de RT, $E^{pré-pico}$, E^{total} e o menor valor de Vv foram assumidas como máxima ativação, ou seja, 100% de DoA. Pires, Lo Presti e Airey (2019) concluíram que o DoA foi melhor obtido com os resultados de resistência à tração (RT) e a $E^{pré-pico}$. Gaspar (2019) identificou que principalmente a E^{total} pode ser mais adequada para o cálculo do DoA.

5.4.2. Preparação e compactação de amostras para testes mecânicos

A preparação para produção das misturas recicladas em laboratório (com agente rejuvenecedor e combinação entre agente rejuvenecedor e HiMA) consistiu em condicionar em estufa o Neat RAP e SBS RAP por três horas até o equilíbrio térmico na temperatura de máxima ativação, entre 165°C e 170 °C, conforme apresentado e detalhado na seção 5.6.1.

O agente rejuvenecedor permaneceu em temperatura ambiente e foi aspergido diretamente ao RAP aquecido. Essa metodologia permite o contato direto com o ligante RAP, o que facilita a difusão e a ativação do material, conforme recomendação de Zaumanis et al. (2019). O ligante HiMA foi equilibrado em temperatura de 173°C e também adicionado diretamente ao RAP aquecido.

A usinagem das misturas asfálticas no misturador mecânico está descrita a seguir. Os RAPs foram pré-misturados aquecidos por 0,5 minuto. Após introduziu-se o agente rejuvenecedor nas dosagens estudadas (8%, 12% e 16%) e misturou-se novamente por mais 1,5 minutos. Nas misturas com HiMA, o ligante foi adicionado e misturou-se novamente por 3,5 minutos.

Para as misturas de referência, Neat REF e SBS REF, o agregado RAP queimado foi aquecido a 161 °C e 171°C, respectivamente, e pré misturado por 0,5 minuto. Então foram introduzidos os ligantes virgens 50/70 e AMP 60/85 nas temperaturas de 151°C e 161°C, respectivamente, seguido por 3,5 minutos de mistura.

Posteriormente a usinagem no misturador mecânico, as doze misturas permaneceram em estufa por 2 horas nas temperaturas de compactação. As amostras para os testes mecânicos foram produzidas no Compactador Giratório Superpave (pressão aplicada de 0,60 MPa, ângulo de rotação externo de 1,25° e velocidade constante de 30 rpm) em dimensões de 170 mm de altura e 100 mm de diâmetro, com as volumetrias de acordo com os testes reológicos (5.5 ± 0.5 %), de deformação permanente (7.0 ± 1.0 %) e de fadiga (5.5 ± 0.5 %).

A temperatura de compactação para as misturas recicladas (com agente rejuvenescedor e combinação entre agente rejuvenescedor e HiMA) foi reduzida para uma faixa entre 155° e 160°C. A redução da temperatura foi resultado da facilidade de densificação observada na temperatura de 170°C após a mistura entre o material RAP e agente rejuvenescedor e HiMA. No entanto, mesmo na faixa de 155°C e 160°C, a facilidade de densificação continuou a ser observada, sendo necessários entre 12 a 30 giros no CGS para produção de todas as misturas recicladas.

Assim, essa facilidade de densificação após mistura com o agente rejuvenescedor oferece margem para redução ainda mais significativa na temperatura de compactação conforme observação prática pelo autor. No entanto, como não é objeto e objetivo do estudo, não há aprofundamento desta discussão. A redução da temperatura reduz o consumo de energia e de emissão de gases, resultando em maiores ganhos ambientais e econômicos.

Por fim, as misturas de Neat REF e SBS REF foram compactadas em 136°C e 150°C, respectivamente.

5.5. CARACTERIZAÇÃO E TESTES EM MISTURAS

As doze misturas asfálticas foram caracterizadas pelo teste reológico de módulo dinâmico, à deformação permanente pelo *Flow Number* e à fadiga pelo ensaio uniaxial cíclico de tração-compressão, descritos a seguir.

5.5.1. Caracterização Linear Viscoelástica

A reologia é a ciência que estuda o fluxo ou deformação de materiais e avalia sua resposta com relação ao tempo, sendo utilizada para entender as propriedades plásticas, elásticas, viscosas ou intermediárias a alguns destes domínios devido a uma variação de temperatura ou carregamento (CRAVO, 2016). Em termos de mistura asfáltica, a rigidez e a

resposta de relaxação são significativamente modificadas com o grau de envelhecimento e rejuvenescimento. Assim, esses efeitos foram avaliados por meio do teste módulo dinâmico.

O teste de módulo dinâmico foi conduzido com base na AASHTO T 342-11 (2019), em amostras com 100 mm de diâmetro, 150 mm de altura e volume de vazios na faixa de $5.5 \pm 0.5\%$. O comportamento LVE dos materiais foi determinado por meio do módulo dinâmico ($|E^*|$) e ângulo de fase (Φ) em diferentes temperaturas (-10°C , 4°C , 21°C , 37°C e 54°C) e frequências (25 Hz, 20 Hz, 10 Hz, 5 Hz, 2 Hz, 1 Hz, 0,5 Hz, 0,2 Hz e 0,1 Hz). As amplitudes de deformação foram entre 50 e 75 $\mu\text{m/m}$.

As misturas foram analisadas em termos de curva mestra de módulo dinâmico e ângulo de fase, espaço Cole Cole e diagrama black. As curvas mestras foram construídas para uma Tref de 21°C a partir da determinação dos fatores de translação aT. Uma análise comparativa entre os dados experimentais de $|E^*|$ e Φ em -10° a 54°C e 10 Hz a fim de avaliar numericamente os efeitos das diferentes concentrações de agente rejuvenescedor, e também do envelhecimento.

5.5.2. Deformação Permanente: *Flow number*

A deformação permanente no revestimento asfáltico pode ser definida como depressões longitudinais nas trilhas de roda devido ao acúmulo de pequenas deformações não recuperáveis decorrentes da aplicação de carga repetida (tráfego de veículos), principalmente em altas temperaturas. Simultaneamente, ocorre deformação viscosa do ligante e deformação plástica da estrutura mineral.

Em misturas recicladas, um aumento no teor de incorporação de RAP melhora a resistência à deformação permanente devido ao efeito da maior rigidez e elasticidade conferida pelo ligante envelhecido. No entanto, o agente rejuvenescedor e o teor adicional de ligante HiMA pode tornar as misturas suscetíveis à deformação permanente, e dessa forma, a resistência à deformação das misturas foi verificada por meio do teste de *Flow Number* (FN). O *Flow Number* é um parâmetro oriundo do ensaio uniaxial de carga repetida que melhor se correlaciona com a deformação permanente, segundo o Report 465 (WITCZAK et al., 2002), e com alta correlação quando comparados ao desempenho por meio de medidas de afundamento em trilha de roda em campo (FACCIN, 2018; FACCIN et al., 2021).

O teste de *Flow Number* seguiu as recomendações descritas das normas brasileiras ABNT NBR 16505 (2016) e DNIT 184 - ME (2018). As amostras com 100 mm de diâmetro, 150 mm de altura e volume de vazios na faixa de $7.0 \pm 1.0\%$ foram submetidas a ciclos de

carregamento de 1 s com aplicação de carga a uma tensão de 204 kPa por 0,1 s, seguido por repouso de 0,9 s com uma tensão de 10,2 kPa.

Os resultados do teste foram apresentados em termos de deformação plástica acumulada versus o número de ciclos de carga. Além disso, o modelo matemático de Francken, formado pela soma entre uma função de potência e uma função exponencial conforme Equação 36, foi utilizado para determinação do FN.

$$\varepsilon_p = A \cdot N^B + C \cdot (e^{D \cdot N} - 1) \quad (36)$$

Onde, ε_p (microstrain) é a deformação permanente em N ciclos, N é o número de ciclos, e A, B, C e D são os coeficientes da regressão. A análise de regressão não linear foi utilizada para ajustar o modelo aos dados de teste.

Por fim, as misturas foram classificadas quanto aos limites da Tabela 35, todos para as mesmas condições volumétricas (volume de vazios próximo a 7%), temperatura de 60°C e tensão de carregamento de 204 kPa.

Tabela 35 - Classificação das misturas quanto ao tráfego de acordo com o FN

Pesquisas	Níveis de tráfego – N USACE			
	Leve	Médio	Pesado	Extremamente Pesado
	[<3x10 ⁶]	[3x10 ⁶ ; 1x10 ⁷]	[1x10 ⁷ ; 3x10 ⁷]	[>3x10 ⁷]
Nascimento (2008)	-	300	750	-
Bastos et al. (2017)	-	100	300	>1000
Faccin et al. (2021)	-	300	600	>2000
	[<10 ⁶]	[10 ⁶ ; 10 ⁷]	[10 ⁷ ; 10 ⁸]	[>10 ⁸]
Franco e Mota (2020) ¹	≤100	100≤FN<300	300≤FN<750	750≤FN<2000
Franco e Mota (2020) ²	100≤FN<300	300≤FN<750	750≤FN<2000	≥2000

¹ Condições normais: velocidade acima de 60 km/h, via sem intersecções, sem terceira faixa e temperatura máxima do revestimento moderada (igual ou inferior a 64°C).

² Condições severas: velocidade menor que 60 km/h, intersecções, terceira faixa, praças de pedágio, tráfego canalizado, paradas de ônibus e temperatura elevada (superior a 64°C).

5.5.3. Fadiga: ensaio uniaxial cíclico à tração-compressão

O trincamento por fadiga é um dos problemas críticos que ocorre em pavimentos flexíveis, e segundo Nascimento (2015), é a principal manifestação patológica nos pavimentos brasileiros. Muitos autores citam que a fadiga é resultado de trincas induzidas por carregamento

repetido devido a níveis de tensões e deformações inferiores aos estados últimos (ruptura) de tensão e deformação do material, que pouco a pouco desenvolvem alterações em sua estrutura interna, perda das características originais, e rompimento do material (YODER e WITCZAK, 1975; PREUSSLER et al., 1981; PINTO, 1991; BALBO, 2007).

A danificação por fadiga leva à perda de rigidez do revestimento asfáltico. Esta perda de rigidez resulta em maiores deformações, e o acúmulo destas ao fenômeno de fadiga (DI BENEDETTO et al., 2004). A fadiga nos pavimentos flexíveis apresenta uma natureza complexa, e se relacionam a diversos fatores como o projeto estrutural, que contempla as espessuras das camadas, as características mecânicas dessas camadas e as interações entre si, condições climáticas e do tráfego e, por fim, do concreto asfáltico. Em misturas recicladas, devido às propriedades do material RAP, a danificação por fadiga é um problema recorrente principalmente em altos teores (YOU e GOH, 2008; WEST et al., 2011; MOGAWER et al., 2012; ANDERSON e DANIEL, 2013; SABOURI et al., 2015; SONG et al., 2018).

Assim como citado no Capítulo 4, um teste de avaliação por fadiga em misturas sensíveis ao envelhecimento e rejuvenescimento é necessário para se projetar misturas recicladas com alto teor de RAP. Assim, busca-se avaliar os materiais utilizados e projetar misturas recicladas com base no desempenho e no balanceamento com a deformação permanente.

Dentre esses ensaios e modelos de análise, encontram-se o teste uniaxial cíclico de fadiga à tração-compressão e o modelo S-VECD, respectivamente. Este teste tem a vantagem de permitir o acesso direto ao comportamento do material, sem qualquer cálculo de fundo ou hipótese, pois é dito homogêneo (DI BENEDETTO et al., 2004), ou seja, ao analisar a seção transversal da amostra, todos os pontos estão experimentando a mesma solicitação no mesmo instante de tempo. Assim, as misturas asfálticas foram avaliadas à fadiga pelo teste de tração-compressão direta conforme a AASHTO TP 107-18 (2018).

O teste de tração-compressão com controle de deslocamento do atuador (Controlled Crosshead- CX) foi conduzido a 10 Hz em diferentes temperaturas, de acordo com o nível de rigidez de cada mistura, de modo que se tenha na condição de teste $|E^*|$ na faixa de 7000 a 12500 MPa. Os testes foram realizados na UTM 25 em amostras de 100 mm de diâmetro, 130 mm de altura e volume de vazios de $5.5 \pm 0.5\%$, com a aplicação de diferentes níveis de amplitude de deformação pico a pico (cerca de 150, 200, 250, 300 e 350 μm) de forma a criar uma dispersão de números de ciclos até a falha entre 1000 a 100.000 ciclos.

O modelo S-VECD foi utilizado para a caracterização do dano por fadiga a partir dos resultados experimentais do teste. A estrutura de análise do modelo é apresentada na Tabela 36, e maiores detalhes são encontrados em Underwood et al. (2012).

Tabela 36 - Estrutura de análise S-VECD

Propriedade	Misturas (Uniaxial cíclico de tração-compressão)	
Pseudo deformação	$\varepsilon^R = \begin{cases} \varepsilon^R = \frac{1}{E_R} \int_0^\xi E(\xi - \tau) \frac{\partial \varepsilon}{\partial \tau} d\tau & \xi \leq \xi_p \\ (\varepsilon_{0,ta}^R)_{ciclo\ i} = \frac{1}{E_R} \times \frac{\beta+1}{2} \times ((\varepsilon_{0,pp})_i) \times E^* _{LVE} & \xi > \xi_p \end{cases}$	
Pseudo rigidez	$C = \begin{cases} C = \frac{\sigma}{\varepsilon^R \cdot DMR} & \xi \leq \xi_p \\ C^* = \frac{(\beta + 1)}{2} \times \frac{\sigma_{0,pp}}{(\varepsilon_{0,ta}^R) \cdot DMR} & \xi \leq \xi_p \end{cases}$	
Dano	$dS = \begin{cases} (dS_{transiente})_j = \left[-\frac{DMR}{2} (\varepsilon^R)_j^2 (\Delta C_j) \right]^{\frac{\alpha}{1+\alpha}} \cdot [\Delta_j]^{\frac{1}{1+\alpha}} & \xi \leq \xi_p \\ dS_{ciclo\ i} = \left[-\frac{DMR}{2} (\varepsilon_{0,ta}^R)^2 \Delta C_i \right]^{\frac{\alpha}{1+\alpha}} \cdot [\Delta N_i \cdot \xi_p \cdot K_1]^{\frac{1}{1+\alpha}} & \xi \leq \xi_p \end{cases}$	
Termos da equação	$DMR = \frac{ E^* _{fingerprint}}{ E^* _{LVE}}$ $\beta = \frac{(\sigma_{peak})_i + (\sigma_{valley})_i}{ \sigma_{peak} _i + \sigma_{valley} _i}$ $K_1 = \frac{1}{\xi_f - \xi_i} \left[\frac{1}{\beta + 1} \int_{\xi_i}^{\xi_f} (\beta - \cos(2\pi ft))^{2\alpha} d\xi \right]$ $\xi_{inicial} = \frac{\cos^{-1}(\beta)}{2\pi f}$ $\xi_{final} = \frac{1}{f} - \frac{\cos^{-1}(\beta)}{2\pi f}$	
Parâmetros	ε^R = pseudodeformação; E_R = módulo de referência arbitrário para ser 1; $E(\xi)$ = módulo de relaxação LVE; ξ = tempo reduzido = t/a_T τ = termo de integração; ε = deformação; $\varepsilon_{0,ta}^R$ = amplitude de pseudo-deformação β = fator de forma de carga; $\varepsilon_{0,pp}$ = pico a pico da amplitude de deformação; DMR= razão do módulo dinâmico; dS= incremento de crescimento de dano durante a etapa de cálculo.	$(\sigma_{0,pp})$ = pico a pico da amplitude de tensão; ΔC_j = variação de C entre <i>steps</i> j e j-1; ΔC_i = variação de C entre ciclo i e i- ΔN_i ; α = taxa de evolução do dano; $\Delta \xi$ = diferença finita entre tempo reduzido em <i>steps</i> de tempo consecutivos j e j-1; ΔN_i = variação no número de ciclo; K_1 = fator de forma de carregamento; ξ_i = tempo reduzido inicial quando o dano começa em carregamento cíclico; ξ_f = tempo reduzido final quando o dano para de mudar em carregamento cíclico;

Fonte: Adaptado de Schuster et al. (2021)

Juntamente com o comportamento LVE das misturas (seção 5.5.1), ajustadas ao modelo sigmoidal, o S-VECD forneceu as curvas características de dano (C vs S), que é a relação entre a integridade (pseudo-rigidez, C) e a quantidade de dano (S), sendo única para um determinado material, independente do modo de carregamento, temperatura, taxa de carregamento e amplitude de carga. As curvas C vs S foram ajustadas por um modelo de potência (Equação 37), C_{11} e C_{12} sendo os coeficientes da regressão.

$$C(S) = 1 - C_{11} \cdot S^{C_{12}} \quad (37)$$

Devido aos diferentes níveis de rigidez das misturas recicladas como resultado dos efeitos do envelhecimento e rejuvenescimento, o modelo S-VECD pode fornecer resultados confiáveis sobre as propriedades de fadiga das misturas recicladas, pois mede uma propriedade fundamental do material que é independente das condições de teste.

A falha da amostra durante o teste foi com base no ciclo em que ocorre a queda do ângulo de fase (RESSE, 1997). A avaliação da vida de fadiga foi baseada em dois critérios de ruptura: o G^R e o D^R . O G^R , desenvolvido em Sabouri e Kim (2014), representa a taxa média de energia de pseudo deformação liberada por ciclo de ensaio e foi calculada pela Equação 38. Este critério, que já fora apresentado sua adaptação em ligantes, apresenta grande acurácia na previsão da vida de fadiga das misturas asfálticas (NASCIMENTO, 2015; SAFEI, 2017; SCHUSTER, 2018).

$$G^R = \frac{W_C^R}{Nf} = \frac{\int_0^{Nf} W_C^R}{(Nf)^2} \quad (38)$$

Onde W_C^R é a pseudo energia de deformação liberada por ciclo. Os envoltórios de ruptura G^R vs Nf foram ajustadas ao modelo de potência da Equação 39, onde Y e Δ são os coeficientes da regressão.

$$G^R = Y \cdot Nf^\Delta \quad (39)$$

O critério do D^R , desenvolvido por Wang e Kim (2017), representa a redução média da pseudo rigidez até a falha. O critério utiliza a redução média da pseudo rigidez (C) até a falha, sendo o D^R calculado pela soma de (1-C) dividida pela vida de fadiga (Nf) para as amostras

individualmente (Equação 40). O D^R médio do grupo de amostra é então atribuído à mistura asfáltica. Um maior valor de D^R está associado à uma maior capacidade de acúmulo de danos na mistura, ou capacidade de dissipar energia até o momento da ruptura.

$$D^R = \frac{\int_0^{N_f} (1-C) dN}{N_f} \quad (40)$$

Duas soluções analíticas para simulação da vida de fadiga das misturas foram utilizadas com base nos resultados LVE e nos envoltórios de ruptura do G^R e D^R . A primeira utiliza a abordagem do G^R proposta em Santos et al., (2020). A segunda utiliza a abordagem do D^R proposta em Wang, Underwood e Kim (2020). As simulações foram realizadas nas deformações de 100, 125, 150 e 200 μ s. A área sob a curva de N_f x deformação, denominada de Fator de Fadiga de Misturas (FFM), permitiu ranquear as misturas de acordo com suas respostas aos níveis de deformação simuladas.

Como citado no início da seção, a resposta à fadiga de pavimentos flexíveis depende de outros fatores além das propriedades da mistura asfáltica. Assim, para avaliar se os diferentes efeitos como resultado do envelhecimento e rejuvenescimento no comportamento das misturas levam a níveis significativos de variação na resposta ao dano por fadiga, considerando os demais fatores como projeto estrutural, espessura e características mecânicas das camadas, tráfego e clima, foi utilizado o software FlePAVE™.

A abordagem mecanicista do software está bem estabelecida como modelo preditivo de desempenho ao longo do tempo por fornecer respostas satisfatória ao correlacionar o comportamento simulado em laboratório ao medido em campo (NASCIMENTO, 2015, WANG, KESHAVARZI e KIM, 2018b; WANG, 2019, BUENO et al., 2020; WANG et al., 2021).

A estrutura típica de pavimento consistiu em uma camada de concreto asfáltico com 100 mm; camada de base granular de 150 mm, módulo de 202 MPa e Poisson de 0,3; sub-base granular de 200 mm, módulo 197 MPa e Poisson de 0,4; e subleito com módulo de 84 MPa e Poisson de 0,45. O dado climático considerou um Modelo Climático Integrado Aprimorado (EIMC) com informações para San Diego, Califórnia (EUA), cujas variações térmicas são semelhantes às observadas na região sul do Brasil.

O parâmetro utilizado para caracterizar o tráfego foi o número diário de solicitações impostas por eixo simples de rodas duplas de 80 kN, com pressão de inflação dos pneus de 0,80 MPa, dispostos em uma área de contato retangular com relação comprimento/largura de 1,5714

e velocidade de 80 km/h. Um número de 3500 passadas diárias foi considerada, com uma taxa de crescimento anual de 3% ao ano, resultando em um N aproximado de $4,7 \times 10^7$ repetições ao final dos 25 anos de análise.

Os gráficos com a evolução do dano médio acumulado (N/Nf) na malha de 110 pontos (Nascimento, 2015) distribuídos ao longo da espessura do revestimento asfáltico submetidos a fissuração foram gerados para todas as misturas ao longo do período e N de projeto. Assim, permitiu-se observar a variação de comportamento entre as diferentes misturas quando colocadas em mesma estrutura e sujeitas às mesmas condições meteorológicas e de tráfego. As curvas de dano médio acumulado representam para (N/Nf = 1) o consumo total de vida em fadiga, enquanto (N/Nf = 0) representa a camada não danificada. Para análise de desempenho, foram utilizados os critérios do G^R e do D^R .

Por fim, os danos médios acumulados ao final do período simulado foram correlacionados aos dados dos respectivos ligantes asfálticos da seção 4.6.2.5, como o ciclo de falha (Nf) do LAS 300, 600 e 1200, com as diferentes equações de simulação da vida de fadiga nos níveis de deformação de 1%, 2,5% e 5%, e com o FFL determinado entre 1% e 2,5%, entre 2,5% e 5%, e entre 1% e 5%.

Assim, a partir das melhores correlações, foi possível definir os parâmetros e abordagens em ligantes para selecionar e dosar o agente rejuvenescedor com base no fenômeno de fadiga.

5.6. RESULTADOS

Esta seção apresenta os resultados e análises a partir do programa experimental da Figura 160. Primeiramente são apresentados os resultados de caracterização do DoA para ambos os materiais RAPs, que forneceram as condições de processamento e temperatura para produção das misturas asfálticas. Posteriormente os efeitos do envelhecimento e rejuvenescimento nas propriedades LVE, de deformação permanente e fadiga são exibidos, abordados e discutidos. O método do coeficiente de determinação R^2 foi utilizado para os mesmos propósitos de correlacionar diferentes variáveis investigadas, conforme a Tabela 15.

5.6.1. Determinação do Degree of Binder Activity

As duas fontes de RAP foram investigadas quanto ao grau de ativação de acordo com as diferentes temperaturas de condicionamento e compactação conforme procedimento descrito na seção 5.4.1. A temperatura de máxima ativação foi utilizada como condição de processamento entre o material RAP e agente rejuvenescedor (e ligante HiMA) para produção das amostras para os testes reológicos e de desempenho.

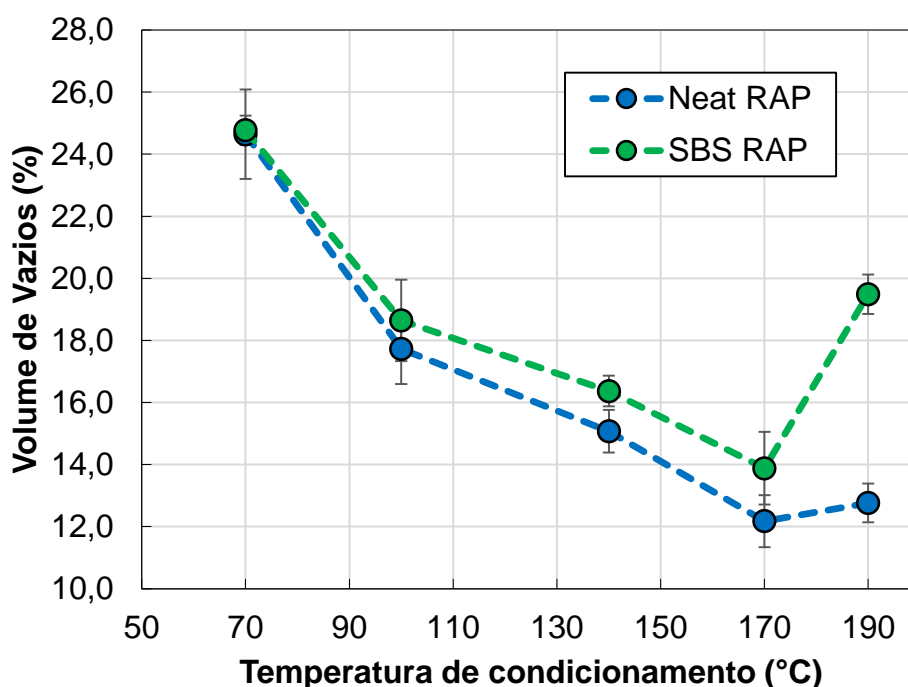
A Figura 164 apresenta as amostras compactadas no compactador Marshall após o condicionamento nas diferentes temperaturas investigadas. A análise visual prévia permite obter uma conclusão a partir de três verificações: o gradiente de tonalidade mais claro para o mais escuro, agregados visíveis para totalmente recobertos, e uma maior densificação das amostras já fornece um indicativo da maior ativação em temperaturas mais altas.

Figura 164 – Amostras compactadas após condicionamento em temperaturas de 70 a 190°C para determinação da máxima ativação das duas fontes de RAP



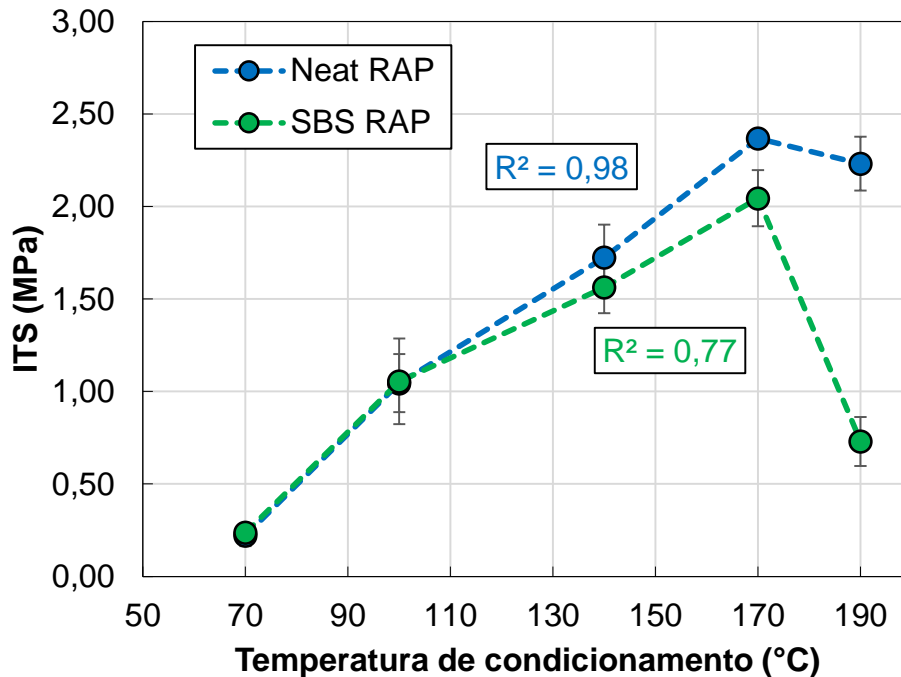
O volume de vazios médios medidos nas amostras 100%RAP nas diferentes temperaturas de condicionamento estão apresentadas na Figura 165. Os resultados demonstram que os vazios de ar diminuem com o aumento da temperatura de condicionamento até 170°C para as duas fontes de RAP. Essa redução no Vv pode ser atribuída ao aumento do ligante disponível e diminuição da viscosidade do ligante que juntos resultam em maior densificação e compactabilidade dos materiais. Após 170°C, o Vv volta a subir, o que pode indicar um superaquecimento ou desbalanceamento químico que interfere no processo de densificação do material.

Figura 165 – Volume de vazios de amostras 100% RAP densificadas no compactador Marshall em diferentes temperaturas de condicionamento



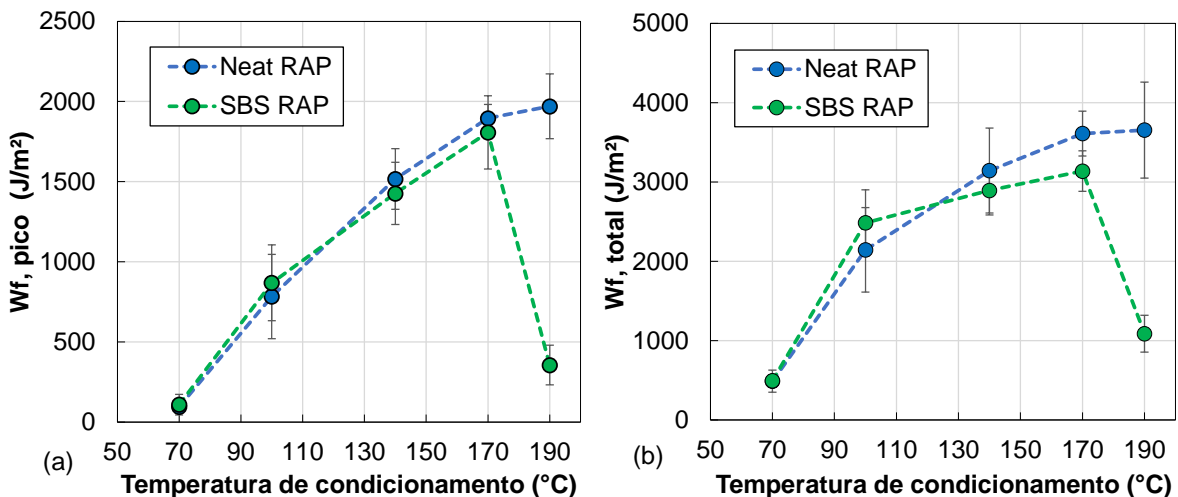
Os valores médios de IDT determinados por cinco amostras para cada temperatura de condicionamento são exibidos na Figura 166. Verifica-se que a curva IDT vs temperatura de condicionamento é um espelhamento na vertical da curva Vv vs temperatura de condicionamento, com alto valor de Vv resultando em baixos valores de IDT. Os resultados apresentados foram melhor ajustados a um modelo parabólico, assim como a maioria (24) das 38 fontes de RAP do mundo todo em trabalho conduzido no TG5 (Lo Presti et al., 2020). Uma observação genérica sugere que o valor médio de ITS aumenta até 170°C, reduzindo em 190°C. Esta tendência retrata o efeito do Vv que exibiu tendência similar, porém oposta ao ITS.

Figura 166 – ITS de amostras 100% RAP densificadas no compactador Marshall em diferentes temperaturas de condicionamento



Os parâmetros energéticos em valores médios extraídos do teste ITS estão apresentados na Figura 167 em função da temperatura de condicionamento e compactação. Os resultados mostram que a energia total e a energia até o pico tendem a aumentar com a temperatura até 170°C, e depois diminui (SBS RAP) ou tende a ser constante (Neat RAP) até 190°C. Wf total foi determinado a partir da área sobre a curva tensão-deformação do teste ITS, ou seja, a variável pode ser explicada tanto pela carga de pico quanto pela deformação da curva.

Figura 167 – Parâmetros energéticos de Wf, pico (a) e Wf, total (b) determinados a partir do teste ITS em diferentes condições de temperatura

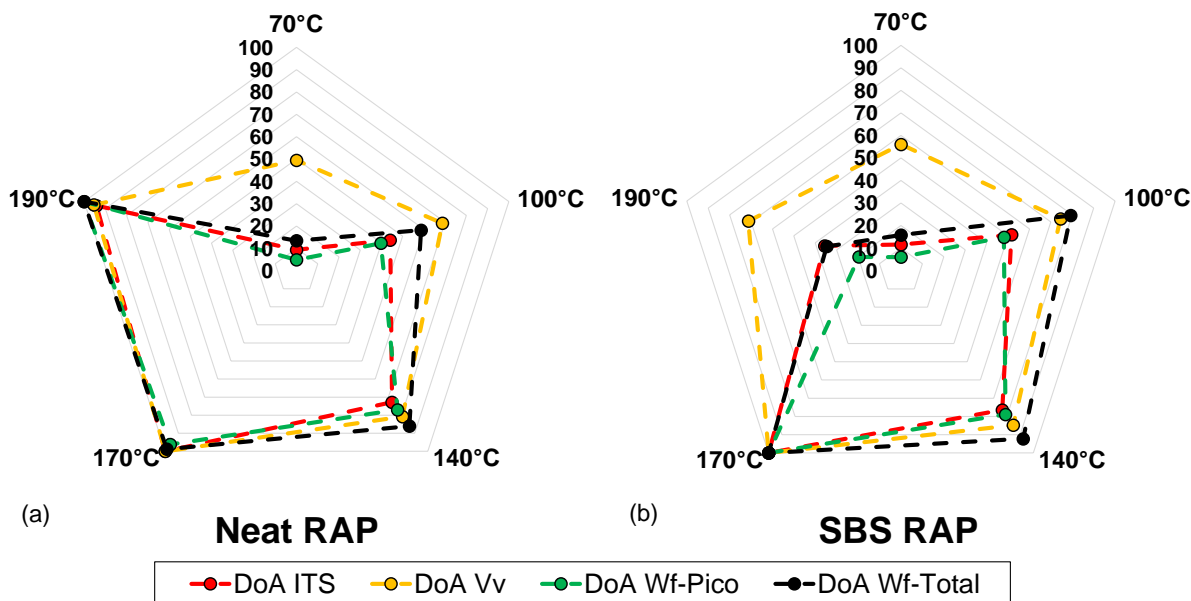


Assim, a inclinação positiva do Wf total até 170°C é um indicativo da dominância de coesão alcançada pela mistura devido ao aumento da disponibilidade de ligante devido sua “ativação”. A redução ou a constância de Wf total após 170°C é uma indicação do efeito quebradiço do ligante devido ao “superaquecimento” prepondera sobre o aumento da coesão identificado até o pico do Wf total vs temperatura de condicionamento. Wf pico seguiu tendência similar ao Wf total.

Com base nos resultados, o DoA de cada fonte de RAP foi calculado a partir dos diferentes índices conforme a Equação 41. Assim, presume-se que no Vv mínimo, no ITS máximo, no Wf pico e Wf total máximos ocorre a máxima ativação dos materiais. Os resultados são exibidos na Figura 168. Nota-se que há uma convergência a partir de todas as propriedades analisadas que a temperatura de máxima ativação para as duas fontes de RAP ocorre em 170°C.

$$DoA = \frac{Vv_{\text{mínimo}}}{Vv_{\text{temperatura}}} = \frac{ITS_{\text{Temperatura}}}{ITS_{\text{Máximo}}} = \frac{Wf_{\text{total Temperatura}}}{Wf_{\text{total Máximo}}} = \frac{Wf_{\text{pico Temperatura}}}{Wf_{\text{pico Máximo}} \quad (41)$$

Figura 168 – DoA (%) do Neat (a) e SBS (b) RAP determinado por diferentes índices e temperaturas de condicionamento

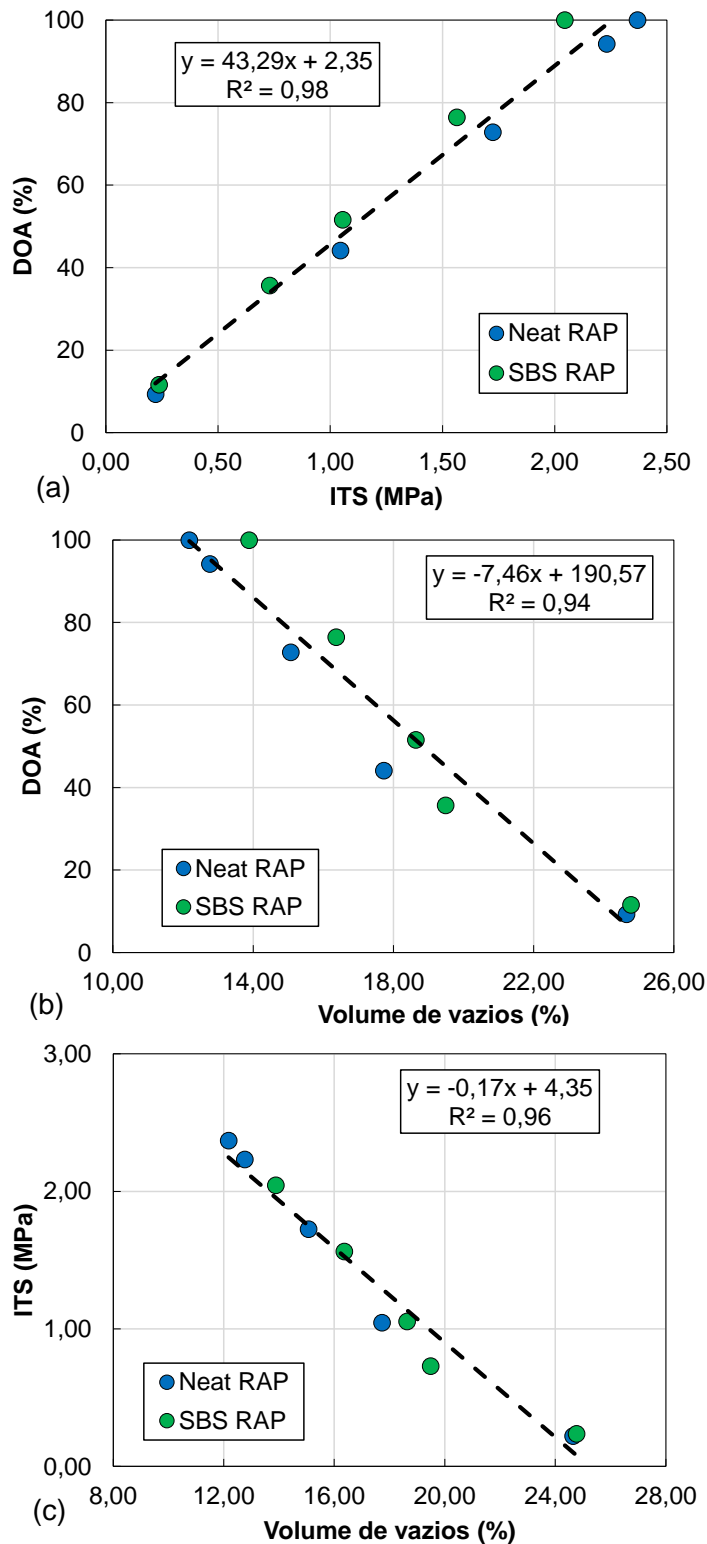


Para o material Neat RAP, o Vv e ITS indicam máxima ativação em 170°C. No entanto, os parâmetros energéticos (Wf total e Wf pico) não indicam queda entre 170°C e 190°C, e sim uma constância nos valores médios entre as duas temperaturas.

Ao se verificar a barra de erro apresentada pelos diferentes parâmetros avaliados na Figura 165, Figura 166 e Figura 167, nota-se uma maior dispersão nos resultados com relação

aos índices energéticos. Assim, neste trabalho adotou-se o Vv e o ITS para obtenção da temperatura de máxima ativação, pois uma excelente correlação linear ($R^2 > 0,90$) entre DoA vs ITS (a), DoA vs Vv (b) e ITS vs Vv (c) foi identificada conforme apresentado na Figura 169.

Figura 169 – Correlação entre os resultados de DoA vs ITS (a), de DoA vs Vv (b) e de ITS vs Vv (c) para as misturas em diferentes temperaturas



A partir dos resultados determinou-se a temperatura de 170°C para condicionamento do RAP em estufa por 3 horas para obtenção do equilíbrio térmico do material. Posteriormente o material RAP foi misturado com diferentes concentrações de agente rejuvenescedor e o ligante HiMA no misturador mecânico em temperatura entre 165°C e 170°C, conforme descrito na seção 5.4.2. Após o processo de misturas, as amostras foram acondicionadas em estufa por 2 horas.

Após 2 horas em estufa, as amostras para os testes reológicos e de comportamento à deformação permanente e fadiga foram produzidas no CSG em temperatura entre 155°C e 160°C. A redução da temperatura para produção das amostras foi devido a facilidade de densificação observada na temperatura de 170°C após a mistura entre o material RAP e agente rejuvenescedor e HiMA. No entanto, mesmo com temperatura de compactação entre 155°C e 160°C, a facilidade de densificação continuou a ser observada, sendo necessários entre 12 a 30 giros no CGS para produção de todas as misturas recicladas.

A Figura 170, a Figura 171 e a Figura 172 exibem visualmente o resultado da influência da temperatura de ativação juntamente com as diferentes concentrações do AR. Em termos de homogeneização, verifica-se que o processamento do RAP na temperatura de máxima ativação com o AR originou misturas homogêneas e agregados totalmente recobertos, com aspecto de misturas asfálticas com materiais virgens.

Figura 170 – Amostra 100% RAP sem AR (a), com 8% (b), 12% (c) e 16% (d) de AR

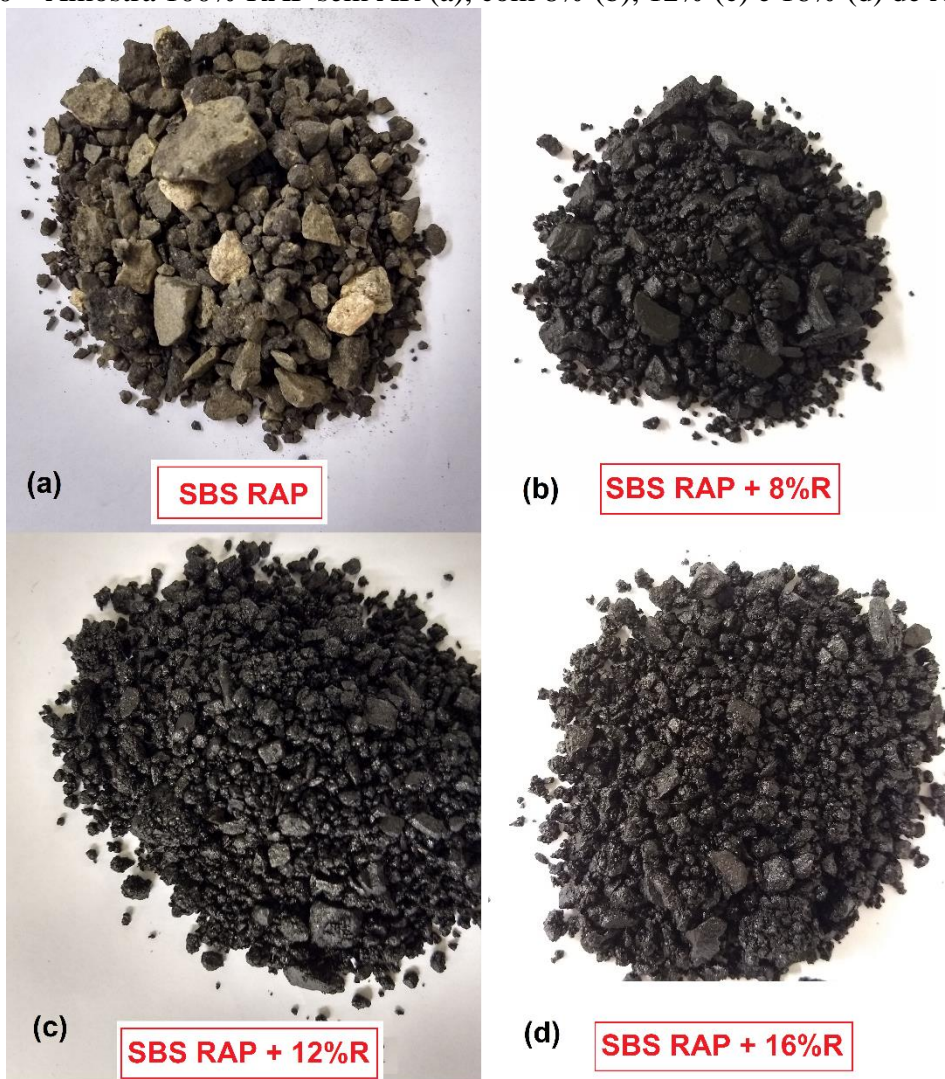


Figura 171 – Amostra 100% RAP pré (a) e pós (b) mistura com o AR



Figura 172 – Amostras para testes mecânicos com diferentes concentrações de AR



5.6.2. Caracterização Linear Viscoelástica

A caracterização viscoelástica linear foi realizada a partir dos resultados médios de três amostras por mistura no teste de módulo complexo, submetidos a uma varredura de frequência (0,1 a 25 Hz) e temperatura (-10 a 54°C). Os coeficientes de translação (aT) para construção das curvas mestras ($T_{ref} = 21^\circ\text{C}$) e os coeficientes de ajuste pelo WLF estão apresentados na Tabela 37.

Tabela 37 – Coeficientes de translação (aT) para $T_{ref} = 21^\circ\text{C}$ e coeficientes do WLF

Misturas	log (aT)					WLF	
	-10	4	21	37	54	C1	C2
Neat RAP	5,25	2,65	0,00	-2,56	-4,56	48,05	314,75
Neat RAP + 8%R	5,10	2,72	0,00	-2,20	-3,60	20,72	156,96
Neat RAP + 12%R	5,50	2,72	0,00	-2,30	-3,70	22,49	167,60
Neat RAP + 16%R	5,10	2,72	0,00	-2,30	-3,60	20,72	156,94
Neat RAP + 8%R + 1%HiMA	4,90	2,50	0,00	-2,10	-3,70	22,53	167,96
Neat REF	5,05	2,85	0,00	-2,40	-4,07	23,90	160,76
SBS RAP	5,30	2,72	0,00	-2,70	-4,60	48,14	312,55
SBS RAP + 8%R	5,10	2,72	0,00	-2,20	-3,60	20,06	150,93
SBS RAP + 12%R	5,10	2,72	0,00	-2,20	-3,80	24,54	180,15
SBS RAP + 16%R	5,10	2,72	0,00	-1,90	-3,60	20,06	150,93
SBS RAP + 8%R + 1%HiMA	4,90	2,60	0,00	-1,90	-3,60	23,88	186,22
SBS REF	5,60	3,10	0,00	-2,30	-3,80	29,22	192,75

A Figura 173 exibe os efeitos da adição de diferentes teores do AR R nos fatores de deslocamento das misturas Neat (a) e SBS (b). A adição do agente rejuvenescedor resulta em redução nos valores de aT nas temperaturas inferiores a T_{ref} , e aumento de aT nas temperaturas superiores a T_{ref} , revertendo os efeitos do envelhecimento em nível de mistura asfáltica, tendência similar obtida na escala de ligantes (Figura 103 da seção 4.6.2.2).

As Figura 174 e Figura 175 apresentam o plano cole cole (a), diagrama black (b), curvas mestras de módulo dinâmico (c – d) e ângulo de fase (e) para as misturas Neat e SBS, respectivamente. A partir dos resultados, é possível identificar:

- Um aumento do $|E^*|$ e diminuição do Φ com o envelhecimento quando se compara as misturas de REF e RAP. Alterações em $|E^*|$ e Φ são mais intensas em baixas frequências reduzidas (altas temperaturas) do que em altas frequências reduzidas (baixas temperaturas), similar ao identificado na escala ligante;
- A ação do AR em relação ao módulo de armazenamento é identificada no deslocamento da curva no sentido de redução do módulo de armazenamento (pontos destacados no gráfico Cole-Cole em -10°C e $0,1\text{Hz}$), similar ao comportamento na escala de ligantes (Figura 105). Assim, o AR confere as misturas um menor potencial de armazenar energia recuperável e maior dissipação de energia considerando uma mesma temperatura de análise;
- As misturas Neat e SBS RAP não apresentam o pico do ângulo de fase na condição extrema de ensaio (54°C e $0,1\text{ Hz}$), ou seja, o ligante envelhecido confere à mistura elevada rigidez e elasticidade. A partir da adição de 8% de AR, o pico do ângulo de fase é reestabelecido nas condições do teste;
- O pico do ângulo de fase nas misturas com AR e AR + HiMA é identificado em $|E^*|$ aproximado de 1000 MPa e frequência reduzida de $0,01\text{ Hz}$, similar para misturas com materiais virgens de Schuster et al., (2021). Além disso, o pico do ângulo de fase é deslocado no sentido das altas frequências, que segundo o autor, é uma forte correlação e indicativo de maior tolerância ao dano por fadiga.

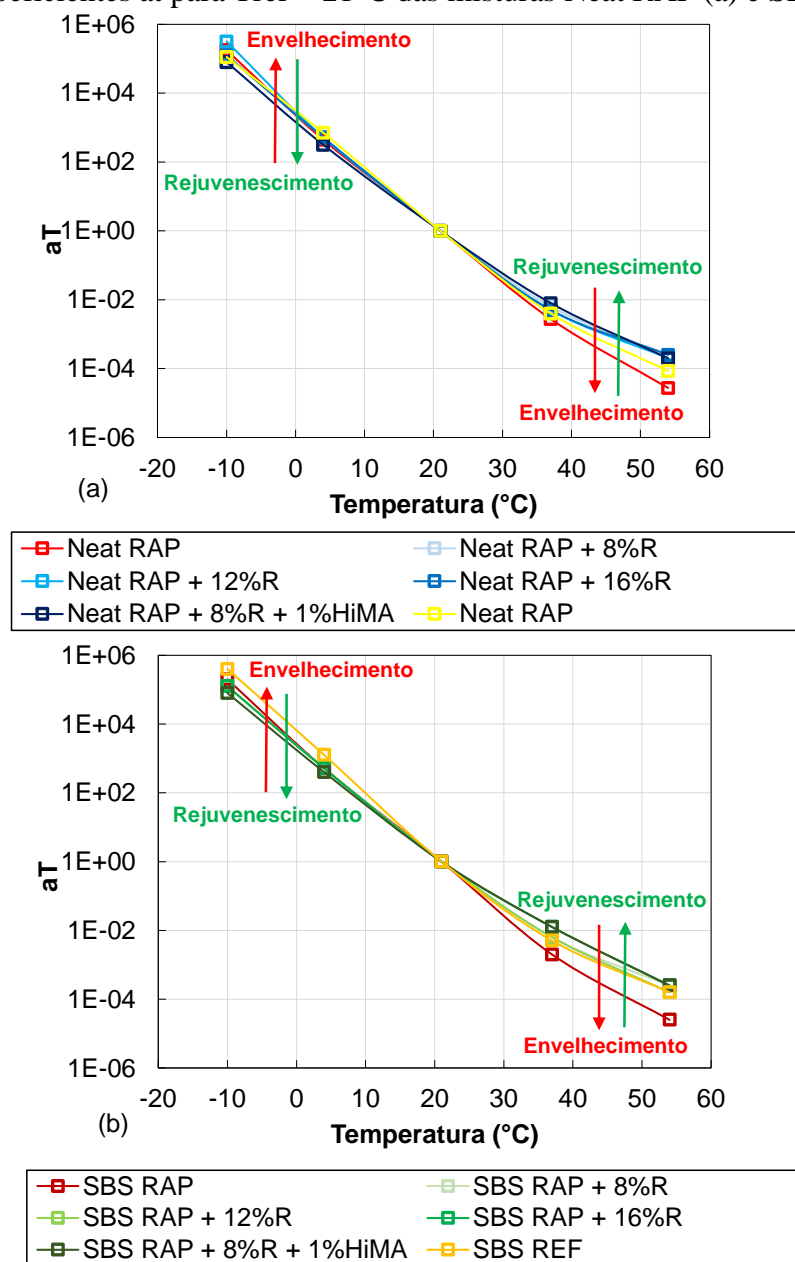
Figura 173 – Coeficientes a_T para $T_{ref} = 21^\circ\text{C}$ das misturas Neat RAP (a) e SBS RAP (b)

Figura 174 – Espaço cole-cole (a), diagrama black (b), curvas mestras de módulo dinâmico (c - d) e ângulo de fase (e) para as misturas Neat RAP com diferentes concentrações do AR R. Tref = 21°C.

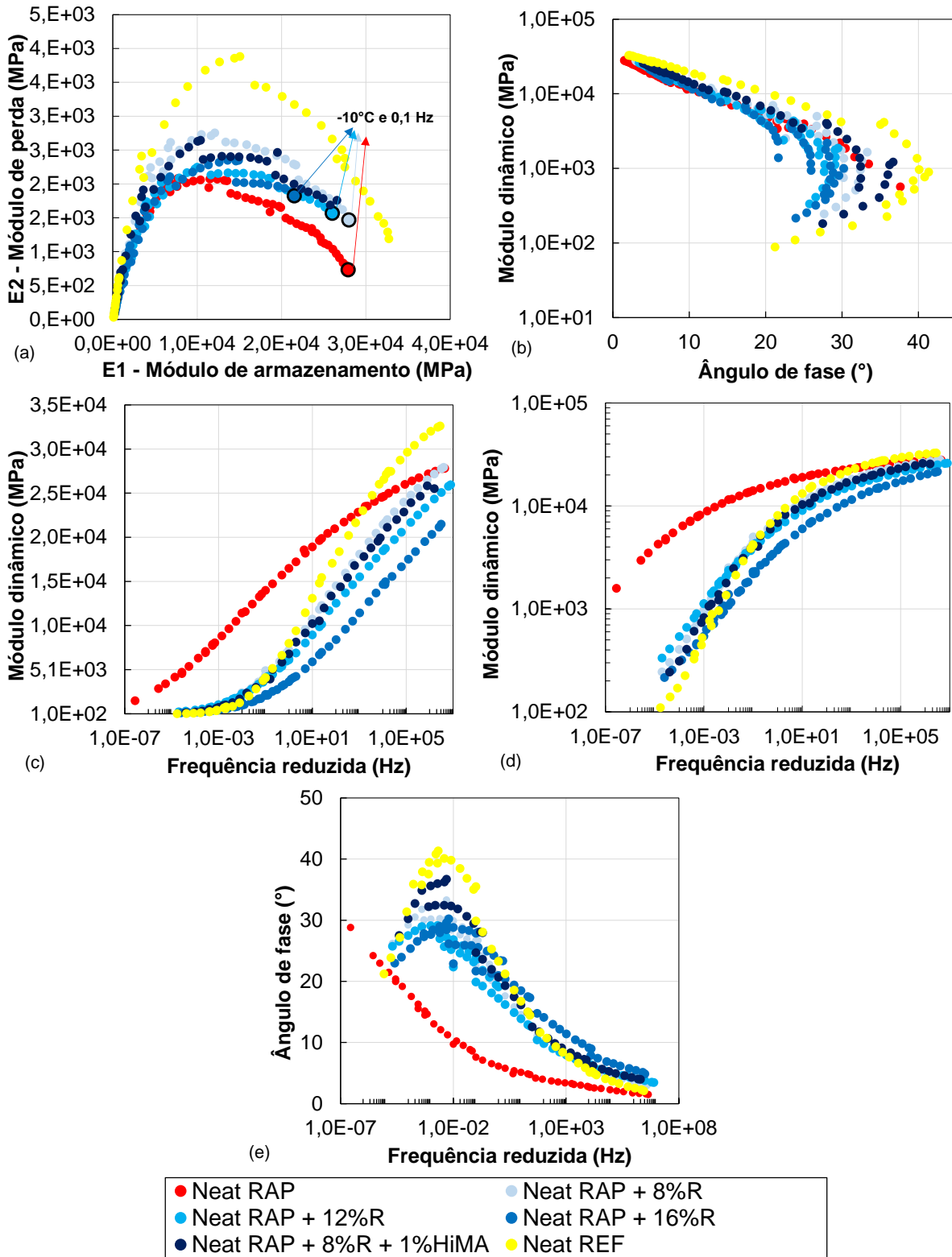
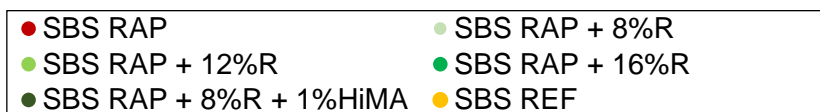
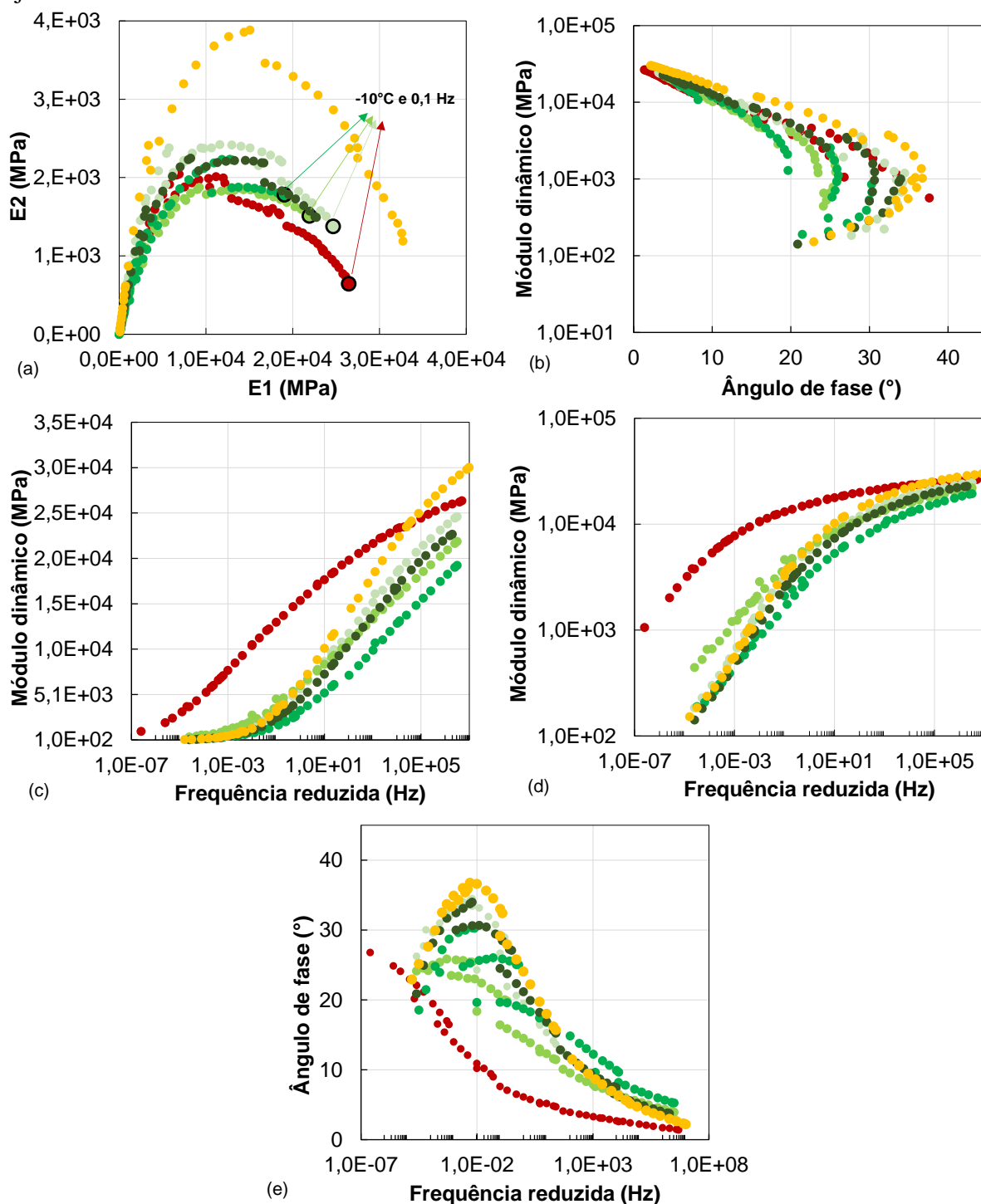


Figura 175 – Espaço cole-cole (a), diagrama black (b), curvas mestras de módulo dinâmico (c - d) e ângulo de fase (e) para as misturas SBS RAP com diferentes concentrações do agente rejuvenescedor R. Tref = 21°C.



Por fim, verifica-se a partir do espaço cole-cole, diagrama black e curvas mestra de ângulo de fase a não unicidade das curvas nas misturas com AR. Conforme reportado em Di Benedetto et al. (2004), Mangiafico (2014), Nguyen et al. (2013) e Olard e Di Benedetto (2003), a não unicidade é característica de materiais betuminosos modificados por polímeros, resultando em comportamento não termorreologicamente simples. No entanto, foi possível obter uma curva mestra aplicando fatores de deslocamento às curvas isotérmicas para uma temperatura de referência, e neste caso, diz-se que o material atende parcialmente o princípio TTSP.

No entanto, foi verificado no Capítulo 4 que o efeito do envelhecimento resulta em perda das propriedades elásticas conferidas pelo polímero, e que a simples inserção dos agentes à base de óleo não recuperam as propriedades de relaxação do polímero. Assim, a similaridade entre o comportamento das misturas recicladas aos materiais betuminosos poliméricos deve ser maior investigado e não faz parte do escopo da pesquisa.

Com o objetivo de comparar valores específicos experimentais e avaliar numericamente o efeito do envelhecimento e do rejuvenescimento nas propriedades de rigidez e relaxação, a Figura 176 apresenta os valores médios de $|E^*|$ e Φ (@ 10 Hz e -10 a 54°C) para as misturas Neat (a) e SBS (b). Uma tabela resumo com a variação percentual entre as misturas com AR, com AR + HiMA e sem AR é exibida no rodapé de cada gráfico. Os dados da tabela sugerem quanto ao envelhecimento:

- Maior intensidade de aumento nos valores de $|E^*|$ em altas temperaturas do que em temperaturas intermediárias. Verifica-se que as misturas Neat REF e SBS REF exibiram menor rigidez, na ordem de 31% a 42% em 21°C e de 88% a 93% em 54°C, com comparação aos Neat RAP e SBS RAP, respectivamente, similar ao identificado na escala de ligantes.

Os dados da tabela sugerem quanto ao rejuvenescimento:

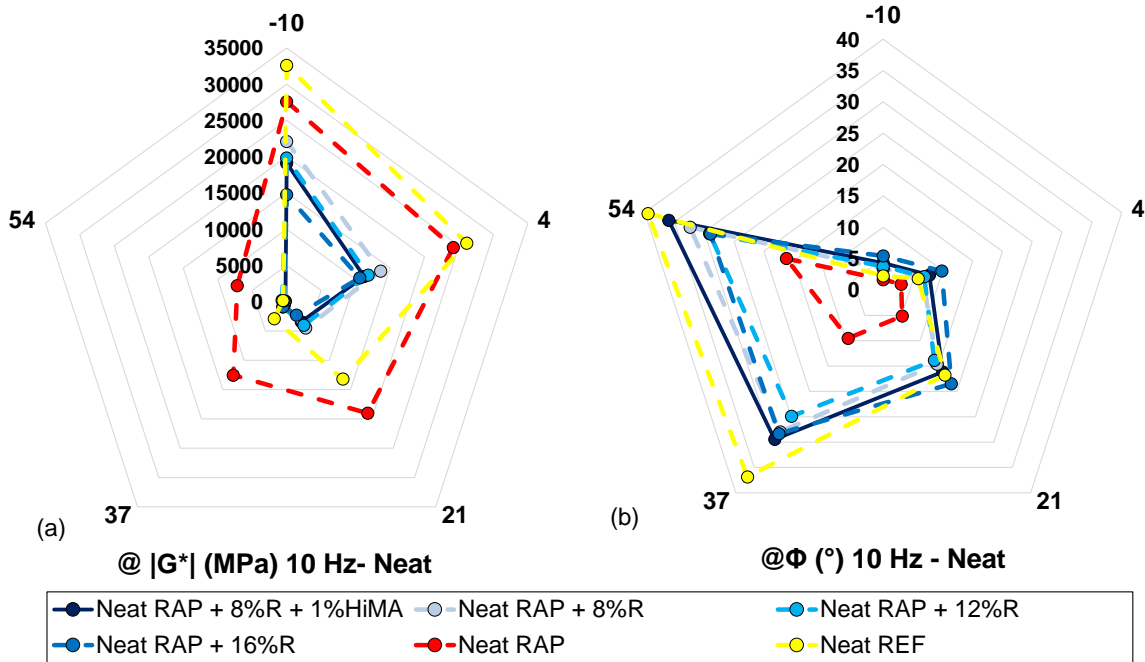
- Redução da rigidez com o aumento do teor do AR principalmente nas temperaturas altas e intermediárias. Em termos numéricos, a redução da rigidez foi mais significativa em alta temperatura (de 75 a 89%) e menos significativa em temperatura intermediária (43% a 70%);
- Baixos teores de AR são suficientes para reestabelecer o nível de rigidez em baixa e intermediária temperatura das misturas RAP em comparação as suas respectivas

misturas de referência. No entanto, para reestabelecer o nível de rigidez em alta temperatura, são exigidos maiores teores de AR, assim como identificado na escala de ligantes;

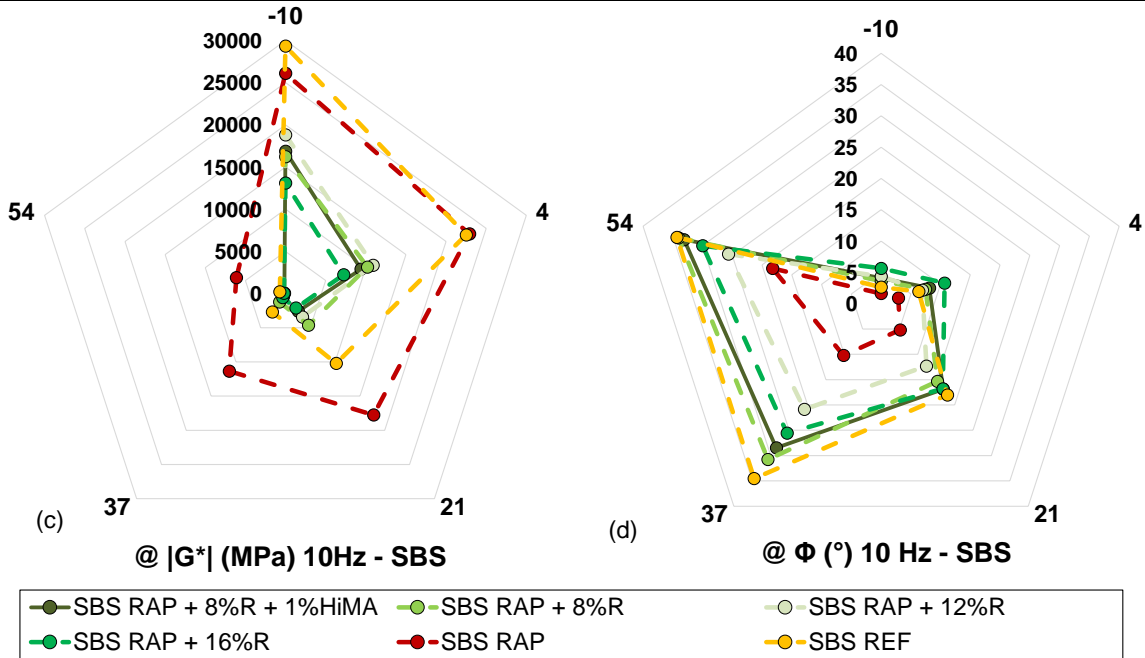
- As misturas rejuvenescidas podem ser mais flexíveis em cenários de alta e intermediária rigidez e menos flexíveis em cenários de baixa rigidez do que misturas produzidas com materiais virgens.

Portanto, o agente rejuvenecedor revertou alguns dos efeitos do envelhecimento a nível de misturas asfálticas, reestabelecendo as propriedades viscoelásticas como redução da rigidez e aumento do ângulo de fase. No entanto, foi verificado que o comportamento LVE geral das misturas rejuvenescidas resultou em misturas mais rígidas e menos flexíveis em altas temperaturas, e menos rígidas e mais flexíveis em temperaturas intermediárias e baixas quando comparadas às misturas com materiais virgens. Assim, tem-se misturas com um comportamento peculiar e que o resultado no comportamento à deformação permanente e à fadiga estão avaliadas nas próximas seções.

Figura 176 – Comparativo de $|E^*|$ e Φ em 10 Hz de -10 a 54°C para as misturas Neat (a, b) e SBS (c, d) RAP com as demais misturas recicladas e de referência



°C	Neat RAP + 8%R		Neat RAP + 12%R		Neat RAP + 16%R		Neat RAP + 8%R + 1%HiMA		Neat REF	
	Δ redução $ E^* $	Δ aumento δ	Δ redução $ E^* $	Δ aumento δ	Δ redução $ E^* $	Δ aumento δ	Δ redução $ E^* $	Δ aumento δ	Δ redução $ E^* $	Δ aumento δ
-10	1%	205%	9%	227%	26%	327%	10%	258%	-18,09%	137%
4	15%	219%	27%	229%	43%	325%	26%	257%	-8,08%	194%
21	43%	285%	52%	270%	69%	360%	51%	315%	30,65%	326%
37	70%	294%	72%	262%	86%	298%	75%	310%	76,69%	387%
54	82%	199%	80%	179%	89%	178%	88%	221%	93%	243%



°C	SBS RAP + 8%R		SBS RAP + 12%R		SBS RAP + 16%R		SBS RAP + 8%R + 1%HiMA		SBS REF	
	Δ redução $ E^* $	Δ aumento δ	Δ redução $ E^* $	Δ aumento δ	Δ redução $ E^* $	Δ aumento δ	Δ redução $ E^* $	Δ aumento δ	Δ redução $ E^* $	Δ aumento δ
-10	8%	221%	19%	267%	30%	346%	16%	252%	-12,33%	162%
4	23%	258%	33%	240%	47%	368%	32%	280%	1,77%	218%
21	51%	295%	52%	237%	70%	324%	59%	326%	42,50%	347%
37	75%	301%	69%	204%	81%	250%	76%	279%	76,50%	338%
54	85%	187%	75%	141%	89%	164%	89%	182%	88%	188%

5.6.3. Deformação Permanente: *Flow Number*

As características do ligante envelhecido presente no RAP como elevada rigidez e elasticidade resulta por melhorar a resistência à deformação permanente, não se caracterizando como um dos mecanismos de falha de misturas asfálticas recicladas à quente. No entanto, quando se utilizam os agentes rejuvenescedores e os teores adicionais de ligante, a elevada rigidez diminui e a mistura retorna parte de suas propriedades de relaxação, o que pode resultar em maior susceptibilidade ao dano em elevadas temperaturas.

Assim, essa seção apresenta os resultados do teste de *Flow Number* a fim de verificar se os teores mais elevados de AR que visam restaurar as condições de PGH do ligante, e o teor adicional de HiMA, não resultam em misturas susceptíveis à deformação permanente.

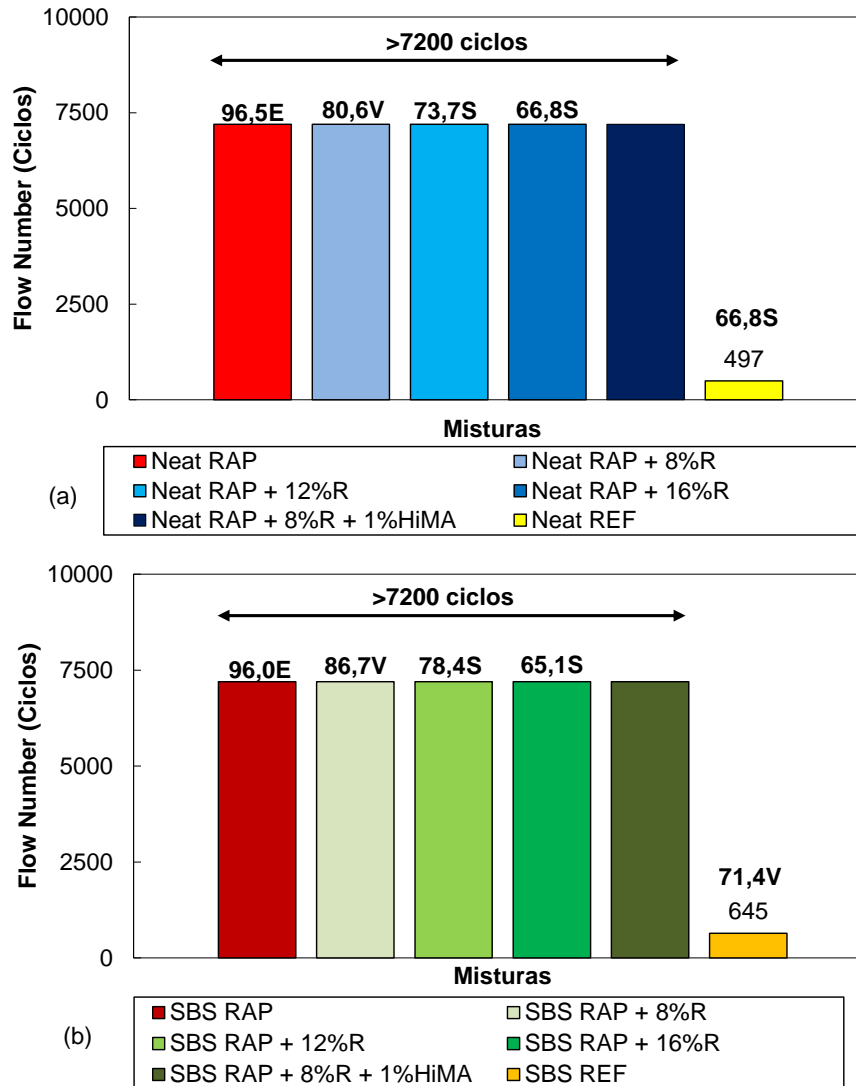
Os testes foram conduzidos de acordo com a seção 5.5.2, e os resultados médios de três amostras por mistura quanto ao *Flow Number* estão apresentados na Figura 177, juntamente com o PGH e a classificação quanto ao tráfego pelo Jnr 3,2 à 64°C de cada ligante. Verifica-se que a incorporação do AR reduziu o PGH e a classificação quanto ao nível de tráfego dos ligantes, porém sem resultar em susceptibilidade à deformação permanente das misturas, uma vez que as misturas recicladas não atingiram o *Flow Number* aos 7200 ciclos. Em contrapartida, o *Flow Number* para as misturas de referência foram de 497 e 645 ciclos, respectivamente, para Neat REF e SBS REF. Assim, as misturas recicladas são classificadas para um tráfego extremamente pesado conforme limites estabelecidos por diferentes autores na Tabela 35.

Assim, mesmo reestabelecendo o PGH, Jnr 3,2 e níveis de rigidez em alta temperatura do ligante RAP com o teor de 16%, as misturas recicladas exibiram forte tolerância à deformação permanente. As misturas recicladas são mais elásticas em relação às misturas REF nas altas temperaturas (b e d da Figura 176), o que se caracteriza em uma hipótese consistente para explicar o porquê misturas com propriedades similares na escala ligante resultaram em respostas distintas no teste de *Flow Number*.

Com a finalidade de avaliar a deformabilidade das misturas submetidas ao carregamento repetido em altas temperaturas, a Figura 178 exhibe os resultados de deformação plástica acumulada (E_p) como função do número de ciclos (N). As misturas otimizadas apresentaram as maiores deformações não recuperáveis dentre as misturas recicladas aos 7200 ciclos. No entanto, são misturas com alta resistência e tolerância ao dano por deformação permanente. A técnica de otimização do teor de ligante final vem sendo amplamente utilizada nos departamentos norte-americanos como uma estratégia para melhorar a performance das

misturas asfálticas quanto a fadiga, tendo por limite um balanceamento com a deformação permanente.

Figura 177 – *Flow Number* em número de ciclos para as misturas Neat (a) e SBS (b) RAP com diferentes concentrações do agente rejuvenescedor R



Nas demais misturas recicladas, as deformações não recuperáveis ao final dos 7200 ciclos foram similares, decorrendo da pouca variação em termos de rigidez entre os teores de 8 a 16% na temperatura de 54°C e 10 Hz (Figura 176).

A Figura 179 correlaciona os valores experimentais $|E^*|$ e Φ das misturas a 54°C e 10 Hz com a deformação plástica acumulada aos 7200 ciclos (misturas que não atingiram o FN) e no FN (misturas que atingiram o FN). Assim, são encontradas correlações boas (0,70-0,89) entre as variáveis em modelo de potência, indicando que misturas mais rígidas e mais elásticas em altas temperaturas são menos susceptíveis a deformação acumulada.

Figura 178 – E_p vs n° de ciclos para as misturas Neat (a) e SBS (b) RAP com diferentes concentrações do agente rejuvenescedor R no teste de FN

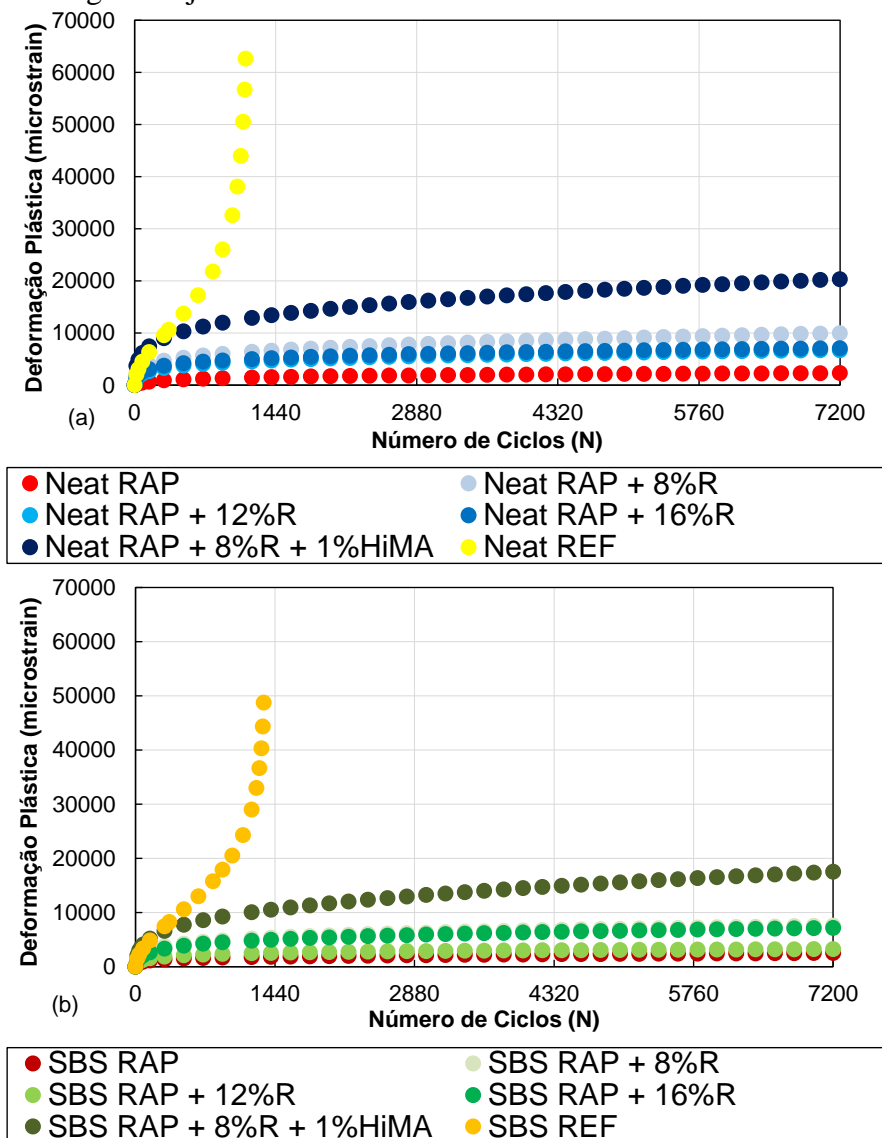
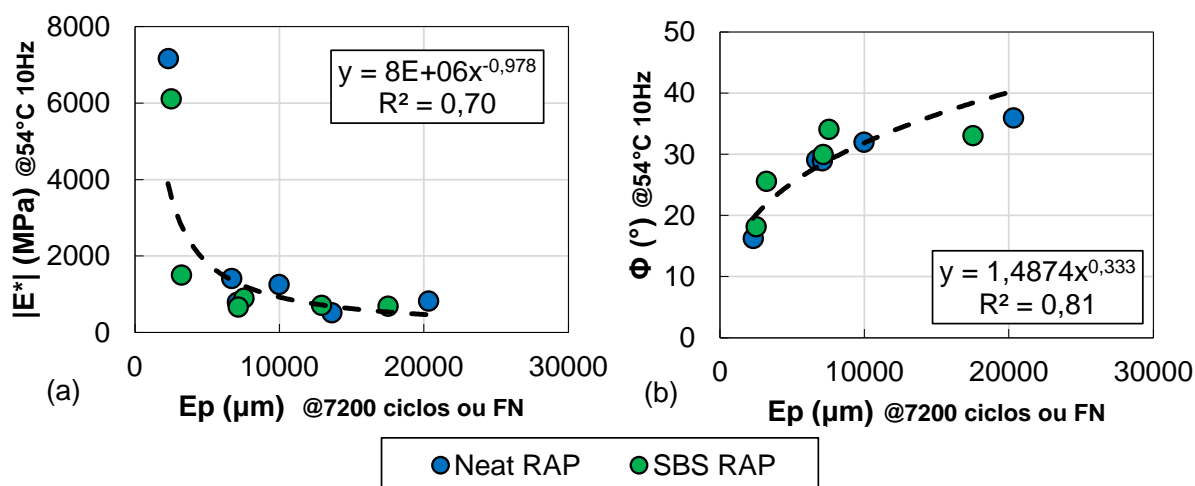


Figura 179 – Correlação entre $|E^*|$ (a) e Φ (b) (@54°C e 10 Hz) vs E_p (7200 ciclos)



Por fim, a partir dos resultados de *Flow Number* é possível afirmar que a adição de até 16% de agente rejuvenescedor e a otimização com 1% de HiMA não resultaram em misturas susceptíveis a deformação permanente. Assim, mesmo reestabelecendo o PGH dos ligantes RAP ao nível dos ligantes REF, as misturas apresentaram resistência satisfatória segundo critérios estabelecidos quanto à danificação em altas temperaturas.

5.6.4. Fadiga: Simplified viscoelastic continuum damage model

Por outro lado, se a ação do AR e AR + HiMA não resultou em misturas suscetíveis à deformação permanente, resta saber se a ação desses dois componentes restaura o desempenho e a performance das misturas recicladas quanto ao fenômeno de fadiga, assim como já identificado no teste LAS.

Os resultados dos testes de fadiga à tração-compressão conduzidos de acordo com a seção 5.5.3 estão apresentados e discutidos nessa seção. A Figura 180 apresenta um corpo de prova rompido após a condução do ensaio, indicando o rompimento adequado para aceitabilidade das amostras, além de DMRs entre 0,90 e 1,10. Assim, as misturas recicladas exibiram rompimento similar às misturas concencionais, o que se infere baixa variabilidade do material e um bom grau de mistura entre o ligante envelhecido e os materiais adicionados.

Figura 180 – Corpo de prova rompido após teste de fadiga à tração-compressão



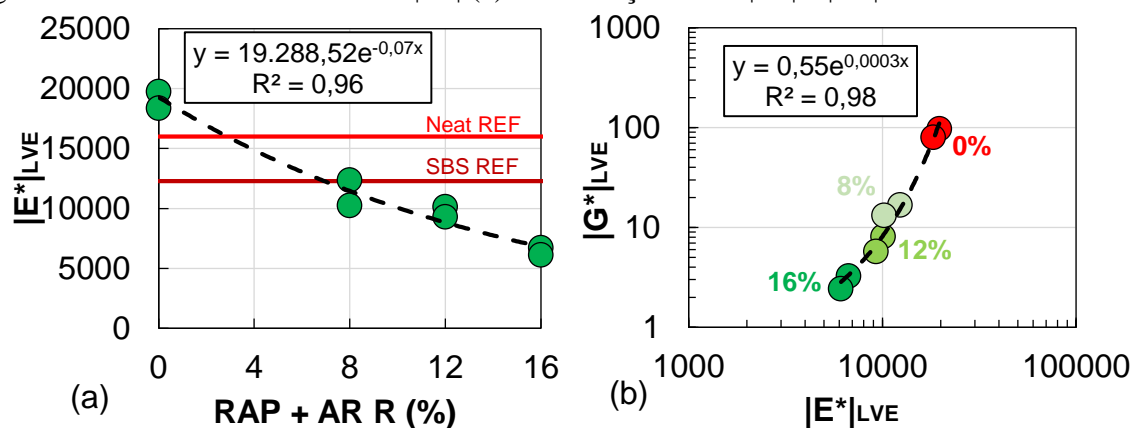
O modelo S-VECD foi utilizado para interpretar os resultados experimentais, construção das curvas características de dano C vs S , dos envoltórios de ruptura do G^R vs N_f e

Cum (1-C) vs Nf, e para simulação da vida de fadiga com base em soluções analíticas propostas por Santos et al. (2020) e Wang, Underwood e Kim (2020). Com a caracterização LVE, coeficientes da C vs S, e coeficientes dos envoltórios de ruptura, o desempenho à fadiga das misturas com diferentes concentrações de agente rejuvenescedor também foi avaliada por meio do FlexPAVE™.

Com os resultados da seção 5.6.2, foram obtidos os dados necessários para representar o comportamento viscoelástico das misturas no modelo S-VECD, os coeficientes do modelo sigmoidal e os valores de $|E^*|$ em 19°C e 10 Hz conforme apresentado na Tabela 38.

O AR reduziu significativamente $|E^*|$ em modelo exponencial com excelente correlação ($R^2 = 0,96$), conforme exibido na Figura 181 (a), similar à escala de ligantes asfálticos (Figura 140). Excelente correção também é identificada entre $|G^*|$ e $|E^*|$ (b) em modelo exponencial ($R^2 = 0,98$), demonstrando os efeitos do agente rejuvenescedor e do grau de mistura. Com 8% todas as misturas recicladas apresentaram valor similar ou inferior às misturas REF.

Figura 181 – Influência do AR em $|E^*|$ (a) e correlação entre $|E^*|$ e $|G^*|$ à 19°C e 10 Hz



A Tabela 39 apresenta a taxa de evolução de dano α , os coeficientes C_{11} e C_{12} de ajuste da C vs S pelo modelo de potência (Equação 37), os coeficientes Y e Δ do envoltório de ruptura do G^R vs Nf, o D^R , S_{rep} e S_{app} das misturas investigadas.

Tabela 38 – Coeficientes do modelo sigmoidal e shift factors usados para modelar o comportamento LVE das misturas

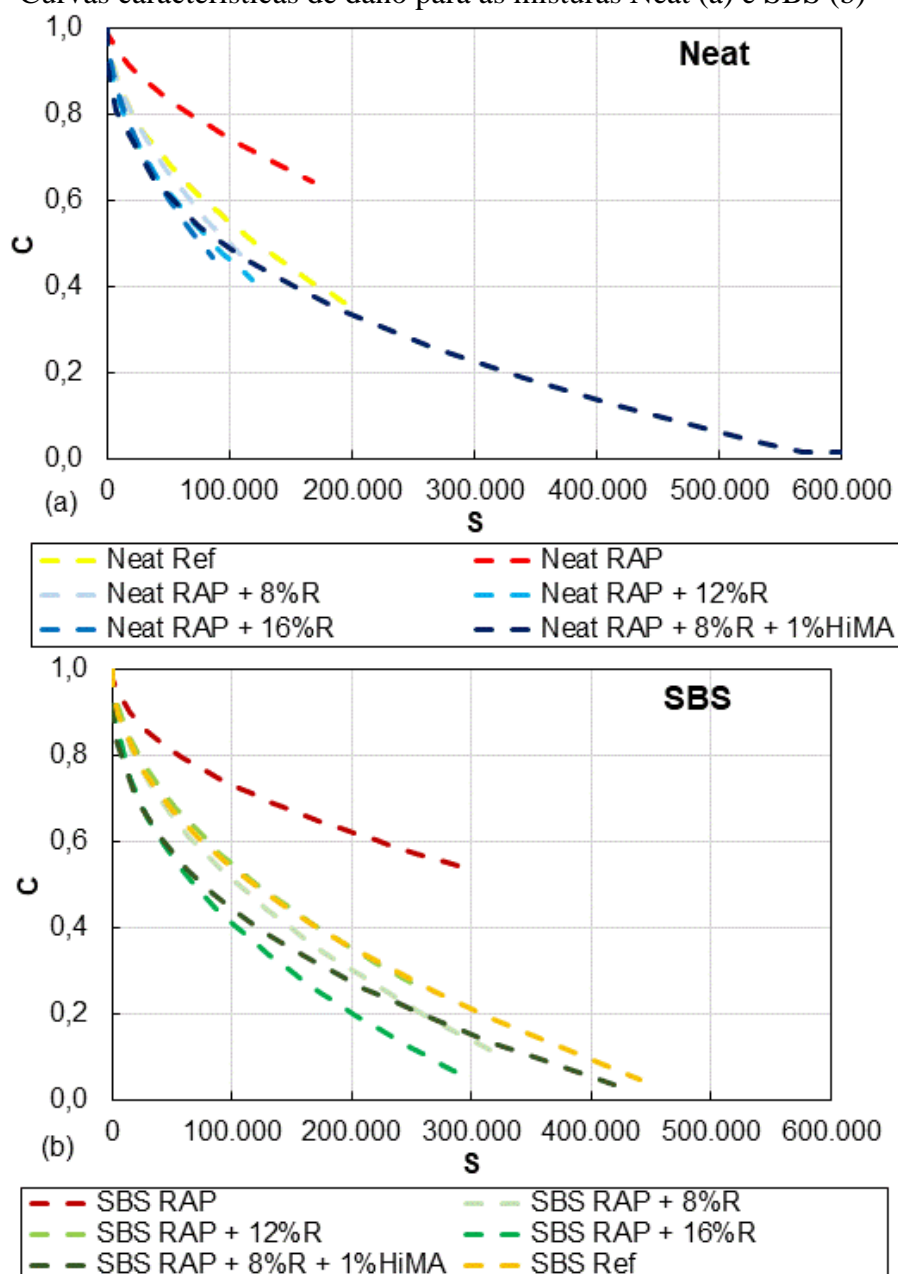
Misturas asfálticas	Coeficientes do modelo sigmoidal				t-TS shift factors			LVE
	a	b	d	G	a1	a2	a3	E* @19°C 10Hz
Neat RAP	-7,518	15,016	3,983	0,247	5,8E-04	-1,8E-01	3,4E+00	19742
Neat RAP + 8%R	3,671	3,809	1,641	0,409	9,1E-04	-1,8E-01	3,3E+00	12347
Neat RAP + 12%R	2,867	4,635	1,723	0,309	8,9E-04	-1,8E-01	3,3E+00	10122
Neat RAP + 16%R	3,942	3,501	1,107	0,339	9,4E-04	-1,8E-01	3,3E+00	6715
Neat RAP + 8%R + 1%HiMA	3,793	3,598	1,585	0,453	8,7E-04	-1,8E-01	3,2E+00	10550
Neat REF	4,411	3,081	1,482	0,590	6,5E-04	-1,7E-01	3,3E+00	15998
SBS RAP	-6,487	13,940	3,981	0,276	6,2E-04	-1,8E-01	3,4E+00	18340
SBS RAP + 8%R	4,293	3,106	1,339	0,459	9,1E-04	-1,8E-01	3,3E+00	10223
SBS RAP + 12%R	3,365	4,070	1,650	0,298	8,0E-04	-1,8E-01	3,3E+00	9290
SBS RAP + 16%R	3,251	4,176	1,291	0,304	8,5E-04	-1,7E-01	3,3E+00	6113
SBS RAP + 8%R + 1%HiMA	3,859	3,552	1,311	0,413	7,0E-04	-1,6E-01	3,1E+00	8641
SBS REF	4,513	2,960	1,211	0,502	1,0E-03	-1,9E-01	3,7E+00	12289

Tabela 39 – Alpha, coeficientes C11 e C12; Y e Δ ; D^R, Srep, Sapp e coeficiente angular de Cum(1-C) vs Nf

Misturas asfálticas	LVE	Coeficientes C vs S		G ^R vs Nf		D ^R			
	α	C ₁₁	C ₁₂	Y	Δ	D ^R	Srep	Sapp	Coef. Ang.
Neat RAP	3,85	0,0002	0,6276	6106016	-1,407	0,19	6,84	3,89	0,1446
Neat RAP + 8%R	3,59	0,0006	0,5878	3052446	-1,267	0,33	5,47	5,71	0,3257
Neat RAP + 12%R	3,80	0,0017	0,4973	489134	-0,999	0,39	5,96	6,60	0,4342
Neat RAP + 16%R	4,39	0,0008	0,5768	131145	-0,968	0,38	4,32	5,34	0,3611
Neat RAP + 8%R + 1%HiMA	3,46	0,0066	0,3779	52011920	-1,315	0,59	16,21	21,06	0,5988
Neat REF	3,22	0,0011	0,5210	149052668	-1,505	0,38	8,45	9,09	0,3681
SBS RAP	3,32	0,0008	0,5000	33292216	-1,491	0,27	11,11	9,80	0,2448
SBS RAP + 8%R	3,84	0,0012	0,5202	5372684	-1,253	0,41	8,10	8,68	0,3711
SBS RAP + 12%R	4,31	0,0011	0,5221	207241	-0,929	0,38	8,21	7,44	0,3876
SBS RAP + 16%R	4,17	0,0039	0,4361	38459272	-1,360	0,56	10,31	15,66	0,5604
SBS RAP + 8%R + 1%HiMA	3,75	0,0067	0,3836	14252212	-1,199	0,65	17,35	22,93	0,6574
SBS REF	3,71	0,0017	0,4887	798794702	-1,628	0,48	13,02	12,69	0,4397

As curvas características de dano das misturas avaliadas estão apresentadas na Figura 182. Inicialmente é verificado um deslocamento ascendente das curvas características de dano com o envelhecimento do material quando se compara as misturas Neat RAP e SBS RAP com Neat REF e SBS REF. Comportamento similar foi identificado na C vs S dos ligantes asfálticos (Figura 97) e em trabalhos de Babadupulos et al. (2018) e Saleh et al. (2020). Segundo esses autores, o envelhecimento aumenta a rigidez do material que para um determinado valor de S, o material envelhecido apresenta maior valor de C, o que se torna mais propenso a danos (a evolução do dano é mais rápida) ou falha em uma menor perda de integridade.

Figura 182 – Curvas características de dano para as misturas Neat (a) e SBS (b)



A adição do AR produz misturas recicladas com C vs S mais baixas e similares as misturas de referência, ou seja, o efeito do agente rejuvenescedor foi capturado pelas curvas características de dano, revertendo os efeitos do envelhecimento com a falha ocorrendo em uma maior perda de integridade.

As misturas que combinaram 8%R e 1%HiMA resultaram em curvas similares as misturas apenas com 8%R, porém a otimização do teor final alterou significativamente a perda de integridade (Cf) e o dano (Sf) na falha. Para a mistura Neat, a otimização passou o Cf de 0,47 para 0,01 e o Sf de 108145 para 757062. Na mistura SBS, o Cf passou de 0,10 para 0,03 e Sf de 320737 para 419408. Em termos mecânicos, essas alterações impactam na tenacidade do material, que será discutida na sequência.

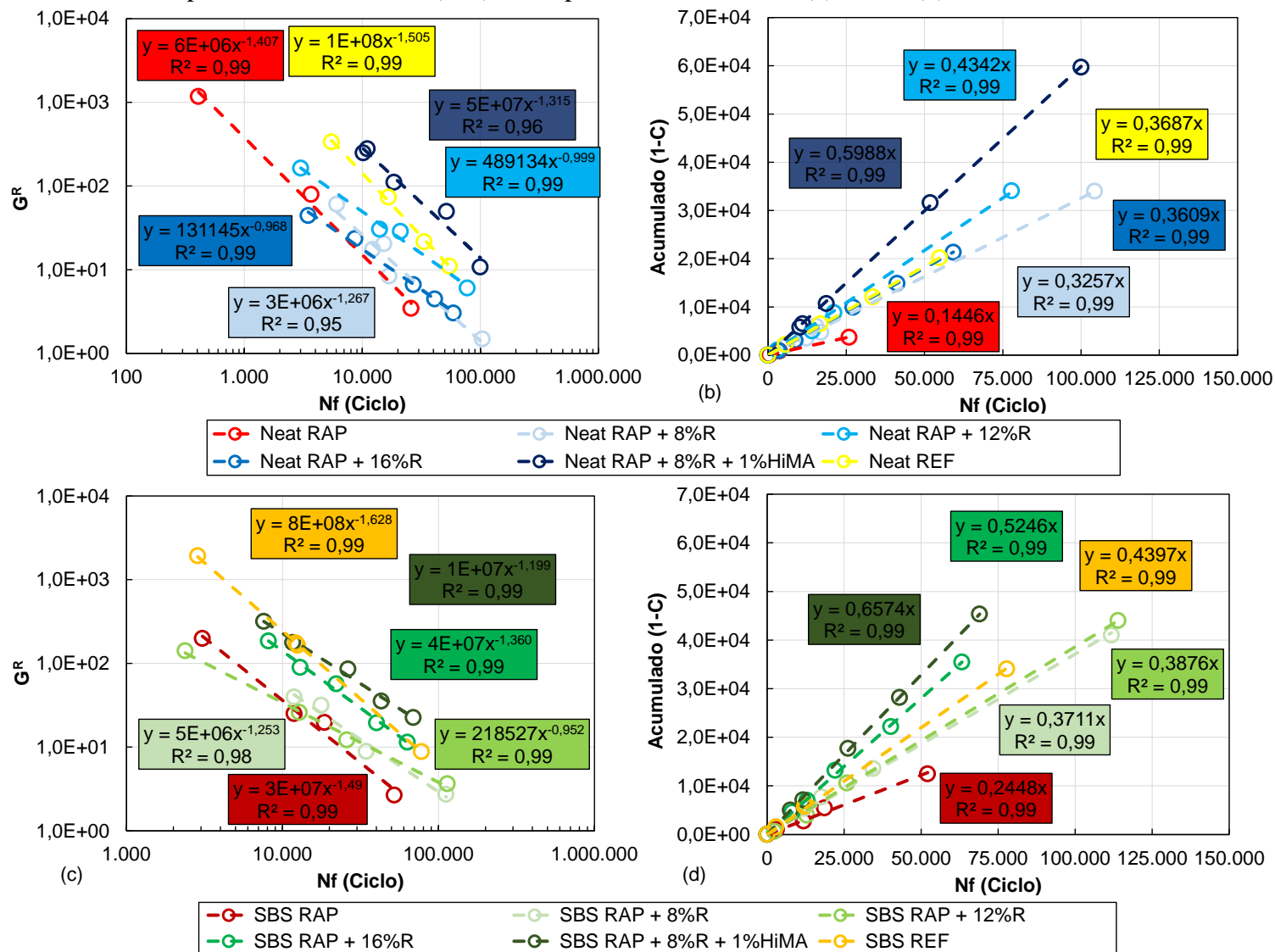
Assim, verifica-se que o módulo do material afeta a posição da curva característica de dano. No entanto, a resistência ao trincamento por fadiga não pode ser avaliada usando apenas a posição das curvas característica de dano, sendo necessário um critério de ruptura para prever a falha do material.

Para verificar o desempenho à fadiga, a Figura 183 apresenta os envoltórios de ruptura pelo G^R (a e c) e pelo D^R (b e d) para as misturas investigadas. Verifica-se excelentes ajustes ao modelo de potência ($R^2 > 0,91$) na correlação entre o G^R vs Nf e ao modelo linear ($R^2 > 0,99$) entre D^R vs Nf. Assim, ambos os critérios se mostraram independentes das condições de envelhecimento e rejuvenescimento das misturas.

Os envoltórios do G^R vs Nf das misturas indicam que a presença e a concentração do AR afetam o dano das misturas asfálticas. Nota-se que a adição do AR resulta em envoltórios na posição superior e/ou com menor inclinação (menor valor de $|\Delta|$) com relação as misturas sem agente rejuvenescedor. Assim como a C vs S, os envoltórios não permitem avaliar numericamente a vida útil das misturas, no entanto, a posição e a sua inclinação indicam que misturas posicionadas acima e a direita, e com menor inclinação, tendem a apresentar um melhor desempenho à fadiga (NOROUZI e KIM, 2017; WANG, KESHAVARZI e KIM, 2018b).

Comparando os envoltórios das misturas recicladas com as misturas de referência, somente as duas misturas com 8%R + 1%HiMA e a mistura SBS + 16%R ocupam posição vertical similar as misturas de referência. Na escala ligante, o teor de 8% de agente resultou em G^R vs Nf similar aos ligantes de referência independente da definição de falha utilizada, ou seja, a similaridade com relação aos teores não foi conferida para a escala de misturas.

Figura 183 – Envolvórios de ruptura G^R vs Nf e Cum (1-C) vs Nf para as misturas Neat (a) e SBS (b)

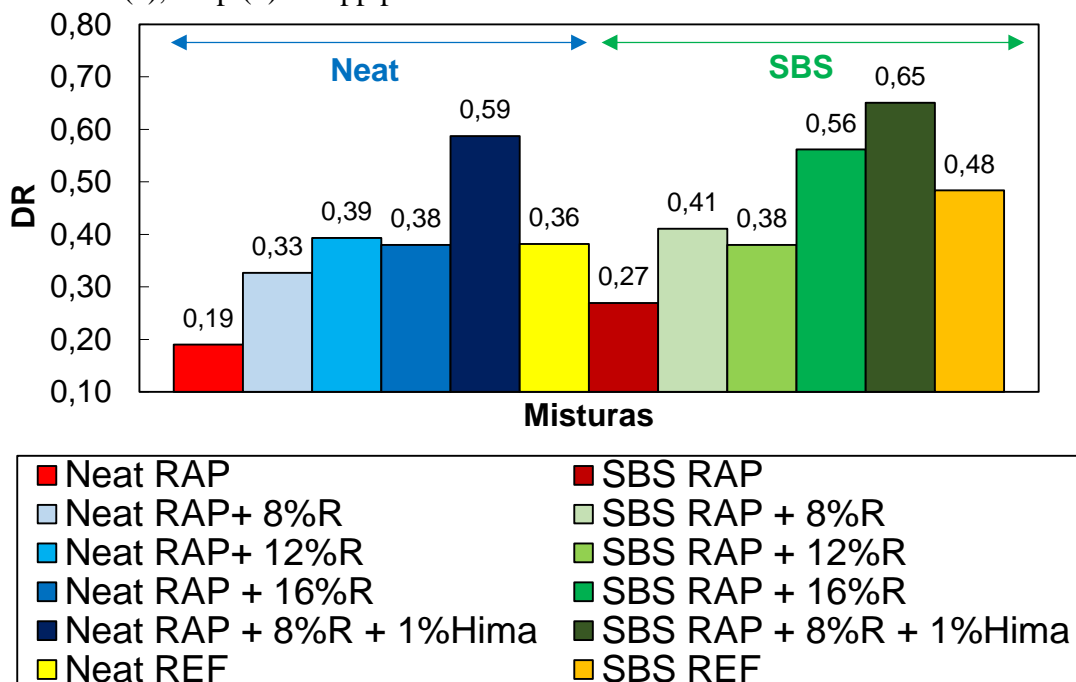


O D^R se relaciona com a tenacidade do material, propriedade importante que contribui para a capacidade de uma mistura a resistir a falha por fadiga, e corresponde a inclinação do envoltório de ruptura da redução média da pseudo-rigidez (Cum (1-C)) vs Nf.

Um indicador da perda de tenacidade das misturas asfálticas com o envelhecimento pode ser observado nas misturas Neat RAP e SBS RAP, que apresentaram as menores inclinações entre todas as misturas, ou seja, menores D^R conforme resumido na Figura 184. Por outro lado, a adição e a concentração do AR, além da otimização por HiMA, exibiram influência significativa na tenacidade das misturas com aumento da inclinação e do valor de DR. Um valor de D^R mais alto geralmente indica melhor resistência à fadiga em comparação com um valor de D^R mais baixo (SALEH et al., 2020; WANG, UNDERWOOD e KIM, 2020).

Assim, a melhora do desempenho das misturas atribuída ao efeito do AR e a otimização por HiMA é indicada por um baixo valor médio de pseudo rigidez, que fisicamente pode ser entendido da seguinte maneira. Maior resistência a danos normalmente leva à falha posterior do material. À medida que o número de ciclos de carga aumenta, a pseudo rigidez diminui e permanece em um valor baixo e, como resultado, o valor médio da pseudo rigidez também é baixo ao longo de toda a vida em fadiga da mistura (WANG, UNDERWOOD e KIM, 2020).

Figura 184 – D^R (a), Srep (b) e Sapp para as misturas Neat e SBS RAP com AR



No entanto, apesar de fornecerem indicativo sobre quais são as melhores misturas, o desempenho não pode ser avaliado apenas com base em informações fornecidas pelas curvas

características de dano e pelos envoltórios de rupturas. Assim, com os parâmetros LVE e S-VECD, foi possível simular a vida de fadiga das misturas por meio de duas soluções analíticas: uma proposta em Santos et al., (2020) (Equação 42) com base no G^R vs Nf, e outra proposta em Wang, Underwood e Kim (2020) (Equação 43) com base no D^R .

$$Nf = \left(\frac{\delta}{Y \cdot \left(\frac{C_{12}}{p} + 1 \right)} \right)^{\frac{1}{\Delta + 1 - \left(\frac{C_{12}}{p} \right)}} \quad (42)$$

$$\delta = \frac{1}{2} (\varepsilon_{TA}^R)^2 C_{11} \left(\frac{(p(C_{11}C_{12}))^\alpha (\varepsilon_{TA}^R)^{2\alpha} k}{f_R^{2\alpha}} \right)^{\frac{C_{12}}{p}}$$

$$\varepsilon_{TA}^R = \frac{1}{E_R} \frac{\beta + 1}{2} ((\varepsilon_{0,pp})_i |E^*|_{LVE})$$

$$p = \alpha - \alpha C_{12} + 1$$

Onde ε_{TA}^R é a amplitude de pseudo deformação; α é a taxa de evolução do dano; C_{11} e C_{12} são os coeficientes da curva em modelo de potência da C vs S; f_R é a frequência reduzida; k é o fator de forma de carga; Y e Δ são os coeficientes do envoltório do G^R versus Nf; $\varepsilon_{0,pp}$ é a amplitude de deformação pico a pico; β é a parcela do ciclo em que ocorre tensão de tração (valor usual é $-0,08$); $|E^*|_{LVE}$ é o módulo dinâmico viscoelástico linear a 10 Hz e 19°C.

$$N_{Srep} = (DR)^{\frac{1 - \alpha C_{12} + \alpha}{C_{12}}} \cdot \left(\frac{1}{C_{11}} \right)^{\frac{1 - \alpha C_{12} + \alpha}{C_{12}}} \cdot \left(\frac{f_R 2^\alpha}{(1 - \alpha C_{12} + \alpha) \cdot (C_{11} C_{12})^\alpha \cdot (\varepsilon^R)^{2\alpha} \cdot K_1} \right) \quad (43)$$

$$N_f = \left(\frac{1}{m} + 1 \right)^m \cdot N_{Srep}$$

Onde ε^R é a amplitude de deformação; K_1 é o fator de forma de carregamento; f_R corresponde a frequência reduzida; m é uma constante do material e igual a p/C_{12} .

A partir das duas soluções analíticas, foram obtidas as curvas de Wöhler simuladas nos intervalos de deformação entre 100 e 200 *microstrains* para o critério do G^R (Figura 185) e D^R (Figura 187). Em ambas as simulações, as misturas Neat RAP e SBS RAP apresentam a menor vida de fadiga entre todas as misturas devido ao efeito do envelhecimento. Em um grupo intermediário de desempenho estão as misturas com 8%R juntamente com as misturas REF, já

indicando o teor aproximado de AR para recuperar a vida de fadiga dos materiais. Por fim, um terceiro grupo com os melhores desempenhos estão as misturas com 12%R, 16%R e 8%R + 1% Hima.

A partir das curvas de Wöhler foi possível classificar as misturas asfálticas quanto à resistência à fadiga calculando a área abaixo da curva log-log de fadiga (Fator de Fadiga da Mistura - FFM) entre 100 e 200 μm (Equação 44), similar às deformações de pista.

$$FFM = \frac{\text{Log } Nf_{200} + \text{Log } Nf_{100}}{2} \cdot (\text{Log } \varepsilon_{200} - \text{Log } \varepsilon_{100}) \quad (44)$$

Em geral, maiores valores de FFM relatam uma melhor resistência à fadiga da mistura. Isso pode ser visualizado pela percepção de que áreas maiores nas curvas de Wöhler são causadas pelo aumento do número do ciclo de ruptura, levando as curvas mais para a direita, e também pela menor inclinação das curvas causada por Nf mais alto em testes de tensão. Os valores encontrados, conforme Figura 186 e Figura 188, são discutidos na próxima seção, quando são comparados com as demais classificações, e com misturas produzidas com materiais convencionais em pesquisas como Boeira (2018), Schuster (2018), Luzzi (2019) e Correa (2020).

Figura 185 – Curvas de Wohller simuladas pelo S-VECD e G^R vs Nf para as misturas Neat (a) e SBS (b) RAP com diferentes concentração de AR R

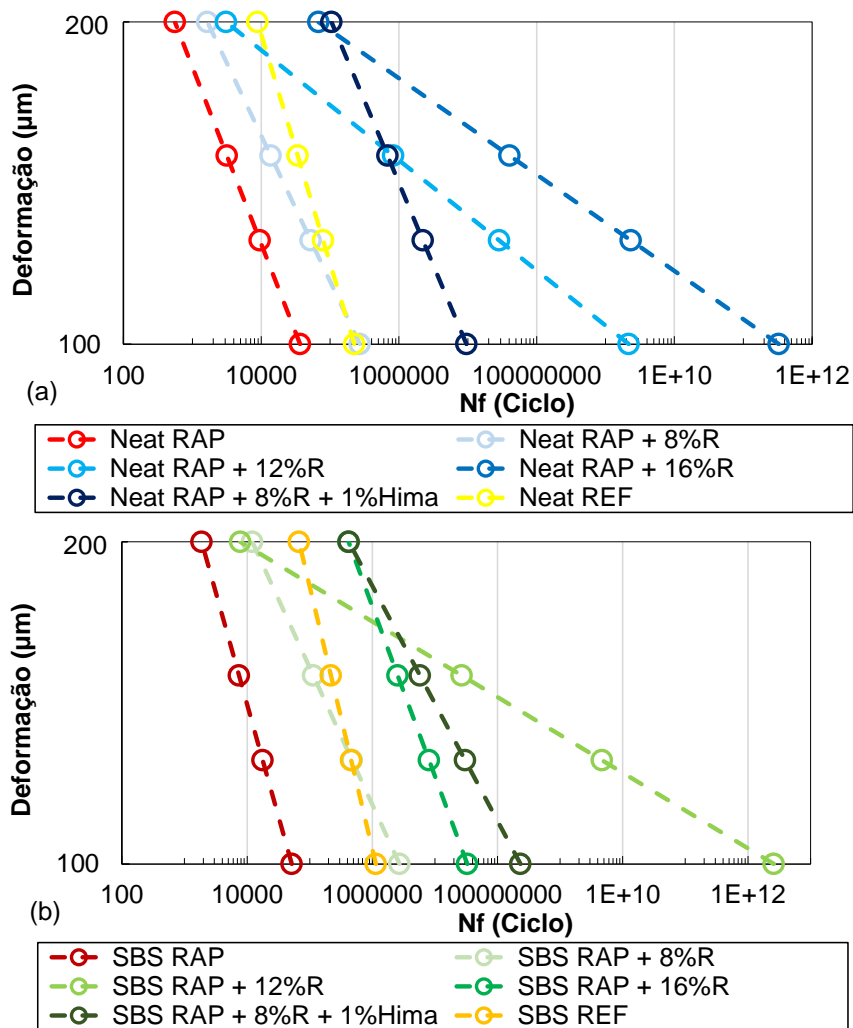


Figura 186 – FMM (100 e 200 μm) com base nas curvas de Wohller simuladas pelo S-VECD e G^R vs Nf

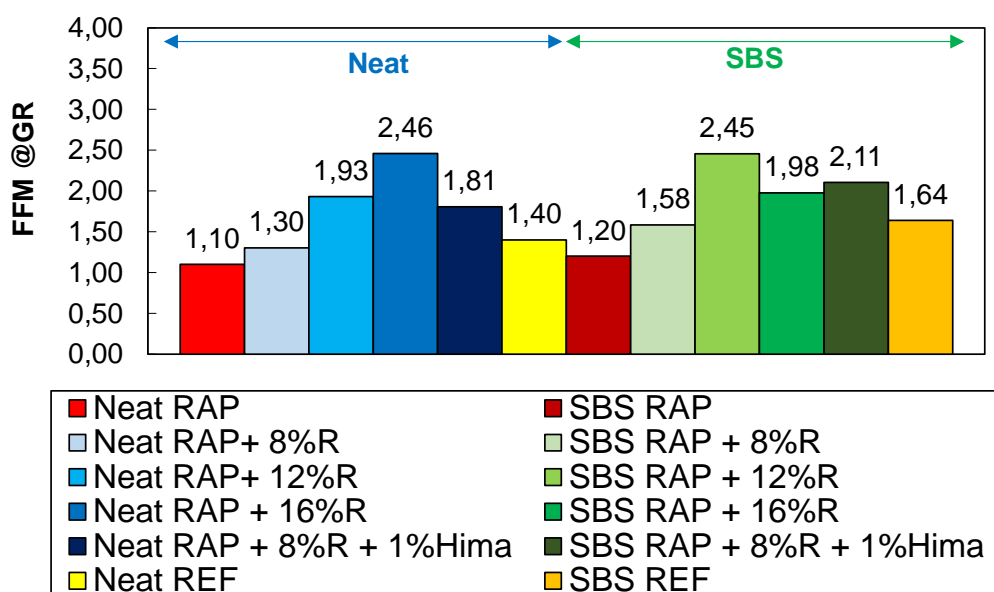


Figura 187 – Curvas de Wohller simuladas pelo S-VECD e Cum (1-C) para as misturas Neat (a) e SBS (b)

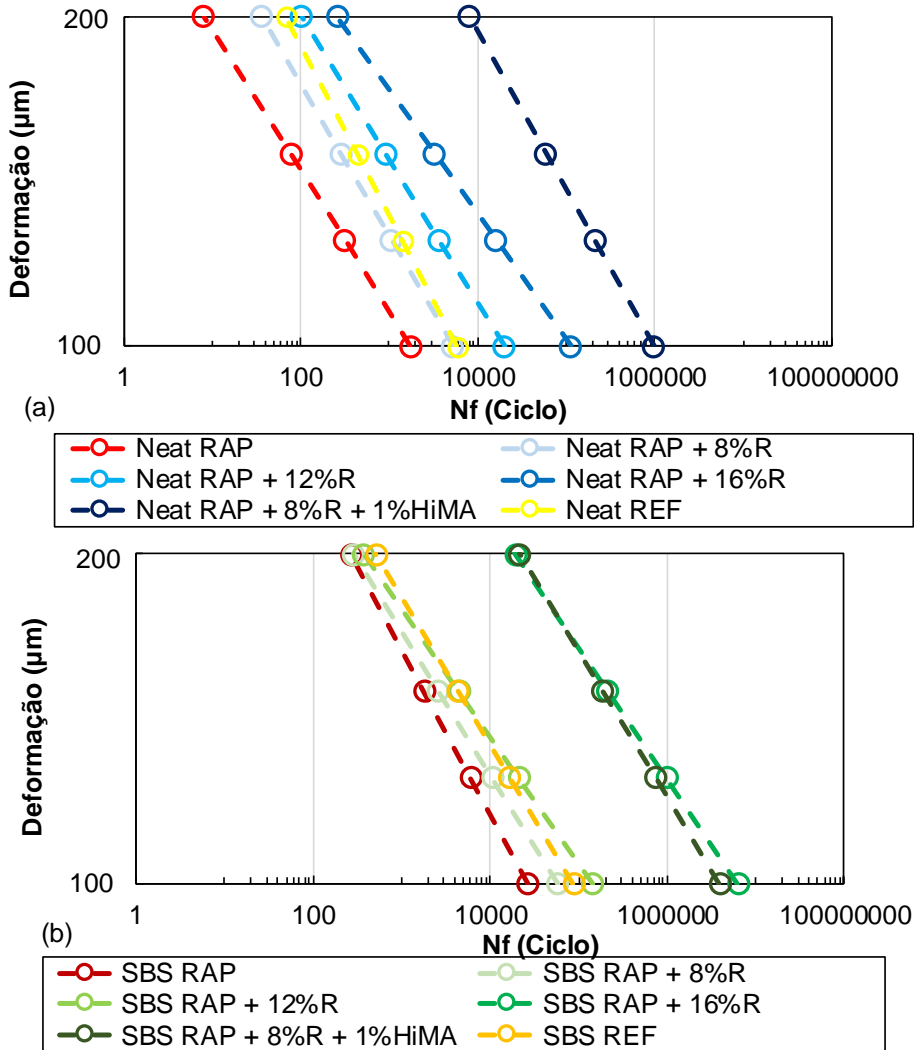
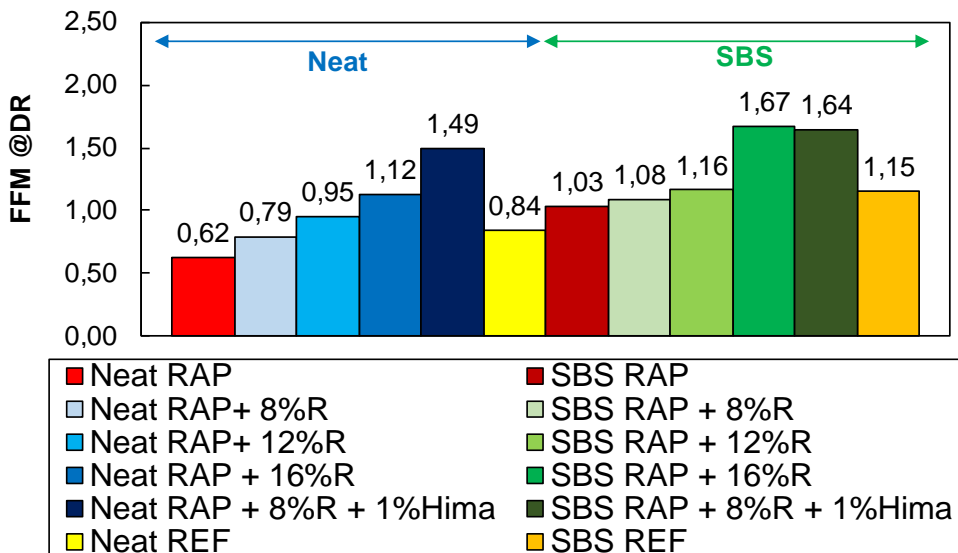


Figura 188 – FFM (100 e 200 µm) com base nas curvas de Wohller simuladas pelo S-VECD e Cum (1-C)



5.6.5. Performance à fadiga utilizando o programa de simulação FlexPave™

O software FlexPAVE™ está consolidado na literatura e permite classificar as misturas asfálticas de acordo com a resistência à fadiga, apresentando boa precisão na previsão de danos por fadiga utilizando o modelo S-VECD. Estudos como Norouzi e Kim (2017), Wang, Keshavarzi e Kim (2018b) e Bueno et al. (2020) avaliaram o desempenho de diferentes estruturas de pavimentos e tipos de misturas asfálticas por meio do FlexPAVE e concluíram que a previsão de desempenho pelo software se correlacionou satisfatoriamente com o desempenho de fissuração por fadiga observado em seções de pavimento.

A performance das doze misturas asfálticas foi avaliada por meio do FlexPAVE™, considerando uma estrutura nova de pavimento e as condições descritas na seção 5.5.3. Assim, permitiu-se observar a variação de comportamento entre as diferentes misturas quando colocadas em mesma estrutura e sujeito às mesmas condições meteorológicas e de tráfego.

As curvas de dano médio acumulado determinadas considerando o critério do G^R e D^R estão apresentadas na Figura 189 e na Figura 190, respectivamente, ao longo do período e tráfego de projeto. Diante da mesma estrutura de pavimento, tráfego e clima, com alteração apenas nas propriedades LVE e parâmetros S-VECD das misturas asfálticas, é possível identificar o efeito envelhecimento e do rejuvenescimento na evolução do dano médio acumulado por trincamento por fadiga no revestimento asfáltico.

Inicialmente, os dados exibem que o efeito do envelhecimento resulta em maior susceptibilidade ao trincamento por fadiga para as misturas Neat e SBS RAP em relação às misturas REF. Por outro lado, a presença, concentração do AR e a otimização por HiMA resultaram na redução da taxa de evolução do dano médio acumulado por trincamento por fadiga no revestimento asfáltico ao longo das condições simuladas. Os gráficos de contorno aos 1, 6, 24, 90, 180 e 300 meses determinados pelo critério do G^R estão exibidos da Figura 253 a Figura 264 e pelo critério do D^R da Figura 265 a Figura 276 no Apêndice G. Os gráficos corroboram que ambas as soluções adotadas como o AR e AR + HiMA foram eficientes em recuperar a vida de fadiga das misturas asfálticas 100% RAP.

Além da análise pelo dano médio acumulado na camada asfáltica com o FlexPAVE™, também foram realizadas duas simulações analíticas baseadas no modelo S-VECD pelo G^R (Figura 185) e pelo D^R (Figura 187). Os resultados das simulações analíticas permitiram classificar as misturas com base no FFM apresentados na Figura 186 e Figura 188. Assim, a

Tabela 40 compila uma proposta de classificação das misturas pelos resultados do N/Nf aos 300 meses e pelo FFM determinados tanto pelo G^R como D^R .

Ao estabelecer a solução analítica com base no S-VECD, verifica-se que a classificação obtida é fortemente semelhante ao gerado por simulações de software, embora não seja recomendado prever o desempenho ao longo do tempo por meio desta metodologia. No entanto, a precisão na classificação pode permitir a formação de banco de dados em diferentes situações de tráfego e estrutura. Assim, em cenários futuros, distinguir misturas que funcionarão ou não em campo, além de referência para projeto de mistura asfáltica baseada em desempenho.

Além disso, as quatro classificações foram capazes de distinguir misturas extremas para melhor e pior desempenho. A Figura 191 apresenta as correlações por regressão de potência entre os parâmetros N/Nf aos 300 meses e FFM obtidos nas simulações analíticas pelo G^R (a) e D^R (b). As relações apresentam bons valores de coeficiente de determinação R^2 , ressaltando que, como a solução analítica não leva em consideração as variações de estrutura, tráfego e temperatura, deve ser utilizada apenas para fins comparativos entre misturas. De modo geral, as misturas com maior FFM resultaram em menor dano médio acumulado aos 300 meses independente do critério de ruptura analisado.

Por fim, analisando o efeito da concentração do AR, as misturas recicladas com 8% de AR já apresentam desempenho superior e maior vida de fadiga que as misturas de referência quando se analisa as simulações no FlePaveTM pelo critério do G^R . Além disso, verifica-se que a melhora no desempenho à fadiga ocorre até a concentração de 12%. Por outro lado, o critério do D^R exibe que a melhora na performance à fadiga ocorre até a concentração de 16%R. Tal fato pode ser atribuído ao aumento da tenacidade das misturas com adição de maiores teores de AR que levam a falha posterior das misturas asfálticas.

Além disso, o critério do D^R indica que as misturas de referência apresentam desempenho a fadiga entre as misturas com 8% a 12%R. No entanto, os danos médios acumulados ao final do período entre as misturas estão muito próximos, sendo as melhores performances obtidas nas misturas com 16%R e 8%R + 1% HiMA.

Figura 189 – Dano médio acumulado por fadiga vs N para as misturas Neat (a) e SBS (b) determinados com base no G^R

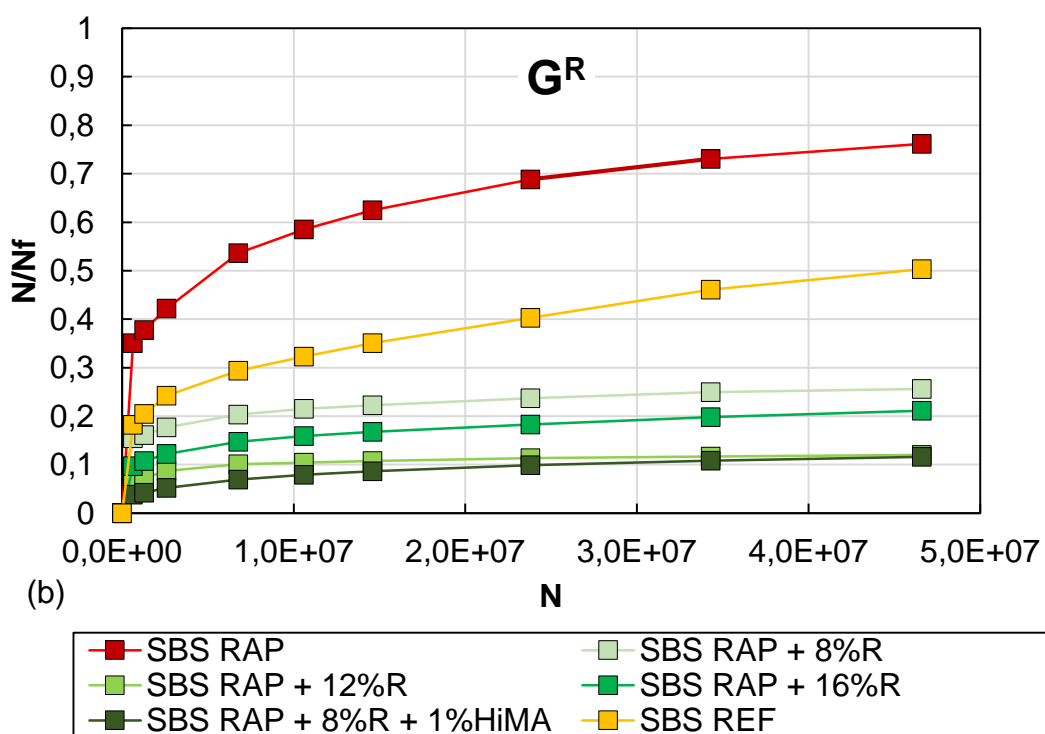
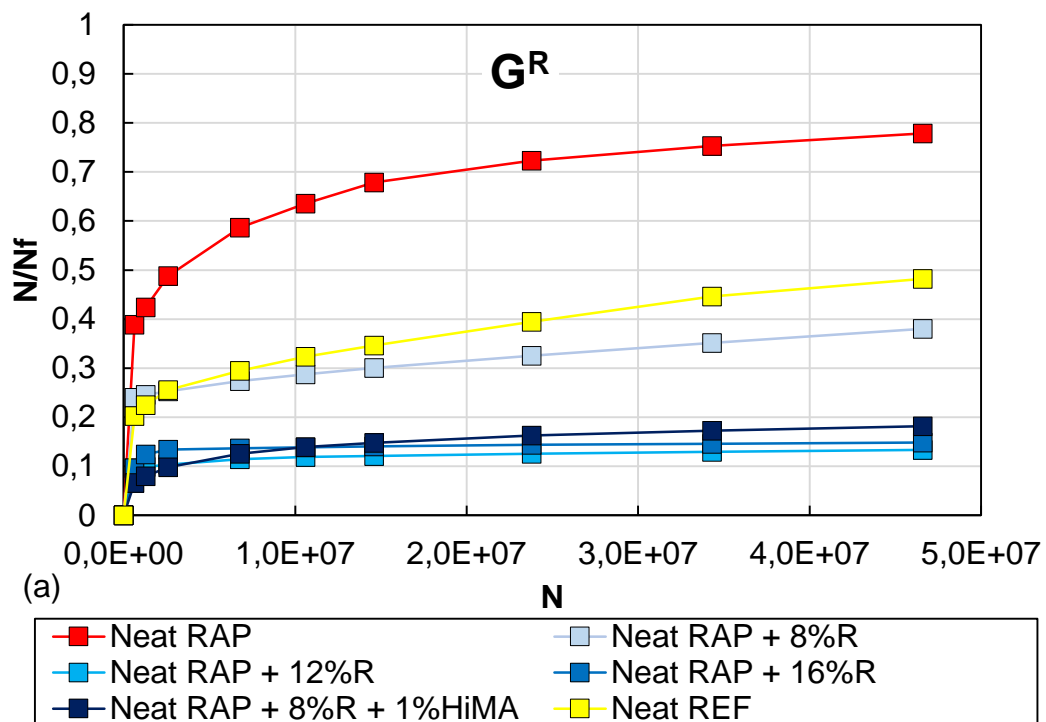


Figura 190 – Dano médio acumulado por fadiga vs N para as misturas Neat (a) e SBS (b) determinados com base no D^R

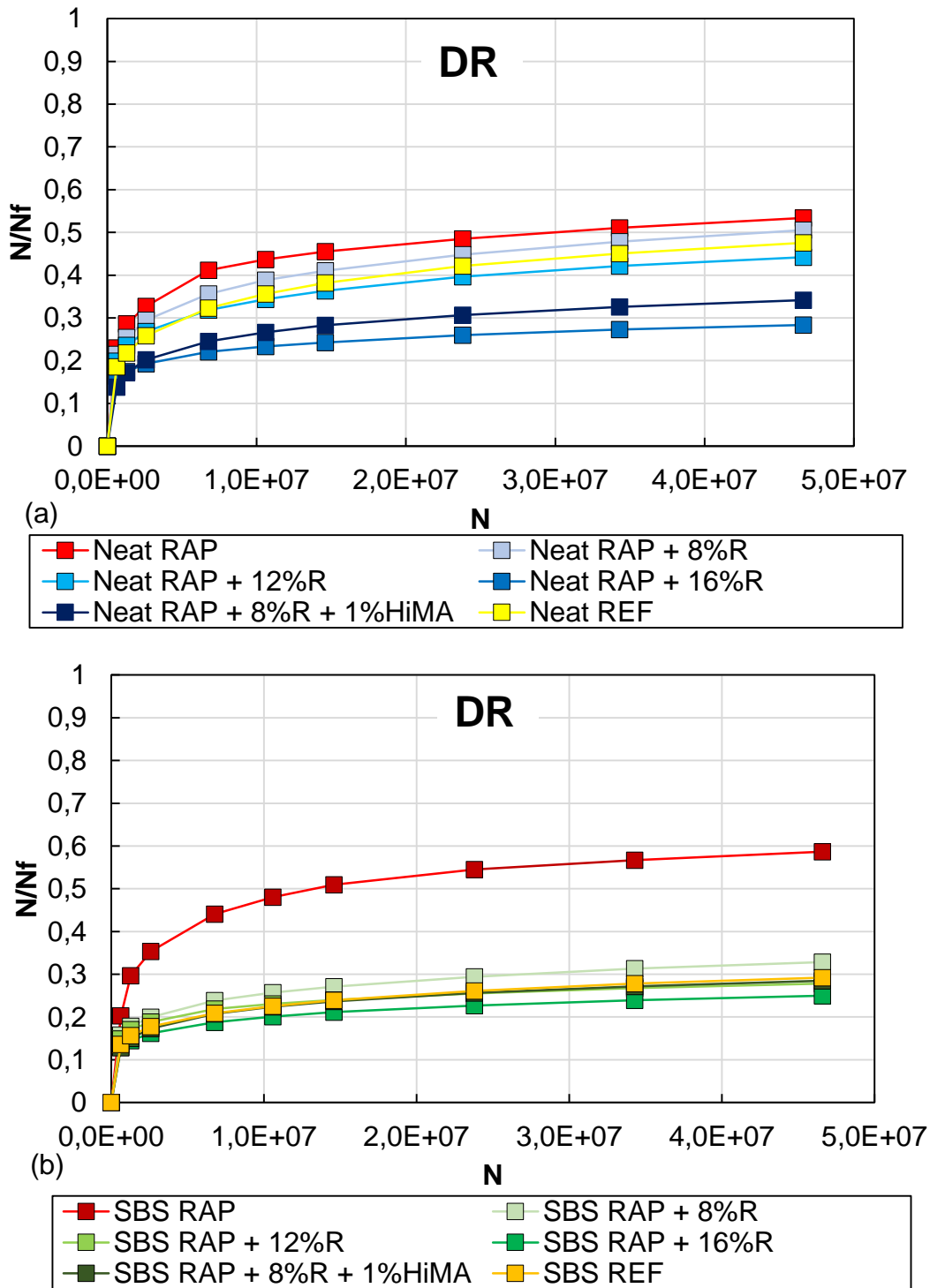
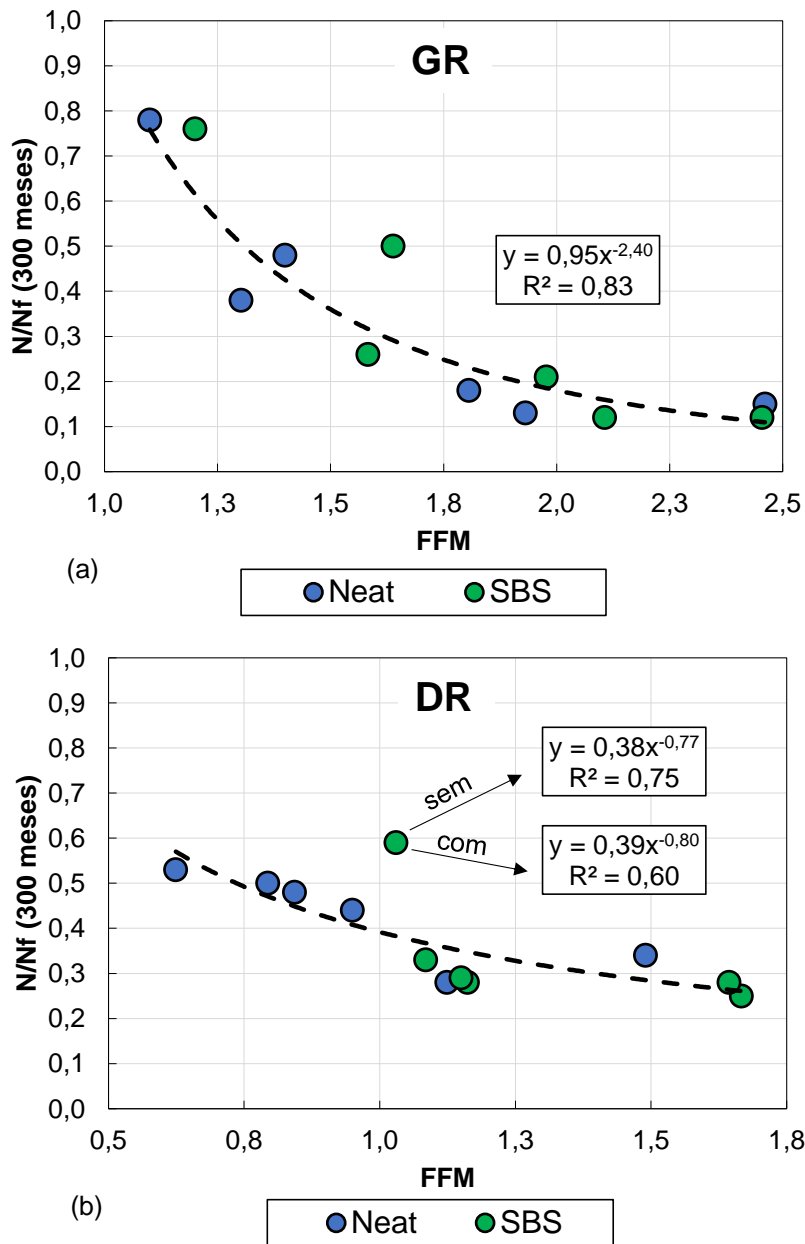


Tabela 40 Proposta de classificação das misturas quanto ao desempenho por fadiga por meio do FFM simulado pelo G^R e D^R, e pelo dano médio acumulado aos 300 meses no FlexPAVE™ também pelo G^R e D^R.

Ranking	Mistura	FFM simulado @G ^R	Mistura	N/Nf 300 meses @G ^R	Mistura	FFM simulado @D ^R	Mistura	N/Nf 300 meses @D ^R
1°	Neat RAP + 16%R	2,46	Neat RAP + 12%R	0,13	Neat RAP + 8%R + 1%HiMA	1,49	Neat RAP + 16%R	0,28
2°	Neat RAP + 12%R	1,93	Neat RAP + 16%R	0,15	Neat RAP + 16%R	1,12	Neat RAP + 8%R + 1%HiMA	0,34
3°	Neat RAP + 8%R + 1%HiMA	1,81	Neat RAP + 8%R + 1%HiMA	0,18	Neat RAP + 12%R	0,95	Neat RAP + 12%R	0,44
4°	Neat REF	1,40	Neat RAP + 8%R	0,38	Neat REF	0,84	Neat REF	0,48
5°	Neat RAP + 8%R	1,30	Neat REF	0,48	Neat RAP + 8%R	0,79	Neat RAP + 8%R	0,50
6°	Neat RAP	1,10	Neat RAP	0,78	Neat RAP	0,62	Neat RAP	0,53
Ranking	Mistura	FFM simulado @G ^R	Mistura	N/Nf 300 meses @G ^R	Mistura	FFM simulado @D ^R	Mistura	N/Nf 300 meses @D ^R
1°	SBS RAP + 12%R	2,45	SBS RAP + 12%R	0,12	SBS RAP + 16%R	1,67	SBS RAP + 16%R	0,25
2°	SBS RAP + 8%R + 1%HiMA	2,11	SBS RAP + 8%R + 1%HiMA	0,12	SBS RAP + 8%R + 1%HiMA	1,64	SBS RAP + 8%R + 1%HiMA	0,28
3°	SBS RAP + 16%R	1,98	SBS RAP + 16%R	0,21	SBS RAP + 12%R	1,16	SBS RAP + 12%R	0,28
4°	SBS REF	1,64	SBS RAP + 8%R	0,26	SBS REF	1,15	SBS REF	0,29
5°	SBS RAP + 8%R	1,58	SBS REF	0,50	SBS RAP + 8%R	1,08	SBS RAP + 8%R	0,33
6°	SBS RAP	1,20	SBS RAP	0,76	SBS RAP	1,03	SBS RAP	0,58

Figura 191 – Correlação entre dano simulado N/Nf aos 300 meses vs FFM determinados pelo G^R (a) e pelo D^R (b)



Os valores de FFM determinados pela solução analítica de Santos et al. (2020) foram comparados a valores típicos de FFM para misturas com materiais convencionais de Boeira (2018), Schuster (2018), Luzzi (2019), Correa (2020) e Possebon (2021), conforme Tabela 41. O banco de dados é composto por uma gama variada em relação aos tipos e teores de ligantes, modificadores, composição granulométrica, tipos de agregados, métodos de dosagens e teores de incorporação de RAP. É possível observar que a ação do AR e da combinação entre AR e HiMA resultam em ganho no desempenho à fadiga e comportamento similar a misturas com materiais convencionais. Além disso, o efeito da concentração levou o comportamento das

misturas entre as piores classificadas para as melhores classificadas dentro do banco de dados analisado.

Tabela 41 – Comparação das misturas investigadas com misturas convencionais de Boeira (2018), Schuster (2018), Luzzi (2019), Correa (2020) e Possebon (2021) a partir do FFM determinado pela solução analítica de Santos et al. (2020)

Mistura	FFM	Posição	Mistura	FFM	Posição
Correa (2020) REF 60/85	2,517	1°	Boeira (2018) AMP M	1,546	43°
Neat RAP + 16%R	2,460	2°	Schuster (2018) ECO	1,542	44°
SBS RAP + 12%R	2,450	3°	Boeira (2018) HIMA S	1,512	45°
Boeira (2018) AMP M	2,397	4°	Luzzi (2019) M30	1,499	46°
Schuster (2018) ECO	2,394	5°	Correa (2020) 20RAP50/70	1,492	47°
Schuster (2018) AMP	2,282	6°	Possebon (2021) 50/70 C	1,480	48°
SBS RAP + 8R% + 1%H	2,110	7°	Possebon (2021) 30/45	1,460	49°
Schuster (2018) ECO	2,082	8°	Possebon (2021) 50/70 I	1,450	50°
Boeira (2018) HIMA M	2,041	9°	Possebon (2021) 50/70 B	1,450	51°
Boeira (2018) HIMA S	2,028	10°	Schuster (2018) 50/70	1,445	52°
Luzzi (2019) M10	1,987	11°	Luzzi (2019) M0	1,441	53°
SBS RAP + 16%R	1,980	12°	Schuster (2018) AMP	1,436	54°
Correa (2020) 10RAP60/85	1,962	13°	Correa (2020) 10RAP50/70	1,430	55°
Boeira (2018) HIMA M	1,953	14°	Possebon (2021) 50/70 G	1,430	56°
Boeira (2018) 50/70 M	1,944	15°	Boeira (2018) HIMA S	1,429	57°
Neat RAP + 12%R	1,930	16°	Schuster (2018) 50/70	1,426	58°
Neat RAP + 8R% + 1%H	1,810	17°	Possebon (2021) 60/85E	1,410	59°
Boeira (2018) 50/70 M	1,800	18°	Schuster (2018) 50/70	1,405	60°
Boeira (2018) AMP M	1,785	19°	Schuster (2018) 50/70	1,400	61°
Correa (2020) 20RAP60/85	1,769	20°	Neat REF	1,400	62°
Correa (2020) 30RAP60/85	1,758	21°	Possebon (2021) 50/70 D	1,390	63°
Schuster (2018) AMP	1,750	22°	Possebon (2021) 50/70 H	1,390	64°
Schuster (2018) AMP	1,725	23°	Boeira (2018) 50/70 S	1,383	65°
Boeira (2018) AMP M	1,709	24°	Schuster (2018) 50/70	1,382	66°
Schuster (2018) AMP	1,680	25°	Schuster (2018) 50/70	1,376	67°
Boeira (2018) HIMA M	1,674	26°	Boeira (2018) HIMA M	1,374	68°
Schuster (2018) 50/70	1,665	27°	Schuster (2018) 50/70	1,368	69°
Schuster (2018) 50/70	1,661	28°	Schuster (2018) 50/70	1,351	70°
Possebon (2021) 50/70 E	1,660	29°	Boeira (2018) HIMA S	1,331	71°
Correa (2020) REF 50/70	1,651	30°	Boeira (2018) AMP S	1,313	72°
Boeira (2018) 50/70 M	1,647	31°	Possebon (2021) 50/70 A	1,310	73°
SBS REF	1,640	32°	Neat RAP + 8%R	1,300	74°
Boeira (2018) 50/70 M	1,638	33°	Boeira (2018) AMP S	1,269	75°
Schuster (2018) 50/70	1,628	34°	Boeira (2018) 50/70 S	1,248	76°
Possebon (2021) AB	1,620	35°	SBS RAP	1,200	77°
Correa (2020) 30RAP50/70	1,611	36°	Boeira (2018) 50/70 S	1,178	78°
Possebon (2021) 50/70 F	1,590	37°	Schuster (2018) AMP	1,175	79°
Luzzi (2019) M20	1,584	38°	Boeira (2018) AMP S	1,175	80°
SBS RAP + 8%R	1,580	39°	Boeira (2018) AMP S	1,157	81°
Schuster (2018) AMP	1,567	40°	Boeira (2018) 50/70 S	1,156	82°
Schuster (2018) AMP	1,555	41°	Neat RAP	1,100	83°
Schuster (2018) AMP	1,555	42°	Schuster (2018) TLAF	1,031	84°

5.6.5.1. Correlação entre resistência à fadiga de ligantes e misturas

Como o objetivo principal deste trabalho é a busca por indicadores de vida de fadiga em ligantes asfálticos para seleção e dosagem do agente rejuvenescedor, esta seção correlaciona os resultados obtidos no teste LAS (seção 4.6.2.5) com o danos obtidos no FlexPAVE™. Assim, busca-se identificar quais definições de falha, equações de simulação da vida de fadiga e o intervalo de deformação para cálculo do FFL são assertivos para explicar os danos obtidos em cada mistura asfáltica.

5.6.5.1.1. Ciclo de falha no LAS vs N/Nf (FlexPAVE™)

A primeira análise, exibida na Figura 192, correlaciona o N/Nf aos 300 meses diretamente com ciclo de falha determinado pelas diferentes definições (redução de 50%|G*|, redução de 35% C, pico do C.N, pico do WRs, pico ângulo de fase e máximo C².N.(1-C)) no LAS 300 (a, b, c, d, e, f), 600 (g, h, i, j, k, l) e 1200 (m, n, o, p, q, r). A relação entre as variáveis ocorre em regressão logarítmica cuja classificação pelo coeficiente de determinação está apresentada na Tabela 42 nos diferentes CSRs e definições de falha.

Para comparar se o CSR exerce influência no R² entre as variáveis, um teste estatístico foi realizado. Neste sentido, o teste t de Student foi utilizado para variáveis paramétricas (LAS 300 e 600) e o teste de Wilcoxon na variável não paramétrica (LAS 1200), com nível de significância de 5% ($\rho < 0,05$). Não houve diferença estatística significativa na comparação entre os R² nos diferentes agrupamentos de CSR.

O pico C.N, máximo C².N.(1-C) e a redução de 50%|G*| foram as definições para determinação de falha que resultaram em correlações boas a excelentes independente do CSR analisado.

Figura 192 – Correlação entre N/Nf (300 meses) das misturas asfálticas e ciclo de falha no LAS 300, 600 e 1200 para as diferentes definições de falha

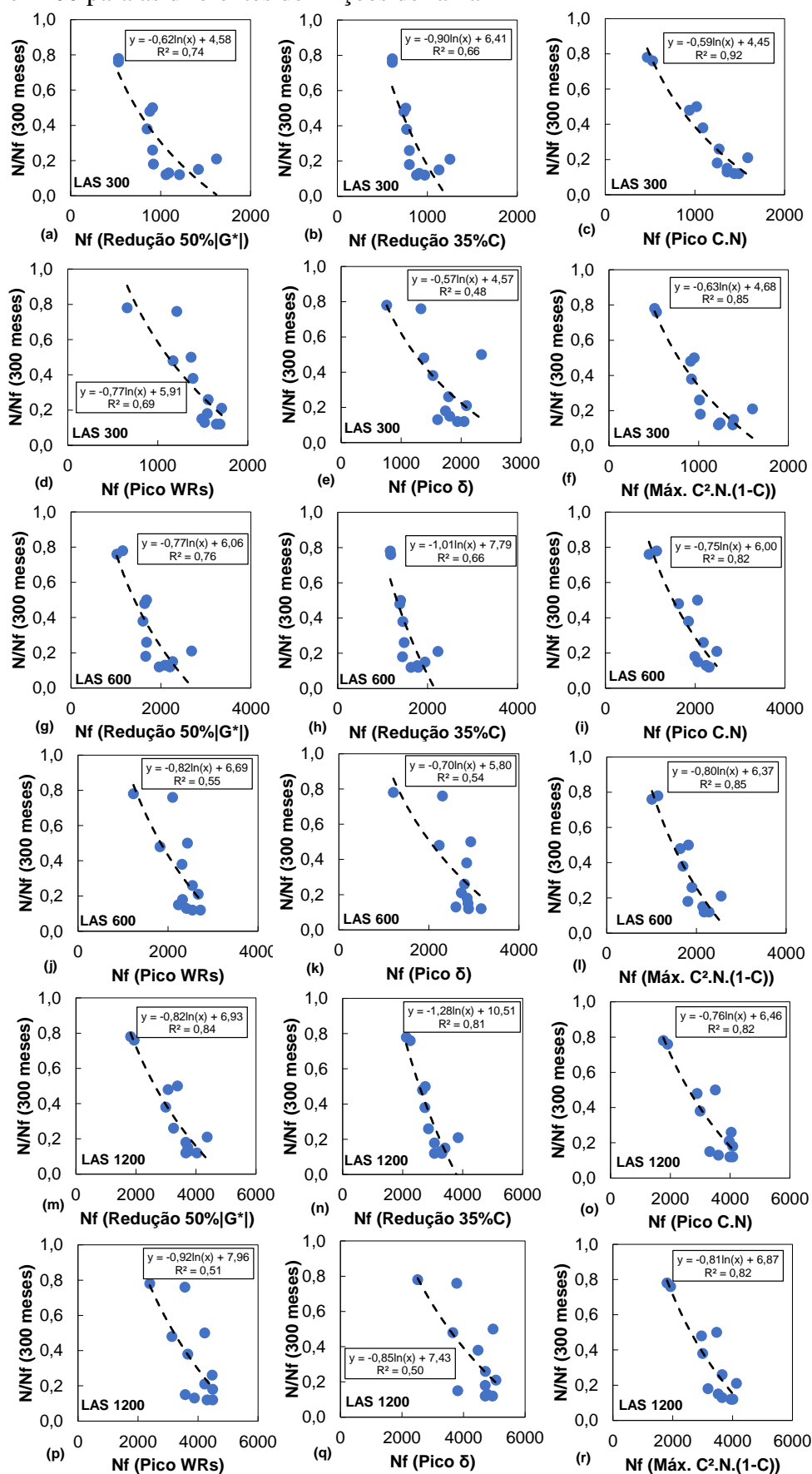


Tabela 42 – Correlação entre N/Nf (FlexPAVE™) vs Nf (ciclo de falha) obtido pelas seis definições testadas no LAS 300, 600 e 1200

Ranking	Nf (ciclo de falha)		
	LAS 300	LAS 600	LAS 1200
1°	Pico C.N (R ² =0,92)	Máx. C ² .N.(1-C) (R ² =0,85)	Redução 50% G* (R ² =0,84)
2°	Máx. C ² .N.(1-C) (R ² =0,85)	Pico C.N (R ² =0,82)	Máx. C ² .N.(1-C) (R ² =0,82)
3°	Redução 50% G* (R ² =0,74)	Redução 50% G* (R ² =0,76)	Pico C.N (R ² =0,82)
4°	Pico WRs (R ² =0,69)	Redução 35%C (R ² =0,66)	Redução 35%C (R ² =0,81)
5°	Redução 35%C (R ² =0,66)	Pico WRs (R ² =0,55)	Pico WRs (R ² =0,51)
6°	Pico δ (R ² =0,48)	Pico δ (R ² =0,54)	Pico δ (R ² =0,50)

5.6.5.1.2. Equações de previsão da vida de fadiga no LAS vs N/Nf (FlexPAVE™)

A segunda análise correlaciona o N/Nf aos 300 meses com os resultados de previsão de vida de fadiga pelas equações de Wang et al. (2015), Wang et al. (2018) e Safaei (2017) do teste LAS (seção 4.6.2.5.1). A Figura 193, a Figura 194 e a Figura 195 apresentam as correlações para os níveis de deformação de 1,0%, 2,5% e 5,0%, respectivamente. A relação entre as variáveis ocorre em regressão logarítmica cuja classificação pelo coeficiente de determinação está apresentada na Tabela 43 nos diferentes níveis de deformação, equações de previsão e definições de falha.

Inicialmente é verificada a influência do nível de deformação no R² obtido entre as variáveis dentro de uma mesma equação. Estatisticamente, não há diferença significativa entre 2,5% e 5,0% para Wang et al. (2015) e com R² superior a 0,70 (classificadas como bom a excelente). Além disso, não se identificou diferença estatística entre 1,0% e 2,5% para Wang et al. (2018) e Safaei (2017), no entanto, a qualidade do R² nestes dois níveis de deformações foi inferior a moderado (R²<0,69) para grande maioria das definições.

Assim, nota-se que o nível de deformação adotado influencia no R² obtido entre a previsão de vida de fadiga em ligantes asfálticos pelas diferentes equações e o dano das misturas. A equação de Wang et al. (2015) mostrou para 4/6 definições de falha correlação superior a 0,70 em níveis de deformação de 2,5% e 5,0%, enquanto que as equações de Wang et al. (2018) e Safaei (2017) exibiu para 4/6 definições R² superior a 0,70 apenas para nível de deformação de 5,0%. Nestas condições, o pico C.N, máximo C².N.(1-C) e a redução de 50%|G*| foram as definições para determinação de falha que resultaram nas melhores correlações.

Figura 193 – Correlação entre N/Nf (300 meses) das misturas asfálticas e Nf em 1,0% dos ligantes

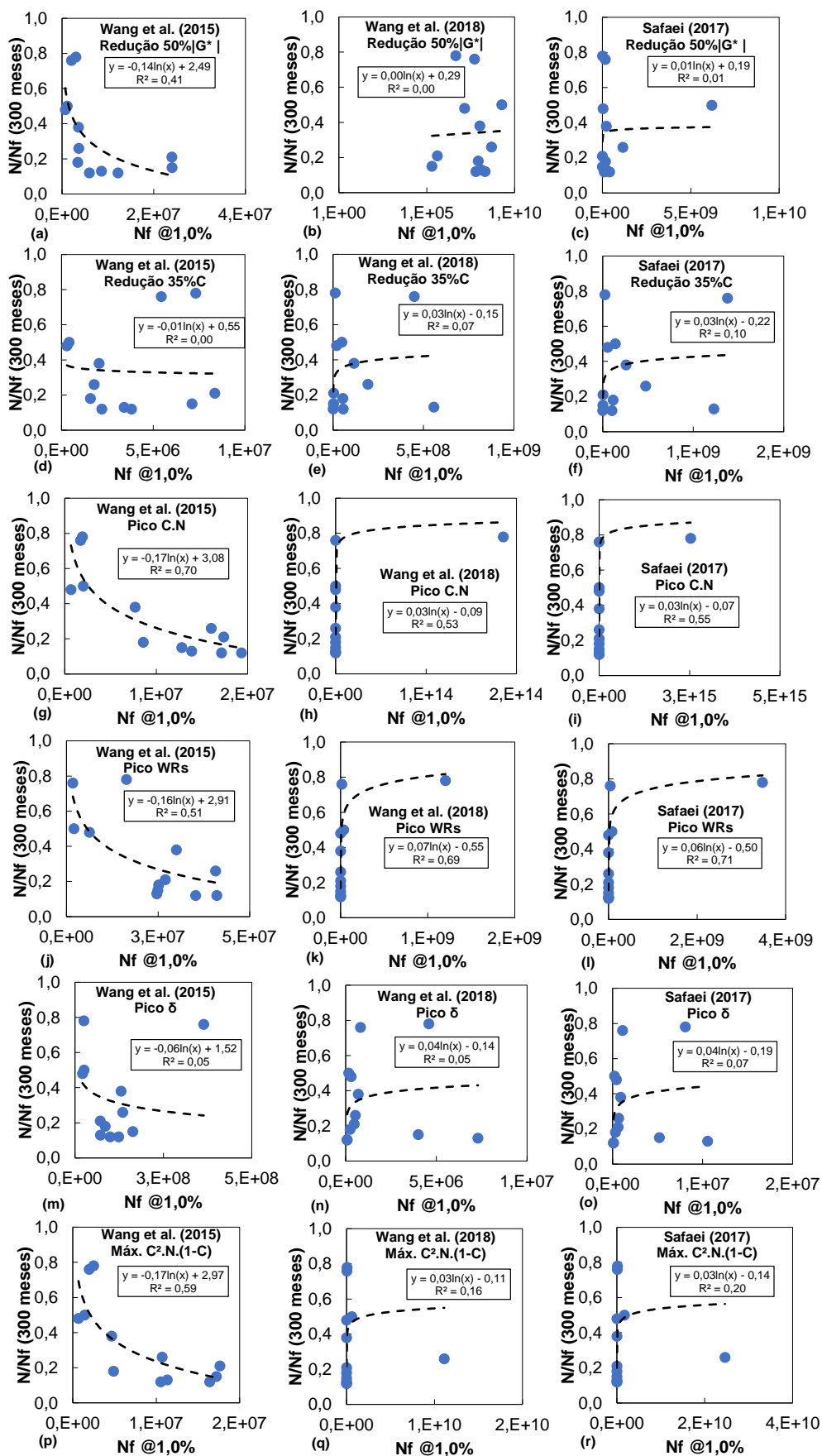


Figura 194 – Correlação entre N/Nf (300 meses) das misturas asfálticas e Nf em 2,5% dos ligantes

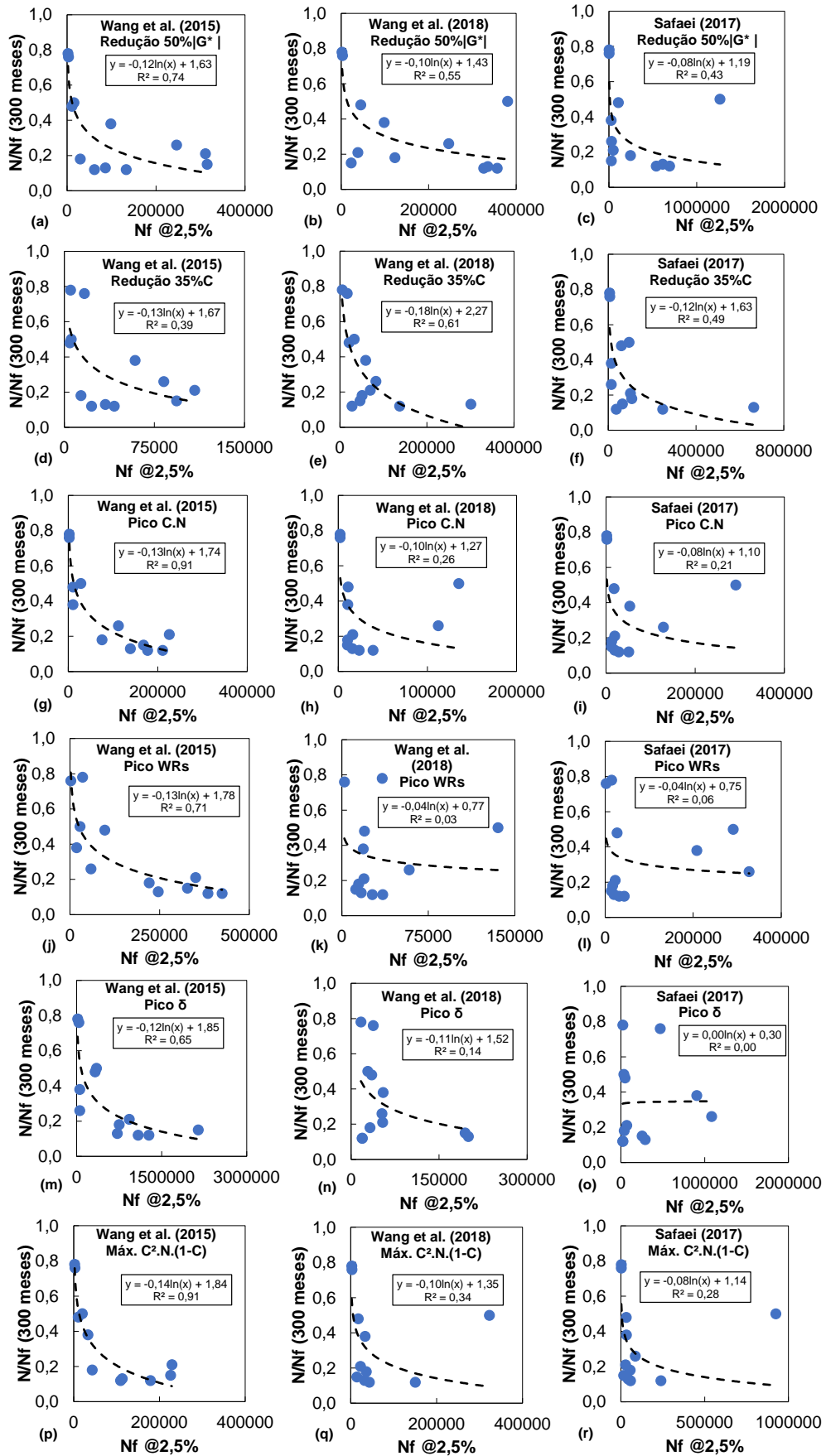


Figura 195 – Correlação entre N/Nf (300 meses) das misturas asfálticas e Nf em 5% dos ligantes

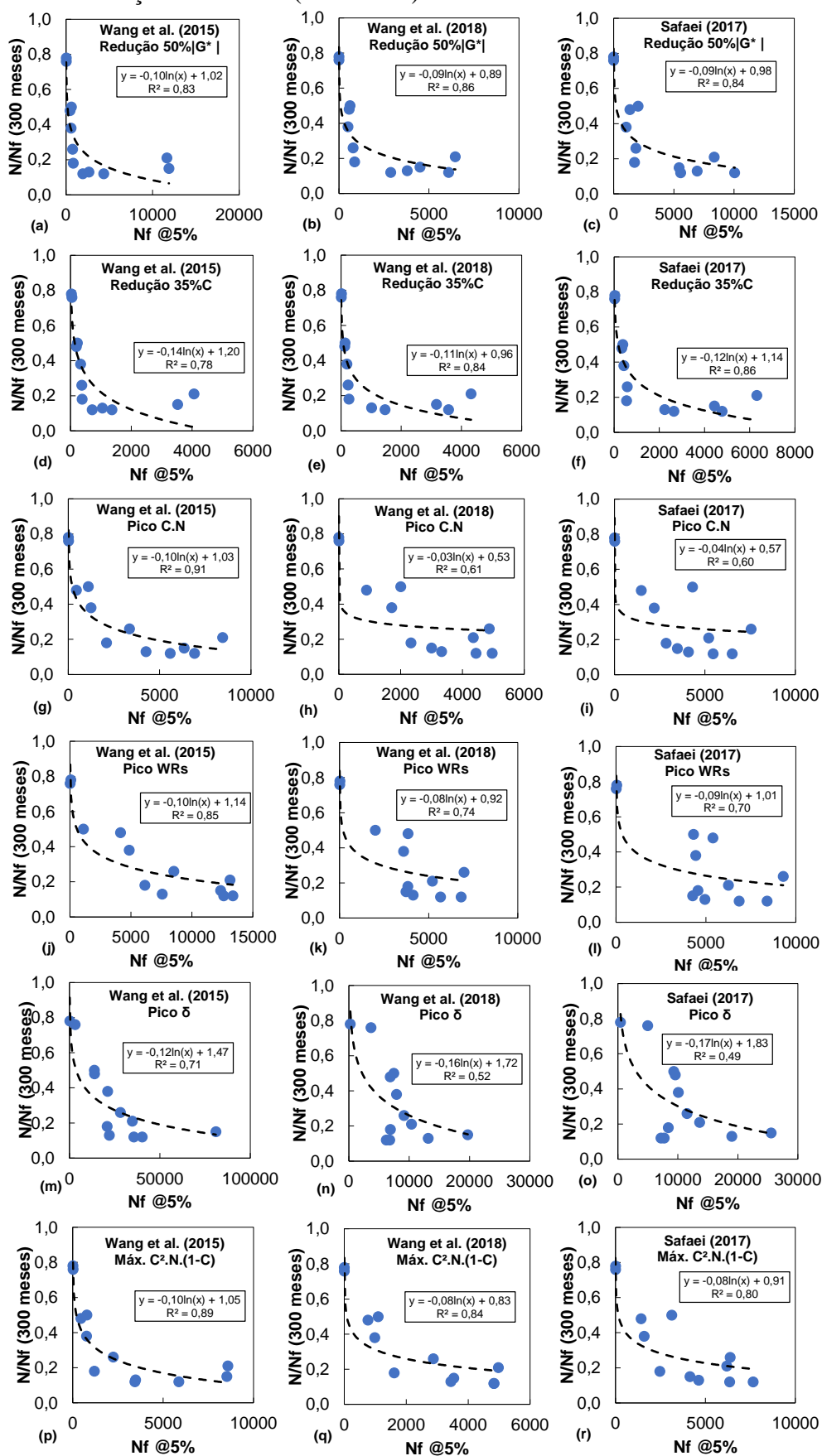


Tabela 43 – Correlação entre N/Nf (FlexPAVE™) vs Nf obtido pelas três equações de simulação da vida de fadiga nos níveis de deformação de 1,0%, 2,5% e 5%

N/Nf vs Nf @1%			
Ranking	Wang et al. (2015)	Wang et al. (2018)	Safaei (2017)
1°	Pico C.N (R ² =0,70)	Pico WRs (R ² =0,69)	Pico WRs (R ² =0,71)
2°	Máx. C ² .N.(1-C) (R ² =0,59)	Pico C.N (R ² =0,53)	Pico C.N (R ² =0,55)
3°	Pico WRs (R ² =0,51)	Máx. C ² .N.(1-C) (R ² =0,16)	Máx. C ² .N.(1-C) (R ² =0,20)
4°	Redução 50% G* (R ² =0,41)	Redução 35% C (R ² =0,07)	Redução 35% C (R ² =0,10)
5°	Pico δ (R ² =0,05)	Pico δ (R ² =0,05)	Pico δ (R ² =0,07)
6°	Redução 35% C (R ² =0,00)	Redução 50% G* (R ² =0,00)	Redução 50% G* (R ² =0,01)
N/Nf vs Nf @2,5%			
Ranking	Wang et al. (2015)	Wang et al. (2018)	Safaei (2017)
1°	Pico C.N (R ² =0,91)	Redução 35% C (R ² =0,61)	Redução 35% C (R ² =0,49)
2°	Máx. C ² .N.(1-C) (R ² =0,91)	Redução 50% G* (R ² =0,55)	Redução 50% G* (R ² =0,43)
3°	Redução 50% G* (R ² =0,74)	Máx. C ² .N.(1-C) (R ² =0,34)	Máx. C ² .N.(1-C) (R ² =0,28)
4°	Pico WRs (R ² =0,71)	Pico C.N (R ² =0,26)	Pico C.N (R ² =0,21)
5°	Pico δ (R ² =0,65)	Pico δ (R ² =0,14)	Pico WRs (R ² =0,06)
6°	Redução 35% C (R ² =0,39)	Pico δ (R ² =0,03)	Pico δ (R ² =0,00)
N/Nf vs Nf @5,0%			
Ranking	Wang et al. (2015)	Wang et al. (2018)	Safaei (2017)
1°	Pico C.N (R ² =0,91)	Redução 50% G* (R ² =0,86)	Redução 35% C (R ² =0,86)
2°	Máx. C ² .N.(1-C) (R ² =0,89)	Máx. C ² .N.(1-C) (R ² =0,84)	Redução 50% G* (R ² =0,84)
3°	Pico WRs (R ² =0,85)	Redução 35% C (R ² =0,84)	Máx. C ² .N.(1-C) (R ² =0,80)
4°	Redução 50% G* (R ² =0,83)	Pico WRs (R ² =0,74)	Pico WRs (R ² =0,70)
5°	Redução 35% C (R ² =0,78)	Pico C.N (R ² =0,61)	Pico C.N (R ² =0,60)
6°	Pico δ (R ² =0,71)	Pico δ (R ² =0,52)	Pico δ (R ² =0,49)

5.6.5.1.3. FFL no LAS vs N/Nf (FlexPAVE™)

Por fim, o N/Nf aos 300 meses é correlacionado com o FFL extraído das três equações de simulação da vida de fadiga nos intervalos de deformação entre 1% a 5% (Figura 196), entre 1% a 2,5% (Figura 197) e entre 2,5% a 5% (Figura 198). A relação entre as variáveis ocorre em regressão linear cuja classificação pelo coeficiente de determinação está apresentada na Tabela 44 nos diferentes intervalos de deformação, equações de previsão e definições de falha.

Inicialmente é verificada a influência do intervalo de deformação no R² obtido entre as variáveis dentro de uma mesma equação. Estatisticamente, não há diferença significativa entre 2,5%-5,0% e 1,0%-5,0% para Wang et al. (2015). No entanto, nota-se que a classificação das definições de pico C.N, máximo C².N.(1-C) e pico do WRs permaneceram inalteradas e mais bem classificadas (R²>0,76) nos três intervalos considerados.

O FFL pelas equações de Wang et al. (2018) e Safaei (2017) resultou em R² acima de 0,70 apenas para as definições de redução de 50% |G*| e redução de 35% C no intervalo entre 2,5% a 5%.

Figura 196 – Correlação entre N/Nf (300 meses) das misturas asfálticas e FFL determinado entre 1 e 5% de deformação dos ligantes

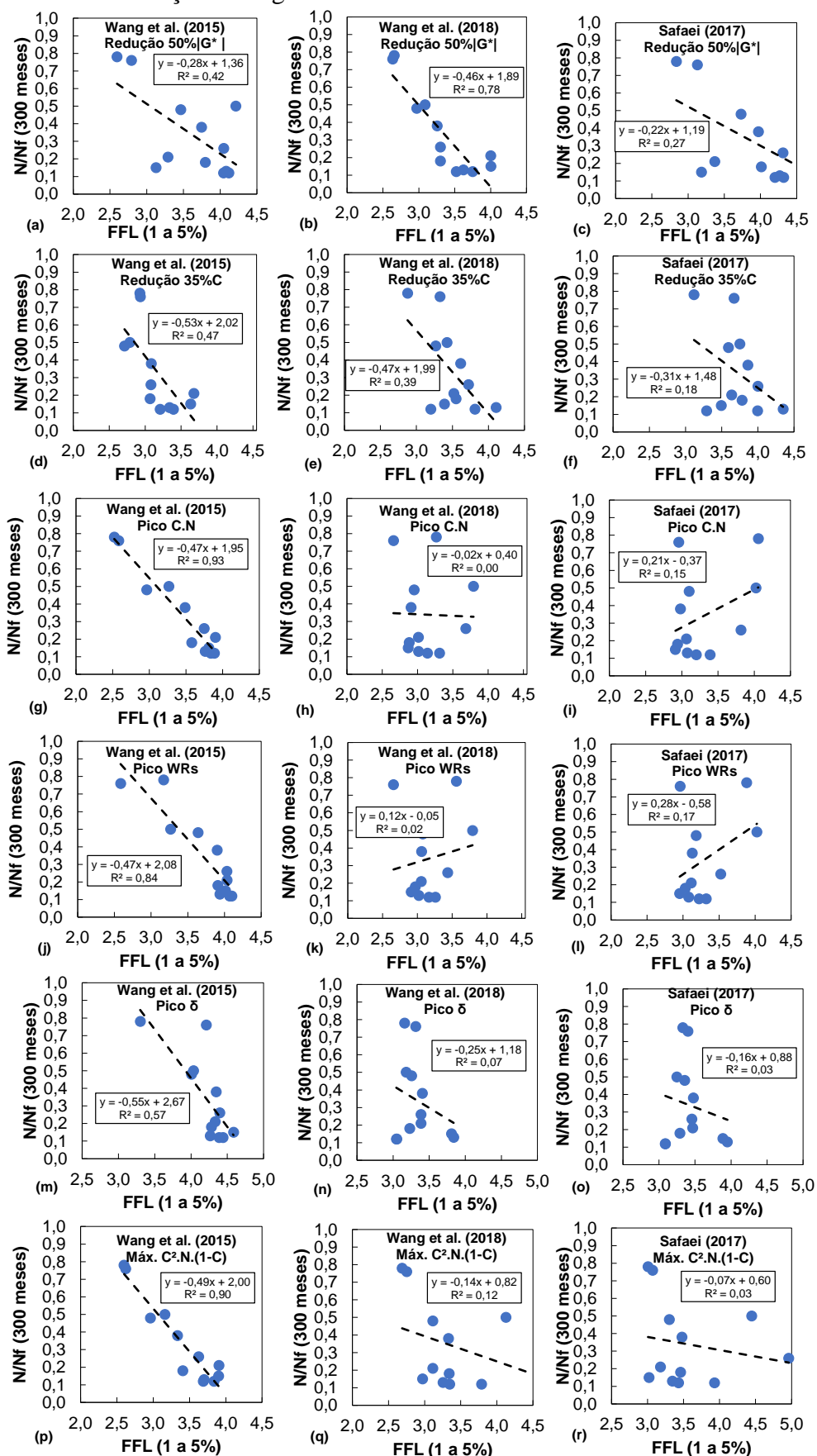


Figura 197 – Correlação entre N/Nf (300 meses) das misturas asfálticas e FFL determinado entre 1 e 2,5% de deformação dos ligantes

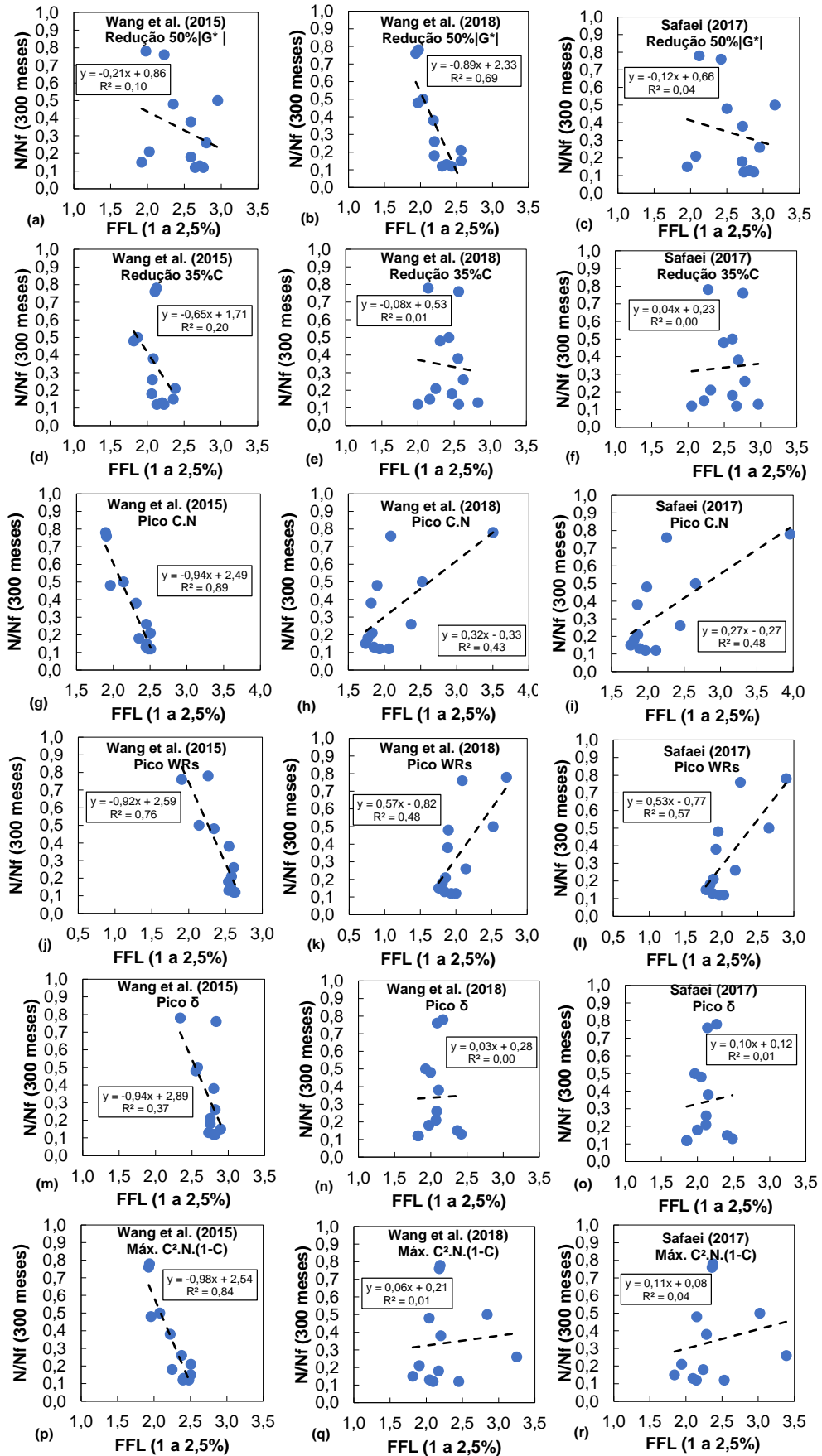


Figura 198 – Correlação entre N/Nf (300 meses) das misturas asfálticas e FFL determinado entre 2,5 e 5,0% de deformação dos ligantes

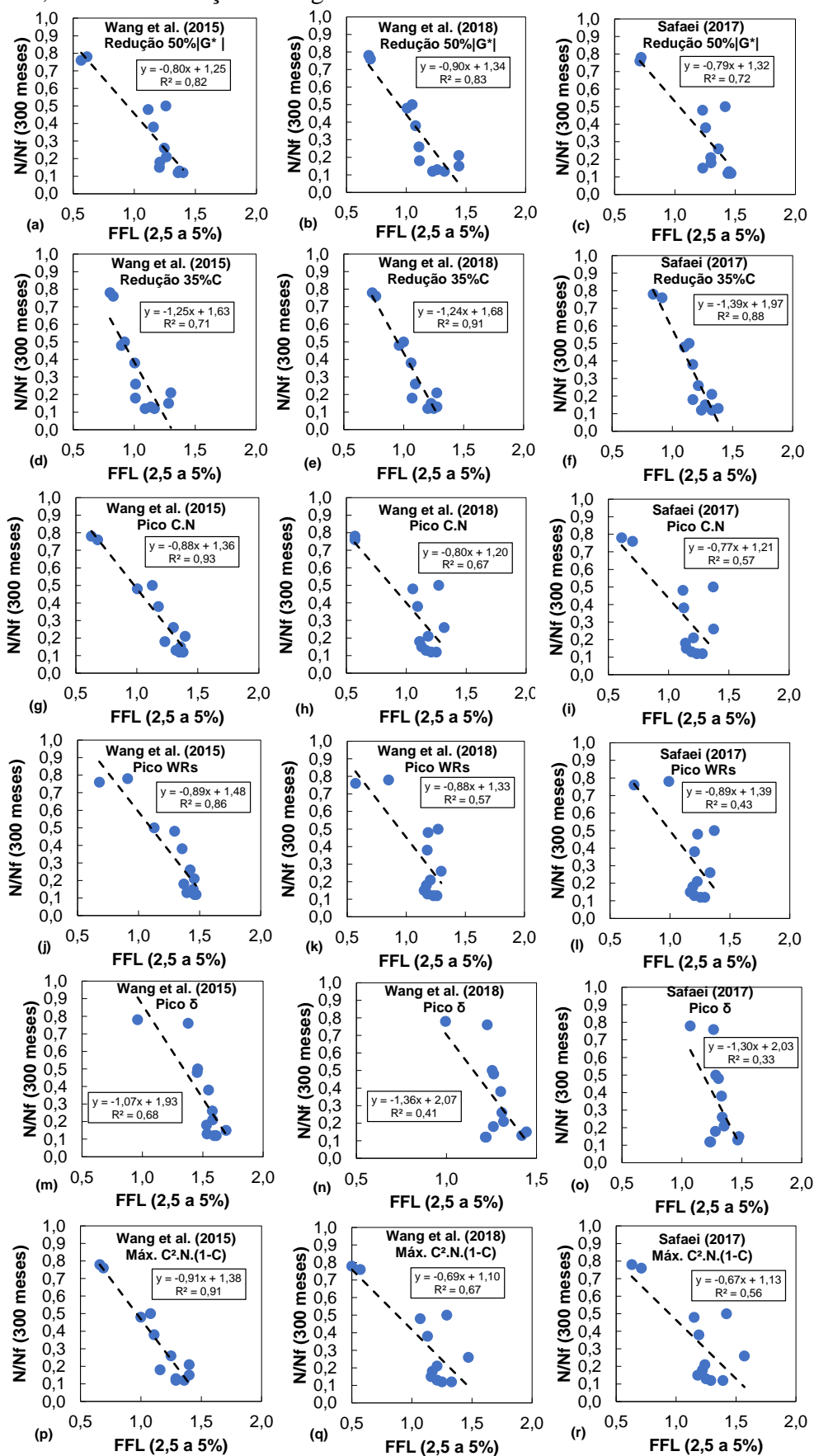


Tabela 44 – Correlação entre N/Nf (FlexPAVE™) vs FFL obtido pelas três equações de simulação da vida de fadiga em intervalos de 1% a 1,5%, 2,5% a 5% e 1% a 5%

N/Nf vs FFL (1,0 a 2,5%)			
Ranking	Wang et al. (2015)	Wang et al. (2018)	Safaei (2017)
1°	Pico C.N (R ² =0,89)	Redução 50% G* (R ² =0,69)	Pico WRs (R ² =0,57)
2°	Máx. C ² .N.(1-C) (R ² =0,84)	Pico WRs (R ² =0,48)	Pico C.N (R ² =0,48)
3°	Pico WRs (R ² =0,76)	Pico C.N (R ² =0,43)	Máx. C ² .N.(1-C) (R ² =0,04)
4°	Pico δ (R ² =0,37)	Máx. C ² .N.(1-C) (R ² =0,01)	Redução 50% G* (R ² =0,04)
5°	Redução 35% C (R ² =0,20)	Redução 35% C (R ² =0,01)	Pico δ (R ² =0,01)
6°	Redução 50% G* (R ² =0,10)	Pico δ (R ² =0,00)	Redução 35% C (R ² =0,00)
N/Nf vs FFL (2,5 a 5,0%)			
Ranking	Wang et al. (2015)	Wang et al. (2018)	Safaei (2017)
1°	Pico C.N (R ² =0,93)	Redução 35% C (R ² =0,91)	Redução 35% C (R ² =0,88)
2°	Máx. C ² .N.(1-C) (R ² =0,91)	Redução 50% G* (R ² =0,83)	Redução 50% G* (R ² =0,72)
3°	Pico WRs (R ² =0,86)	Máx. C ² .N.(1-C) (R ² =0,67)	Pico C.N (R ² =0,57)
4°	Redução 50% G* (R ² =0,82)	Pico C.N (R ² =0,67)	Máx. C ² .N.(1-C) (R ² =0,56)
5°	Redução 35% C (R ² =0,71)	Pico WRs (R ² =0,57)	Pico WRs (R ² =0,43)
6°	Pico δ (R ² =0,68)	Pico δ (R ² =0,41)	Pico δ (R ² =0,33)
N/Nf vs FFL (1,0 a 5,0%)			
Ranking	Wang et al. (2015)	Wang et al. (2018)	Safaei (2017)
1°	Pico C.N (R ² =0,93)	Redução 50% G* (R ² =0,78)	Redução 50% G* (R ² =0,27)
2°	Máx. C ² .N.(1-C) (R ² =0,90)	Redução 35% C (R ² =0,39)	Redução 35% C (R ² =0,18)
3°	Pico WRs (R ² =0,84)	Máx. C ² .N.(1-C) (R ² =0,12)	Pico WRs (R ² =0,17)
4°	Pico δ (R ² =0,57)	Pico δ (R ² =0,07)	Pico C.N (R ² =0,15)
5°	Redução 35% C (R ² =0,47)	Pico WRs (R ² =0,02)	Máx. C ² .N.(1-C) (R ² =0,03)
6°	Redução 50% G* (R ² =0,42)	Pico C.N (R ² =0,00)	Pico δ (R ² =0,03)

De modo geral, as definições do ciclo de falha pelo pico do C.N e pelo máximo C².N.(1-C), com a previsão da vida de fadiga determinada pela equação de Wang et al. (2015), resultaram em correlações com N/Nf das misturas acima de 0,84 independente do nível de deformação (1,0%, 2,5% e 5%) e intervalo do FFL (1,0% a 2,5%, 2,5% a 5,0% e 1,0% a 5,0%). Assim, essas formulações de cálculo podem ser propostas para selecionar e dosar o agente rejuvenescedor com base no dano por fadiga.

5.7. CONCLUSÕES

Esta seção investigou os efeitos do envelhecimento e do rejuvenescimento em propriedades LVE e de desempenho em misturas asfálticas 100% RAP com diferentes concentrações de AR e a combinação entre AR e otimização do teor final com HiMA. A partir dos resultados, as conclusões estão descritas a seguir.

Os efeitos do envelhecimento nas propriedades dos ligantes asfálticos foram similarmente identificados nos testes em misturas asfálticas. Em termos de rigidez, verificou-se um aumento mais significativo no domínio de altas temperaturas em comparação às temperaturas intermediárias. Em contrapartida, as misturas Neat RAP e SBS RAP exibiram maior elasticidade e não atingiram o pico do ângulo de fase dentro das condições do teste.

O agente rejuvenecedor reverteu alguns dos efeitos do envelhecimento a nível de misturas asfálticas, reestabelecendo as propriedades viscoelásticas com redução da rigidez, maior viscosidade e apresentação do pico do ângulo de fase nas condições do teste, similar às misturas convencionais. No geral, o AR e AR + HiMA resultaram em misturas mais rígidas e menos flexíveis em altas temperaturas, e menos rígidas e mais flexíveis em temperaturas intermediárias e baixas quando comparadas às misturas com materiais virgens.

O envelhecimento melhorou o comportamento das misturas quanto à deformação permanente como resultado da maior rigidez e elasticidade das misturas em altas temperaturas. A presença e concentração do AR e AR + HiMA não tornaram as misturas recicladas susceptíveis ao teste de *Flow Number*, inclusive em misturas recicladas com PGH contínuo e Jnr3,2 similares aos ligantes virgens das misturas REF.

Com relação à fadiga, os efeitos do envelhecimento e rejuvenescimento foram identificados nas curvas C vs S, nos critérios de ruptura do G^R e D^R , nas soluções analíticas de simulações de vida de fadiga de Santos et al. (2020) e Wang, Underwood e Kim (2020), e nas simulações de desempenho no FlexPAVETM, exibindo assim a assertividade e a acurácia do teste ensaio uniaxial cíclico à tração-compressão e a interpretação dos dados pelo S-VECD em caracterizar as misturas recicladas.

A ação AR e AR + HiMA nas misturas resultou em C vs S mais baixas, envoltórios do G^R vs Nf na posição superior e menores valores de Δ , aumento nos valores de D^R , o que são indicativos de maior tolerância ao dano por fadiga. Esse ganho de resistência foi confirmado pelas na simulação da vida de fadiga de suas soluções analíticas que utilizam os parâmetros S-VECD e os coeficientes do G^R e D^R .

As simulações no FlexPAVETM permitiram observar a variação de comportamento entre as diferentes misturas quando colocadas em mesma estrutura e sujeitas às mesmas condições climáticas e de tráfego. Os resultados evidenciaram que a presença, a concentração do AR e a otimização por HiMA resultaram na redução da taxa de evolução do dano médio acumulado por trincamento por fadiga no revestimento asfáltico ao longo das condições simuladas.

Em termos da concentração do AR, as misturas recicladas com 8% de AR já apresentam maior vida de fadiga que as misturas de referência quando se analisa as simulações no FlePaveTM com o critério do G^R . Além disso, verifica-se que o ganho de desempenho ocorre até a concentração de 12%. Por outro lado, o critério do D^R exibe que a melhora na performance à fadiga ocorre até a concentração de 16%. Tal fato pode ser atribuído ao aumento da tenacidade

das misturas com adição de maiores teores de AR que levam a falha posterior das misturas asfálticas, fato esse mais evidenciado com a combinação entre AR e HiMA.

A partir da correlação entre os resultados do teste em ligantes e as simulações no FlexPAVE™, identificou-se quais definições de falha, equações de simulação da vida de fadiga e o intervalo de deformação para cálculo do FFL obtidos a partir do teste LAS são assertivos e fidedignos para explicar os danos obtidos em cada mistura asfáltica.

As definições do ciclo de falha pelo pico do C.N e pelo máximo $C^2.N.(1-C)$, com a previsão da vida de fadiga determinada pela equação de Wang et al. (2015), resultaram em correlações com N/N_f das misturas acima de 0,84 independente do nível de deformação (1,0%, 2,5% e 5%) e intervalo do FFL (1,0% a 2,5%, 2,5% a 5,0% e 1,0% a 5,0%). Assim, essas formulações de cálculo podem ser propostas para selecionar e dosar o agente rejuvenescedor com base no dano por fadiga.

Portanto, os resultados dessa seção mostraram a potencialidade da presença e da concentração do agente rejuvenescedor, e a combinação com o ligante HiMA, em restaurar a vida de fadiga de misturas 100% RAP com desempenho equivalente e superior às misturas com materiais virgens, sem promover um desbalanceamento com a deformação permanente. Além disso, foi possível identificar os parâmetros e as formulações de interpretação no teste LAS para definição do teor ótimo com base no principal mecanismo de falha em misturas recicladas com alto teor de RAP.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa teve por objetivo avaliar a potencialidade de agentes rejuvenescedores em recuperar a vida de fadiga e definir parâmetros de dosagem com base neste mecanismo de danificação a partir da análise em ligantes e validações em misturas asfálticas 100% RAP. Para isso, o programa experimental foi proposto em três capítulos experimentais com abrangência em duas diferentes fontes de RAPs. As conclusões obtidas se limitam ao universo dos materiais pesquisados.

O primeiro capítulo experimental calibrou o processo de recuperação dos ligantes RAPs no evaporador rotativo a partir de testes reológicos e de desempenho conduzidos no DSR. Os resultados evidenciaram que a presença de modificação e o maior nível de envelhecimento dos ligantes asfálticos exigem maiores tempos de destilação para completa evaporação do TCE sob aplicação de condições fixas de temperatura de banho, taxa de rotação do balão, fluxo de nitrogênio e de vácuo. A presença de solvente residual foi identificada nos ligantes recuperados conforme a ASTM D 5404 (2017), resultando em subestimativa do nível de envelhecimento dos materiais. A finalização do processo de destilação por meio da análise visual não considera as particularidades dos ligantes quanto a presença de modificação e nível de envelhecimento. O teste FTIR, amplamente utilizado na análise qualitativa do processo, não foi sensível às baixas concentrações de solvente residual.

Em contrapartida, a ausência de solvente residual e de envelhecimento adicional nos ligantes RAPs recuperados foi garantida a partir da identificação da estabilização das propriedades reológicas e de desempenho em um intervalo de 30 minutos. A análise conjunta entre o $|G^*|/\sin \delta$, o PGH contínuo, o MSCR (Jnr e R% em 3,2 kPa) e o teste LAS (ciclo de falha e C vs S) indicaram tempos similares de destilação para a completa evaporação do TCE, exibindo consistência para calibrar o processo no evaporador rotativo.

Os ligantes RAPs recuperados foram utilizados no segundo capítulo experimental para investigação dos efeitos do envelhecimento e do rejuvenescimento com foco principal em identificar parâmetros de seleção e dosagem do agente rejuvenescedor com base no fenômeno de fadiga, e compará-los aos demais parâmetros LVE e de deformação permanente. Diferentes abordagens de interpretação do teste LAS foram utilizadas para identificar quais são sensíveis ao envelhecimento e rejuvenescimento.

Os resultados exibiram que a interpretação do teste LAS com base nas definições de falha do pico C.N e pico do $C^2.N.(1-C)$ são sensíveis ao envelhecimento e ao rejuvenescimento para selecionar e dosar o agente rejuvenescedor com base na fadiga. A dosagem mínima para

restaurar a vida de fadiga por meio de doze índices extraídos desse processo de interpretação (rigidez, ciclo de falha nos diferentes CSRs, C vs S, envoltórios de ruptura e simulações da vida de fadiga) resultaram em teores médios convergentes com baixo desvio padrão e coeficiente de variação.

Os efeitos do envelhecimento são mais intensos em propriedades medidas em alta temperatura do que em intermediária e baixa temperatura. Assim, dependendo do domínio do parâmetro utilizado para dosar o agente rejuvenescedor, diferentes teores são identificados. Assim, a concentração de agente rejuvenescedor para restaurar a vida de fadiga (7,1% a 9,6%) foi inferior aos parâmetros LVE (9,9% a 15,1%) e de deformação permanente (7,4% a 19,3%). Outro dado importante refere-se à variação entre os teores ótimos por diferentes parâmetros dentro de um mesmo domínio. Os parâmetros de fadiga exibiram uma menor variabilidade em torno da média (7% a 9%) em comparação aos LVE (16% a 22%) e de deformação permanente (34% a 37%).

Por fim, o terceiro capítulo experimental investigou os efeitos do envelhecimento e do rejuvenescimento em propriedades LVE e de desempenho em misturas asfálticas 100% RAP com diferentes concentrações de AR e a combinação entre AR e otimização do teor final com HiMA. De modo geral, o AR e AR + HiMA resultaram em misturas mais rígidas e menos flexíveis em altas temperaturas, e menos rígidas e mais flexíveis em temperaturas intermediárias e baixas quando comparadas às misturas com materiais virgens.

Os testes em misturas confirmaram a potencialidade da presença e da concentração do AR e a combinação de AR + HiMA em restaurar a vida de fadiga de misturas 100% RAP à desempenho equivalente e superior às misturas com materiais virgens, sem promover um desbalanceamento com a deformação permanente. Além disso, foi possível validar os parâmetros de seleção e dosagem do AR com base nos testes de fadiga em ligantes asfálticos.

A interpretação dos resultados do teste LAS pelas definições de falha do pico do C.N e pelo máximo $C^2.N.(1-C)$, com a previsão da vida de fadiga determinada pela equação de Wang et al. (2015), resultaram em correlações com N/N_f das misturas acima de 0,84 independente do nível de deformação (1,0%, 2,5% e 5%) e intervalo do FFL (1,0% a 2,5%, 2,5% a 5,0% e 1,0% a 5,0%). Assim, essas formulações de cálculo podem ser propostas para selecionar e dosar o agente rejuvenescedor com base no dano por fadiga.

Assim, espera-se que o programa experimental e os resultados obtidos nesta tese contribuam e forneçam diretrizes para mais pesquisas na área, para assim, a partir de uma quantidade mais robusta de materiais em termos de RAPs e agentes rejuvenescedores,

procedimentos normatizados para caracterização e projeto de misturas recicladas possam ser elaborados.

6.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir dos resultados da tese, prospecta como trabalhos futuros os seguintes pontos:

- a) Investigação química dos efeitos do envelhecimento de ligantes asfálticos, a fim de identificar os marcadores que resultaram na diferença da vida de fadiga entre ligantes envelhecidos em laboratório e em pista;
- b) Avaliar os ligantes rejuvenescidos a fim de identificar quimicamente se os componentes do material são reestabelecidos;
- c) Utilizar outros tipos de agente rejuvenescedores, como a base de petróleo, a fim de verificar se o grau de mistura e os efeitos nas propriedades são similares aos agentes rejuvenescedores a base de óleo vegetal;
- d) Testar a produção de misturas com uma temperatura inferior ao utilizado nesta pesquisa, pois após a pulverização do agente rejuvenescedor, verificou-se uma facilidade de usinagem e densificação no CGS, que do ponto de vista do autor, fornece margem para redução da temperatura para 140°C. A redução da temperatura acompanhada da manutenção do desempenho das misturas recicladas pode resultar em ganhos significativos em termos de custos e emissões de gases;
- e) Além da utilização de mais fontes de RAP, recomenda-se a utilização de outros teores de incorporação a fim de avaliar o grau de mistura entre o RAP + AR com outros materiais virgens (agregados e ligantes);
- f) Explorar a utilização da combinação entre AR e teor adicional de 0,5% a 1,0% de outros tipos de ligante virgem. Além de um ganho no desempenho a fadiga sem promover um desbalanceamento com a deformação permanente, o teor de ligante adicional é uma alternativa às novas arestas geradas pelo processo de fresagem e possível britagem do material em usina para um possível enquadramento granulométrico;
- g) Promover uma análise de custos vs performance das soluções entre AR e combinação de AR + HiMA, juntamente com avaliação do ciclo de vida;

- h) Um número importante de conclusões foi com base em testes laboratoriais. A validação com observações em pista deve ser realizada.

REFERÊNCIAS

- AASHTO M 320. Standard specification for performance-graded asphalt binder. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, 2017.
- AASHTO M 323. Standard specification for superpave volumetric mix design. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, 2017.
- AASHTO M 332. Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder Using Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, 2019.
- AASHTO MP 46. Standard Practice for Balanced Mix Design. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, 2020.
- AASHTO PP 105. Standard Practice for Balanced Mix Design of Asphalt Mixtures. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, 2020.
- AASHTO R 28. Standard Practice for Accelerated Aging of Asphalt Binder Using a Pressurized Aging Vessel (PAV). American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, 2016.
- AASHTO R 59. Recovery of asphalt binder from solution by Abson method. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, 2011.
- AASHTO T 166. Standard Method of Test for Bulk Specific Gravity (Gmb) of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA) Using Saturated Surface-Dry Specimens. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, 2016.
- AASHTO T 240. Standard method of test for effect of heat and air on a moving film of asphalt binder (Rolling Thin-Film Oven Test). Washington, D. C., 2013.
- AASHTO T 315. Standard Method of Test for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR). American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, 2020.
- AASHTO T 342. Standard Method of Test for Determining Dynamic Modulus of Hot-Mix Asphalt Concrete Mixtures. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, 2011.
- AASHTO T 350. Standard Method of Test for Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR). American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, 2019.
- AASHTO TP 107. Standard method of test for determining the damage characteristic curve of asphalt mixtures from direct tension cyclic fatigue tests. American Association of State Highway and Transportation Officials, 2018.
- ABED, A.; THOM, N.; LO PRESTI, D. Design considerations of high RAP-content asphalt produced at reduced temperatures. *Materials and Structures*, 51:91, 2018. DOI: 10.1617/s11527-018-1220-1.
- ABNT NBR 15619. Misturas asfálticas - Determinação da densidade máxima teórica e da massa específica máxima teórica em amostras não compactadas. 2016.
- ABNT NBR 16505. Misturas asfálticas - Resistência à deformação permanente utilizando o ensaio uniaxial de carga repetida. 2016.
- ABNT NBR 6560. Ligantes asfálticos – Determinação do ponto de amolecimento – Método do anel e bola. 2016.
- ABUHASSAN, Y. et al. Effect of extraction solvents on rheological properties of recovered asphalt binders. *J. Transp. Eng., Part B: Pavements*, 145(1): 04018064, 2019. DOI:10.1061/JPEODX.0000096.
- AIREY, G. D. State of the Art report on ageing test methods for bituminous pavement materials. *International Journal of Pavement Engineering*, 4(3), 165–176, 2003. DOI: 10.1080/1029843042000198568.

- ALI, A. H.; MASHAAN, N. S.; KARIM, M. R. Investigations of physical and rheological properties of aged rubberised bitumen. *Advances in Materials Science and Engineering*, v. 2013, 7 p., 2013. DOI: 10.1155/2013/239036.
- ALI, A. W., MEHTA, Y. A., NOLAN, A., PURDY, C., & BENNERT, T. Investigation of the impacts of aging and RAP percentages on effectiveness of asphalt binder rejuvenators. *Construction and Building Materials*, v. 110, p. 211-217, 2016. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.013.
- ALMEIDA JÚNIOR, P. O. B. et al. Avaliação laboratorial do tipo e teor de ligante e da granulometria na deformação permanente de misturas asfálticas. *Transportes*, v. 26, p. 1-15, 2018. DOI: 10.14295/transportes.v26i2.1407.
- AL-QADI, I. L. et al. Impact of high RAP contents on structural and performance properties of asphalt mixtures. 2012.
- AMERI, M. et al. A study on fatigue modeling of hot mix asphalt mixtures based on the viscoelastic continuum damage properties of asphalt binder. *Construction and Building Materials*, v. 106, p. 243-252, 2016. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.066.
- AMERI, M.; MANSOURKHAKI, A.; DARYAEE, D. Evaluation of fatigue behavior of asphalt binders containing reclaimed asphalt binder using simplified viscoelastic continuum damage approach. *Construction and Building Materials*, v. 202, p. 374-386, 2019. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.021.
- ANDERSON, D. A. et al. Evaluation of fatigue criteria for asphalt binders. *Transportation Research Record*, v. 1766, p. 48-56, 2001.
- ANDERSON, E. D.; DANIEL, J. S. Long-term performance of pavement with high recycled asphalt content: case studies. *Transportation Research Record*, v. 2371, p. 1-12, 2013. DOI: 10.3141/2371-01.
- ARAMBULA-MERCADO, E. et al. Evaluation of recycling agent dosage selection and incorporation methods for asphalt mixtures with high RAP and RAS contents. *Construction and Building Materials*, v. 158, p. 432-442, 2018. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.10.024.
- ARULRAJAH, A. et al. Evaluation of interface shear strength properties of geogrid-reinforced construction and demolition materials using a modified large scale direct shear testing apparatus. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 26, n. 5, p. 974-982, 2014. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000897.
- ASHQAR, H. I. Evaluation of polymer modified asphalt binder aging [Master thesis]. School of Engineering, University of Minho, 2015.
- ASTM D 2172. Standard Test Methods for Quantitative Extraction of Asphalt Binder from Asphalt Mixtures. 2017.
- ASTM D 2726. Standard Test Methods for Quantitative Extraction of Asphalt Binder from Asphalt Mixtures, 2017.
- ASTM D 2872. Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test). 2019.
- ASTM D 3203. Standard Test Method for Percent Air Voids in Compacted Asphalt Mixtures. 2017.
- ASTM D 4552. Standard practice for classifying hot-mix recycling agents. 2016.
- ASTM D 4887. Standard Practice for Preparation of Viscosity Blends for Hot Recycled Asphalt Materials. 2016.
- ASTM D 5404. Standard Practice for Recovery of Asphalt from Solution Using the Rotary Evaporator. 2017.
- ASTM D 6307. Standard Test Method for Asphalt Content of Asphalt Mixture by Ignition Method. 2019.
- ASTM D 6521. Standard Practice for Accelerated Aging of Asphalt Binder Using a Pressurized Aging Vessel (PAV). 2019.
- ASTM D 6931. Standard Test Method for Indirect Tensile (IDT) Strength of Asphalt Mixtures. 2017.
- ASTM D 7405. Standard Test Method for Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR) of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer, 2020.

- BABADOPULOS, L. F. A.; SOARES, J. B.; FERREIRA, J. L. S.; NASCIMENTO, L. A. H. Fatigue cracking simulation of aged asphalt pavements using a viscoelastic continuum damage model. *Road Materials and Pavement Design*, v. 19, p. 546-560, 2018. DOI: 10.1080/14680629.2018.1418715.
- BAHIA, H. U. et al. Development of binder specification parameters based on characterization of damage behavior (with discussion). *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, v. 70, 2001.
- BAHIA, H.; TABATABAEE, H. A.; MANDAL, T.; FAHEEM, A. Field, Evaluation of Wisconsin Modified Binder Selection Guidelines – Phase II Wisconsin Department of Transportation, 2013
- BALBO, T. J. *Pavimentação Asfáltica. Materiais, projeto e restauração*. 1º Ed, 3ª reimpressão. São Paulo: Editora Oficina de Textos, 2007.
- BASTOS, J. B. S.; SOARES, J. B.; NASCIMENTO, L. A. H. Critérios Para os Resultados do Ensaio Uniaxial de Carga Repetida de Misturas Asfálticas em Laboratório a partir do desempenho em Campo. *Revista Transportes*, v. 25, p. 19-40, 2017. DOI: 10.14295/transportes.v25i2.1284.
- BEHNOOD, A. Application of rejuvenators to improve the rheological and mechanical properties of asphalt binders and mixtures: A review. *Journal of Cleaner Production*, v. 231, p. 171-182, 2019. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.05.209.
- BEHNOOD, A., & GHAREHVERAN, M. M. Morphology, rheology, and physical properties of polymer-modified asphalt binders. *European Polymer Journal*, v. 112, p. 766–791, 2019. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2018.10.049.
- BENNERT, T.; MAHER, A. Forensic study on the cracking of New Jersey's long-term pavement performance specific pavement study sections. *Transportation Research Record*, v. 2371, p. 74-86, 2013. DOI: 10.3141/2371-09.
- BERKOWITZ, M. et al. Oxidative and thermoreversible aging effects on performancebased rheological properties of six Latin American asphalt binders. *Energy & Fuel*, p. 1-33, 2019. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.8b03265.
- BESSA, I. S. et al. Fatigue resistance of asphalt binders and the correlation with asphalt mixture behaviour. *Road Materials and Pavement Design*, v. 20, p. S695-S709, 2019. DOI: 10.1080/14680629.2019.1633741.
- BLANC, J. et al. Full-scale validation of bio-recycled asphalt mixtures for roadpavements. *Journal of Cleaner Production*, v. 227, p. 1068-1078, 2019. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.04.273.
- BOEIRA, F. D. *Estudo do comportamento mecânico de misturas asfálticas com ligantes modificados*. Tese de doutorado. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2018.
- BOHN, K. A. *Avaliação de Misturas Asfálticas Recicladas Mornas com Uso de Ligantes Convencional e Modificado por Polímero*. 255 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2017.
- BONNETTI, K. S.; NAM, K.; BAHIA, H. U. Measuring and defining fatigue behavior of asphalt binders. *Transportation Research Record*, v. 1810, p. 33-43, 2002. DOI: 10.3141/1810-05.
- BORIACK, P. C. et al. Laboratory evaluation of asphalt concrete mixtures containing high contents of reclaimed asphalt pavement (RAP) and binder. Virginia Center for Transportation Innovation and Research, 2014.
- BOWERS, B. F. et al. Investigation of reclaimed asphalt pavement blending efficiency through GPC and FTIR. *Construction and Building Materials*, v. 50, p. 517–523, 2014. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.10.003.
- BOWERS, B. F., MOORE, J., HUANG, B., HE, Q., SHU, X., JIA, X., & MILLER, B.C. Investigation of sequential dissolution of asphalt binder in common solvents by FTIR and binder fractionation. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27 (8), 2014. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001198.
- BRETT, A. W.; Willis, J. R.; Shacat, J. *Asphalt Pavement Industry Survey on Recycled Materials and Warm-Mix Asphalt Usage: 2019*. 10th Annual Survey Final Report. National Asphalt Pavement Association, 2020.
- BS EN 12697-3. Bituminous mixtures. Test methods. Bitumen recovery: Rotary evaporator, 2018.

- BUENO, L. D. et al. Asphalt pavement design optimisation: a case study using viscoelastic continuum damage theory. *International Journal of Pavement Engineering*, v. 23, 2020. DOI: 10.1080/10298436.2020.1788030.
- BURR, B. L., DAVISON, R. R., GLOVER, C. J., & BULLIN, J. A. (1990). Solvent removal from asphalt. *Transportation Research Record*, v. 1269, p. 1-8, 1990.
- BURR, B. L., DAVISON, R. R., JEMISON, H. B., GLOVER, C. J., & BULLIN, J. A. Asphalt hardening in extraction solvents. *Transportation Research Record*, v. 1323, p. 1-8, 1991.
- CAO, W., WANG, Y., & WANG, C. Fatigue characterization of bio-modified asphalt binders under various laboratory aging conditions. *Construction and Building Materials*, v. 208, p. 686-696, 2019. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.069.
- CAO, W.; MOHAMMAD, L. N.; ELSEIFI, M. Assessing the effects of RAP, RAS, and warm-mix technologies on fatigue performance of asphalt mixtures and pavements using viscoelastic continuum damage approach. *Road Materials and Pavement Design*, v. 18, p. 353-371, 2017. DOI: 10.1080/14680629.2017.1389078.
- CAO, W.; WANG, C. A new comprehensive analysis framework for fatigue characterization of asphalt binder using the Linear Amplitude Sweep test. *Construction and Building Materials*, v. 171, p. 1-12, 2018. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.125.
- CAO, W.; WANG, C. Fatigue performance characterization and prediction of asphalt binders using the linear amplitude sweep based viscoelastic continuum damage approach. *International Journal of Fatigue*, v. 119, p. 112-125, 2019. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2018.09.028.
- CARDONA, D. A. R. et al. Viscoelastic behavior characterization of a Gap-graded asphalt mixture with SBS polymer modified bitumen. *Materials Research*, v. 18, p. 373-381, 2015. DOI: 10.1590/1516-1439.332214.
- CARPENTER, S. H.; WOLOSICK, J. R. Modifier influence in the characterization of hot-mix recycled material. *Transportation research record*, n. 777, 1980.
- CARRION, J. B. Design and characterisation of reclaimed asphalt mixtures with biobinders. PhD Thesis. University of Nottingham, Nottingham, Inglaterra, 2017.
- CARRION, J. B. et al. Evaluation of bio-materials' rejuvenating effect on binders for high-reclaimed asphalt content mixtures. *Materiales de Construcción*, v. 67, 2017. DOI: 10.3989/mc.2017.04516.
- CAVALLI, M. C. et al. Aging effect on rheology and cracking behaviour of reclaimed binder with bio-based rejuvenators. *Journal of Cleaner Production*, v. 189, p. 88-97, 2018. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.03.305.
- CAVALLI, M. C.; PARTL, M. N.; POULIKAKOS, L. D. Measuring the binder film residues on black rock in mixtures with high amounts of reclaimed asphalt. *Journal of Cleaner Production*, v. 149, p. 665-672, 2017. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.02.055.
- CENTOFANTE, R. Estudo laboratorial da utilização de material fresado em misturas asfálticas recicladas à quente. 162 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2016.
- CHEN, M.Z. et al. High temperature properties of rejuvenating recovered binder with rejuvenator, waste cooking and cotton seed oils. *Construction and Building Materials*, v. 59, p. 10–16, 2014. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.02.032.
- CHIPPERFIELD, E. H.; DUTHIE, J. L.; GIRDLER, R. B. asphalt characteristics in relation to road performance and discussion. *Association of Asphalt Paving Technologists Proc*, v. 39, p. 575-613, 1970.
- COPELAND, A. Reclaimed asphalt pavement in asphalt mixtures: state of the practice. Report No. FHWA-HRT-11-021, Federal Highway Administration, McLean, Virginia, 2011.
- CORBETT, L. W. Composition of asphalt based on generic fractionation using solvent deasphalting, elution - adsorption chromatography and densimetric characterization. *Analytical Chemistry*, v. 41, p. 576-579, 1969.

- CORREA, M. C. Análise de rigidez e danificação de misturas asfálticas recicladas a quente com diferentes tipos e teores de RAP. 149 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2020.
- CRAVO, M. C. C. efeitos do envelhecimento térmico e fotoquímico em ligantes asfálticos, mástique e matriz de agregados finos. 251 p. Tese de Doutorado – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2016.
- CUCALON, L. G. et al. The crossover temperature: significance and application towards engineering balanced recycled binder blends. *Road Materials and Pavement Design*, v. 20, p. 1391-1412, 2018. DOI: 10.1080/14680629.2018.1447504.
- DEHOUCHE, N.; KACI, M.; MOKHTAR, K. A. Influence of thermo-oxidative aging on chemical composition and physical properties of polymer modified bitumen. *Construction and Building Materials*, v. 26, p. 350-356, 2012. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.06.033.
- DI BENEDETTO, H. et al. Fatigue of Bituminous Mixtures. *Materials and Structures*, v. 37, p. 202-216, 2004.
- DI BENEDETTO, H.; CORTÉ, J. F. *Matériaux routiers*. Tome 2, 283 p, 2005.
- DI BENEDETTO, H.; OLARD, F.; SAUZÉAT, C.; DELAPORTE, B. Linear viscoelastic behaviour of bituminous materials: From binders to mixes. *Road Materials Pavement Design*, p. 163–202, 2004. DOI: 10.1080/14680629.2004.9689992.
- DIEFENDERFER, S. D. Developing a laboratory protocol for asphalt binder recovery. Virginia Center for Transportation Innovation and Research, Report No. FHWA/VCRIR 15-R7, 2014.
- DING, Y.; HUANG, B.; SHU, X. Blending efficiency evaluation of plant asphalt mixtures using fluorescence microscopy. *Construction and Building Materials*, v. 161, p. 461-467, 2018. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.138.
- DINIS-ALMEIDA, M. et al. Performance of warm mix recycled asphalt containing up to 100% RAP. *Construction and Building Materials*, v. 112, p. 1-6, 2016. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.108.
- DINIZ-ALMEIDA, M.; AFONSO, M. L. Performance of Warm Mix Recycled Asphalt containing up to 100% RAP. *Construction and Building Materials*, v. 112, p. 1-6, 2016. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.108.
- DNER ME 053. Misturas betuminosas – percentagem de betume. 1994.
- DNER ME 083. Agregados – análise granulométrica. 1999.
- DNER PRO 199. Redução de amostra de campo de agregados para ensaio de laboratório. 1996.
- DNIT ME 136. Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral, 2018.
- DNIT ME 155. Material asfáltico – Determinação da penetração – Método de ensaio. 2010.
- DNIT ME 184. Pavimentação - Misturas asfálticas - Ensaio uniaxial de carga repetida para determinação da resistência à deformação permanente – Método de ensaio. 2018.
- DNIT ME 382. Material asfáltico – Determinação da recuperação elástica de materiais asfálticos modificados por polímero, pelo método do ductilômetro, 1999.
- EAPA. Asphalt in figures 2020. European Asphalt Pavement Association. Belgica, Brussels, 2020.
- EAPA. Recommendations for the use of rejuvenators in hot and warm asphalt production. European Asphalt Pavement Association. Belgica, Brussels, 2018.
- EL BEZE, L. Recyclage à chaud des agregats d'enrobes bitumineux: Identification de Traceurs D'Homogénéité du Melangé Entre Bitume Vieilli et Bitume Neuf d'Apport". Thèse, 318, 2008.
- ELWARDANY, M. D.; RAD, F. Y.; CASTORENA, C.; & KIM, R. Evaluation of asphalt mixture laboratory long-term ageing methods for performance testing and prediction. *Road Materials and Pavement Design*, 18 (1), 2016. DOI: 10.1080/14680629.2016.1266740.

- EN 13108-1. Bituminous mixtures. Material specifications. Asphalt Concrete. 2016.
- FACCIN, C. concretos asfálticos em utilização no rio grande do sul: comportamento mecânico e desempenho em campo quanto à deformação permanente. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2018.
- FACCIN, et al. Flow Number parameter as a performance criteria for asphalt mixtures rutting: evaluation to mixes applied in Brazil Southern region. *International Journal of Pavement Engineering*, 2021. DOI: 10.1080/10298436.2021.1880580.
- FARRAR, M. J. et al. Evolution of the crossover modulus with oxidative aging. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 2370(1), p. 76–83, 2013. DOI: 10.3141/2370-10.
- FARROKHZADE, F.; SABOURI, M.; TABATABAEE, N. Aging characteristics of neat and modified asphalt binders based on rheological evaluations at intermediate temperatures. *Construction and Building Materials*, v. 332, 2022. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.126387.
- FRANCO, F. A. C. P.; MOTTA, L. M. G. Execução de Estudos e Pesquisa para Elaboração de Método Mecânico – Empírico de Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos. Projeto DNIT TED n° 682/2014. Processo n° 50607.002043/2013-00. Convênio UFRJ-DNIT, Rio de Janeiro/RJ, 2020.
- GARCIA, A.; SCHLANGEN, E.; VEN, M. V.; SIERRA-BETRAN, G. Preparation of capsules containing rejuvenators for their use in asphalt concrete. *Journal of Hazardous Materials*, v. 184, p. 603-6011, 2010. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2010.08.078.
- GASPAR, M. S. Mecanismos de ativação e interação entre ligantes na reciclagem asfáltica a quente e morna. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.
- GDOT. Georgia standard specifications. Georgia Department of Transportation, Atlanta, 2013.
- GE, D., YOU, Z.; CHEN, S.; LIU, C., GAO, J.; LV, S. (2019). The performance of asphalt binder with trichloroethylene: Improving the efficiency of using reclaimed asphalt pavement. *Journal of Cleaner Production*, v. 232, p. 205-212, 2019. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.05.164.
- GIRIMATH, A.; SINGH, D. Effects of bio-oil on performance characteristics of base and recycled asphalt pavement binders. *Construction and Building Materials*, v. 227, 13 p., 2019. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.116684.
- GOTTUMUKKALA, B. et al. Estimation of Blending of Rap Binder in a Recycled Asphalt Pavement Mix. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 30, p. 1-8, 2018. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002403.
- GUDURU, G.; GOLI, A. K.; MATOLIA, S.; KUNA, K. K. Chemical and performance characteristics of rejuvenated bituminous materials with high reclaimed asphalt content. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 33 (1), 2021. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003540.
- GURUDU, G.; TAVVA, T. L.; KUNA, K. (2020). Estimation of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) characteristics using simple indicative tests. *Road Materials and Pavement Design*, v. 23, p. 822-848, 2020. DOI: 10.1080/14680629.2020.1845785.
- HABBOUCHE, J.; BOZ, I.; UNDERWOOD, S.; CASTORENA, C. Review From Multiple Perspectives for the State of the Practice on the Use of Recycled Asphalt Materials and Recycling Agents in Asphalt Concrete Surface Mixtures. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, v. 2676, p. 407-420, 2021. DOI: 10.1177/03611981211061130.
- HANQI, L. et al. Use of the multiple stress creep recovery (MSCR) test to characterize the rutting potential of asphalt binders: A literature review. *Construction and Building Materials*, v. 269, 2021. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121320.
- HASANINIA, M.; HADDADI, F. Studying engineering characteristics of asphalt binder and mixture modified by nanosilica and estimating their correlations. *Advances in Materials Science and Engineering*, v. 2018, 2018. DOI: 10.1155/2018/4560101.
- HINTZ, C. et al. Modification and validation of linear amplitude sweep test for binder fatigue specification. *Transportation Research Record*, v. 2207, p. 99-106, 2011. DOI: 10.3141/2207-13.

- HOFKO, B. et al. Effect of short-term ageing temperature on bitumen properties. *Road Materials and Pavement Design*, v. 18, p. 108-117, 2017. DOI: 10.1080/14680629.2017.1304268.
- HOSPODKA, M.; HOFKO, B.; BLAB, R. Impact of distillation temperature on the solvent residue and viscoelastic properties of asphalt binders. *Road Materials and Pavement Design*, v. 19(6), p. 1275-1287, 2018. DOI: 10.1080/14680629.2017.1304234.
- HOSSAIN, Z.; ROY, S.; RASHID, F. Microscopic examination of rejuvenated binders with high reclaimed asphalts. *Construction and Building Materials*, v. 257, 2020. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119490.
- HOSSAIN, Z.; SOLANKI, P.; ZAMAN, M.; ADJE, D.; LEWIS, S. Test Methods For Use of Recycled Asphalt Pavement in Asphalt Mixes, College of Engineering, Report No. FHWA-OK-12-01, University of Oklahoma, OK, 2012.
- HOY, M. et al. Effect of wetting-drying cycles on compressive strength and microstructure of recycled asphalt pavement – Fly Ash Geopolymer. *Construction and Building Materials*, v. 144, p. 624-634, 2017. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.03.243.
- HU, J.; WU, S.; LIU, Q.; HERNÁNDEZ, M. I. G.; WANG, Z.; NIE, G.; ZHANG, G. Effect of ultraviolet radiation in different wavebands on bitumen”. *Construction and Building Materials*, v. 159, p. 479-485, 2018. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2017.10.117.
- HUGENER, M. et. al. Recommendation of RILEM TC 264 RAP on the evaluation of asphalt recycling agents for hot mix asphalt. *Materials and Structures*, v. 55, n° 31, 2022. DOI: 10.1617/s11527-021-01837-0.
- HUNTER, R. N.; SELF, A.; READ, P. J. *The Shell Bitumen Handbook*. Fifth Edition, 2015.
- IM, S.; KARKI, P.; ZHOU, F. Development of new mix design method for asphalt mixtures containing RAP and rejuvenators. *Construction and Building Materials*, v. 115, p. 727-734, 2016. DOI: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2016.04.081.
- JACOBS, G. et al. nfluence of soft binder and rejuvenator on the mechanical and chemical properties of bituminous binders. *Journal of Cleaner Production*, v. 287, 2021. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.125596.
- JING, R. et al. Rheological, fatigue and relaxation properties of aged bitumen. *International Journal of Pavement Engineering*, 10 p., 2020. DOI: 10.1080/10298436.2019.1654609.
- JOHNSON, C. Evaluation of Accelerated Procedures for Fatigue Characterization of Asphalt Binders. Tese de Doutorado, Wisconsin, 2010
- JUNTÃO, L. et al. Effectiveness of rejuvenator seal materials on performance of asphalt pavement. *Construction and Building Materials*, v. 55, p. 63-68, 2014. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.01.018.
- KARLSSON, R.; ISACSSON, U. Investigations on bitumen rejuvenator diffusion and structural stability (with discussion). *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, v. 72, 2003.
- KASEER, F.; ARÁMBULA-MERCADO, E.; MARTIN, A. E. A method to quantify reclaimed asphalt pavement binder availability (effective RAP binder) in recycled asphalt mixes. *Transportation Research Record*, v. 2673, p. 205-216, 2019. DOI:10.1177/0361198118821366.
- KUANG, D. et al. A new approach for evaluating rejuvenator diffusing into aged bitumen. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater*, v. 26, p. 43-46, 2011. DOI: 10.1007/s11595-011-0164-x.
- KUANG, D. et al. Effect of Rejuvenator Containing Dodecyl Benzene Sulfonic Acid (DBSA) on Physical Properties, Chemical Components, Colloidal Structure and Micro-Morphology of Aged Bitumen. *Materials*, 11 (8):1476, 2018. DOI:10.3390/ma11081476.
- KUANG, D. et al. Effect of rejuvenators on performance and microstructure of aged asphalt. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater*, v. 29, p. 341-345, 2014. DOI: 10.1007/s11595-014-0918-3.
- LESUEUR, D. The colloidal structure of bitumen: consequences on the rheology and on the mechanism of bitumen modification. In *Advances in Colloid and Interface Science*, v. 145 (1-2), p. 42-82, 2009.

- LI, Z. et al. Assessment on Physical and Rheological Properties of Aged SBS Modified Bitumen Containing Rejuvenating Systems of Isocyanate and Epoxy Substances. *Materials*, v. 12, p. 1-11, 2019. DOI: 10.3390/ma12040618.
- LI. et al. Effect of short-term aging on asphalt modified using microwave activation crumb rubber. *Materials*, v. 12, 13 p., 2019. DOI: 10.3390/ma12071039.
- Lin, M. S. et al. The effect of asphalt composition on the formation of asphaltenes and their contribution to asphalt viscosity. *Fuel Science and Technology International* v. 14(1-2), p.139-162, 1996.
- LIPHARDT, A.; RADZISZEWSKI, P.; KROL, J. Binder blending estimation method in hot mix asphalt with reclaimed asphalt. *Procedia Engineering*, v. 111, p. 502-509, 2015. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.07.123.
- LIU, C. H. et al. Rheological characteristics of aged asphalt binder. *Journal Center University Technology*, v. 15, p. 298-301, 2008. DOI: 10.1007/s11771-008-367-2.
- LO PRESTI et al. On the degree of binder activity of reclaimed asphalt and degree of blending with recycling agents. *Road Materials and Pavement Design*, 2019. DOI: 10.1080/14680629.2019.1607537.
- LO PRESTI, D. et al. Towards 100% recycling of reclaimed asphalt in road surface courses: binder design methodology and case studies. *Journal of cleaner production*, v. 131, p. 43-51, 2016. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.05.093.
- LUZZI, F. C. Adaptação de usina para reciclagem à quente e avaliação laboratorial das misturas asfálticas produzidas. 181 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2019.
- LUZZI, F. C. et al. Adaptação de usina para reciclagem à quente e avaliação laboratorial das misturas asfálticas produzidas. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, v.12, n.3, 2021. DOI: 10.6008/CBPC2179-6858.2021.003.0030.
- MALLICK, R. B. et al. Why not use rejuvenator for 100% RAP recycling?. *Transportation Research Board Annual Meeting*, Washington, 2010.
- MANGIAFICO, S. et al. Complex modulus and fatigue performances of bituminous mixtures with reclaimed asphalt pavement and a recycling agent of vegetable origin. *Road Materials and Pavement Design*, v. 18 (2), p. 315-330, 2017. DOI:10.1080/14680629.2016.1213509.
- MANGIAFICO, S. Linear viscoelastic properties and fatigue of bituminous mixtures produced with Reclaimed Asphalt Pavement and corresponding binder blends. Tese de Doutorado. l'École Nationale des Travaux Publics de l'État, 2014.
- MANKE, N. D. et al. Performance of a sustainable asphalt mix incorporating high RAP content and novel bio-derived binder. *Road Materials and Pavement Design*, v. 22, p. 812-834, 2019. DOI: 10.1080/14680629.2019.1643769.
- MANNAN, U. A.; ISLAM, M. R.; TAREFDER, R. A. Effects of recycled asphalt pavements on the fatigue life of asphalt under different strain levels and loading frequencies. *International Journal of Fatigue*, v. 78, p. 72-80, 2015. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2015.04.004.
- MANTALOVAS, K. Interpreting life cycle assessment results of bio-asphalt pavements for more informed decision-making. In *Pavement, Roadway, and Bridge Life Cycle Assessment 2020, Proceedings of the International Symposium on Pavement, Roadway, and Bridge Life Cycle Assessment 2020*, p. 3-6, 2020.
- MARTINS, A. T. Contribuição para a validação do ensaio de resistência ao dano por fadiga para ligantes asfálticos. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2014.
- MARTONO, W.; BAHIA, H. U.; D'ANGELO, J. Effect of testing geometry on measuring fatigue of asphalt binders and mastics. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 19, p. 746-752, 2007. DOI: 10.1061/ASCE0899-1561(2007)19:9(746).
- MAZZONI, G.; BOCCI, E.; CANESTRARI, F. Influence of rejuvenators on bitumen ageing in hot recycled asphalt mixtures. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, p. 1-12, 2018. DOI: 10.1016/j.jtte.2018.01.001.

- MCDANIEL, R. S. et al. Effects of reclaimed asphalt pavement content and virgin binder grade on properties of plant produced mixtures. *Road Materials and Pavement Design*, v. 13, n. sup1, p. 161-182, 2012. DOI: 10.1080/14680629.2012.657066.
- MCDANIEL, R.; ANDERSON, R. M. NCHRP Report 452: Recommended Use of Reclaimed Asphalt Pavement in the Superpave Mix Design Method: Technician's Manual (NCHRP Report 452). Washington, D.C, 2001.
- MENAPACE, I. et al. Effect of recycling agents in recycled asphalt binders observed with microstructural and rheological tests. *Construction and Building Materials*, v. 158, p. 61-74, 2018. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.10.017.
- MERONI, F. et al. Application of Balanced Mix Design Methodology to Optimize Surface Mixes with High-RAP Content. *Materials*, 13(24):5638, 2020. DOI: 10.3390/ma13245638.
- MIKHAILENKO, P.; ATAEIAN, P.; BAAJ, H. Extraction and recovery of asphalt binder: a literature review. *International Journal of Pavement Research and Technology*, v. 13, p. 20-31, 2020. DOI:10.1007/s42947-019-0081-5.
- MIKHAILENKO, P.; BAAJ, H. Survey of current asphalt binder extraction and recovery practices. 2017 Transportation Association of Canada Conference. Presented at the 2017 Transportation Association of Canada Conference, St. John's, Canada, 2017.
- MIKHAILENKO, P.; WEBBER, G.; BAAJ, H. Evaluation of solvents for asphalt extraction. *Road Materials and Pavement Design*, v. 22 (5), p. 1195-1206, 2019. DOI: 10.1080/14680629.2019.1661277.
- MIRHOSSEINI, F. A. et al. Evaluating fatigue behavior of asphalt binders and mixes containing Date Seed Ash. *Journal of Civil Engineering and Management*, v. 23, p. 1164-1175, 2017. DOI: 10.3846/13923730.2017.1396560.
- MOGAWER, W. et al. Performance characteristics of plant produced high RAP mixtures. *Road Materials and Pavement Design*, v. 13, p. 183-208, 2012. DOI: 10.1080/14680629.2012.657070.
- MOGAWER, W. S. et al. Evaluating the effect of rejuvenators on the degree of blending and performance of high RAP, RAS, and RAP/ RAS mixtures. *Road Materials and Pavement Design*, v. 14, p. 193-213, 2013. DOI: 10.1080/14680629.2013.812836.
- MOGHADDAM, T. B.; BAAJ, H. The use of rejuvenating agents in production of recycled hot mix asphalt: A systematic review. *Construction and Building Materials*, v. 114, p. 805-816, 2016. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.04.015.
- MORENO-NAVARRO et al. Fatigue cracking in asphalt mixtures: the effects of ageing and temperature. *Road Materials and Pavement Design*, v. 19 (3), p. 561-570, 2018. DOI:10.1080/14680629.2018.1418717.
- NABIZADEH, H. et al. Effects of rejuvenators on high-RAP mixtures based on laboratory tests of asphalt concrete (AC) mixtures and fine aggregate matrix (FAM) mixtures. *Construction and Building Materials*, v. 152, p. 65-73, 2017. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.06.101.
- NADERI, K.; NEJAD, F. M.; KHODAILI, A. Time-Temperature-Age Superposition Validation for Linear Viscoelastic Properties of Bituminous Materials. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 30, 12 p., 2018. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002162.
- NAHAR, S. N. et al. Rheological and Microstructural Assessment of Rejuvenated Bitumen. *Journal of Transportation of Research Board*, n° 2444, p. 52-62, Washington, USA, 2014. DOI: 10.3141/2444-06.
- NASCIMENTO, L. A. H. Implementation and validation of the viscoelastic continuum damage theory for asphalt mixture and pavement analysis in Brazil. Dissertation (Doctor of Philosophy). Graduate Faculty of North Carolina State University, 2015.
- NASCIMENTO, L. A. H. Nova abordagem da dosagem de misturas asfálticas densas com uso do compactador giratório e foco na deformação permanente. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2008.

- NAYAK, P.; SAHOO, U. C. A rheological study on aged binder rejuvenated with Pongamia oil and Composite castor oil, *International Journal of Pavement Engineering*, 2017. DOI: 10.1080/10298436.2015.1103851.
- NCHRP 09-12. Recommended use of reclaimed asphalt pavement in the Superpave Mix Design Method. National Cooperative Highway Research Program, Report No. D9-12, 2020.
- NGUYEN, Q. T.; DI BENEDETTO, H.; SAUZÉAT, C.; TAPSOBA, N. Time Temperature Superposition Principle Validation for Bituminous Mixes in the Linear and Nonlinear Domains. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 25, p. 1181–1188, 2013. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000658.
- NIE, F. et al. Oil sand pyrolysis: Evolution of volatiles and contributions from mineral, bitumen, maltene, and SARA fractions. *Fuel*, v. 224, p. 726–739, 2018. DOI:10.1016/j.fuel.2018.03.069.
- NOROUZI, A. et al. Effect of reclaimed asphalt pavement content and binder grade on fatigue-resisting performance of asphalt mixtures in Georgia. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 29, 2017. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001960.
- NOROUZI, A.; KIM, Y. R. Mechanistic evaluation of fatigue cracking in asphalt pavements. *International Journal of Pavement Engineering*, v. 18, p. 530-546, 2017. DOI: 10.1080/10298436.2015.1095909.
- NOROUZI, A.; SABOURI, M.; KIM, Y. R. Evaluation of the fatigue performance of high RAP asphalt mixtures. *Asphalt Pavements*. 2014.
- NOSETTI, A. et al. Effect of the recycling process and binder type on bituminous mixture with 100% reclaimed asphalt pavement. *Construction and Building Materials*, v. 167, p. 440-448, 2018. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.02.042.
- NÖSLER, I.; TANGHE, T.; SOENEN, H. Evaluation of binder recovery methods and the influence on the properties of polymer modified bitumen. In 4th Eurasphalt and Eurobitume Congress. Brussels, Belgium, 2008.
- OLARD, F., DI BENEDETTO, H. General “2S2P1D” Model and relation between the linear viscoelastic behaviours of bituminous binders and mixes. *Road Materials and Pavement Design*, 4:2, 185-224, 2003. DOI: 10.1080/14680629.2003.9689946.
- ONGEL, A.; HUGENER, M. Impact of rejuvenators on aging properties of bitumen. *Construction and Building Materials*, v. 94, p. 467 - 474, 2015. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.07.030.
- OSMARI, P. H. et al. Chemical, microstructural, and rheological characterizations of binders to evaluate aging and rejuvenation. *Journal of the Transportation Research Board*, N° 2632, p. 14-24, 2017. DOI: 10.3141/2632-02.
- OZER, H. et al. Fracture characterization of asphalt mixtures with high recycled content using Illinois semicircular bending test method and flexibility index. *Transportation Research Record*, v. 2575, p. 130-137, 2016. DOI: 10.3141/2575-14.
- PETERSEN, J. C. Review of the fundamentals of asphalt oxidation - chemical, physicochemical, physical property, and durability relationships. *Transportation Research Circular E-C140*, Transportation Research, 2009.
- PETERSON, R. L.; SOLEYMANI, H. R.; ANDERSON, R. M.; MCDANIEL, R. S. Recovery and testing of RAP binders from recycled asphalt pavements. *Association of Asphalt Paving Technologists Proc*, v. 69, p. 72-91, 2000.
- PIÉRARD, N.; VANELSTRAETE, A. Extraction et récupération des bitumes modifiés aux polymères (SBS, EVA) contenus dans les enrobés bitumineux sur base des normes d'essai EN 12697-1 et -3 [paper I.1.10]. XXI Belgian Road Congress, Gen, 2009.
- PINTO, S. Estudo de comportamento a fadiga de misturas betuminosas e aplicação na avaliação estrutural de pavimentos. Tese de doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 1991.
- PIRES, D. M. et al. Study of the permanent deformation of asphalt mixtures in the field: A multiscale approach. *Construction and Building Materials*, V. 325, 2022. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.126763.

- PIRES, G. M. A new methodology for the measurement of the reclaimed asphalt degree of binder activation. PhD Thesis, University of Nottingham, Nottingham, Inglaterra, 2018.
- PIRES, G. M.; LO PRESTI, D.; AIREY, G. D. A practical approach to estimate the degree of binder activity of reclaimed asphalt materials. *Road Materials and Pavement Design*, p. 1-24, 2019. DOI: 10.1080/14680629.2019.1663244.
- POSSEBON, E. P. Advanced characterization of brazilian bitumens and mixtures. Tese de doutorado, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2021.
- POULIKAKOS, L.D. et al. Influence of short and long term aging on chemical, microstructural and macro-mechanical properties of recycled asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, v. 51, p.414–423, 2014. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.11.004.
- PRADHAN, S.; SAHOO, U. C. Influence of softer binder and rejuvenator on bituminous mixtures containing reclaimed asphalt pavement (RAP) material. *International Journal of Transportation Science and Technology*, v. 11, p. 46-59. DOI: 10.1016/j.ijtst.2020.12.001.
- PREUSSLER, E.S.; PINTO, S.; MEDINA, J. Determinação da vida de fadiga de concretos asfálticos brasileiros e aplicação no dimensionamento de reforço de pavimentos. *Anais da 16ª Reunião Anual de Pavimentação da ABPv*, Recife, PE, 1981.
- QIAN, Y.; GUO, F.; LENG, Z.; ZHANG, Y.; YU, Z. Simulation of the field aging of asphalt binders in different reclaimed asphalt pavement (RAP) materials in Hong Kong Through laboratory tests. *Construction and building Materials*, v. 265., 2020. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120651.
- QIN, Q. et al. Field aging effect on chemistry and rheology of asphalt binders and predications for field aging. *Fuel*, v. 121, p.86–94, 2014.
- QIU, Y.J. et al. Damage characteristics of waste engine oil bottom rejuvenated asphalt binder in the non-linear range and its microstructure. *Construction and Building Materials*, v. 174, p. 202–209, 2018. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.04.056.
- RAD, F. Y.; ELWARDANY, M. D.; CASTORENA, C.; KIM. Investigation of proper long-term laboratory aging temperature for performance testing of asphalt concrete. *Construction and Building Materials*, v. 147, p. 616-629, 2017. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.04.197.
- RAHBAR-RASTEGAR, R. et al. Comparison of asphalt binder and mixture cracking parameters. *Asphalt Paving Technology: Association of Asphalt Paving Technologists-Proceedings of the Technical Sessions*, v. 86, p. 285–314, 2017. DOI: 10.1080/14680629.2017.1389071.
- RAHBAR-RASTEGAR, R.; ZHANG, R.; SIAS, J. E.; DAVE, E. V. Evaluation of laboratory ageing procedures on cracking performance of asphalt mixtures. *Road Materials and Pavement Design*, v. 20, p. 647-662, 2019. DOI:10.1080/14680629.2019.1633782.
- RAHMAN, A. et al. Suitability of recycled construction and demolition aggregates as alternative pipe backfilling materials. *Journal of Cleaner Production*, v. 66, p. 75–84, 2014. DOI: 10.1016/j.jclepro.2013.11.005.
- RASTEGAR, R. R., DANIEL, J. S.; REINKE, G. Comparison of asphalt binder and mixture cracking parameters, *Road Materials and Pavement Design*, 2017. DOI: 10.1080/14680629.2017.1389071.
- READ, J.; WHITEOAK, D. *The Shell Bitumen Handbook*. Fifth Edition, 2003.
- REESE, R. Properties of aged asphalt binder related to asphalt concrete fatigue life. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologist*, v. 66, p. 604-632, 1997.
- RODEZNO, C.; JULIAN, G. Asphalt binder extraction protocol for determining amount & PG characteristics of binders recovered from asphalt mixtures. National Center for Asphalt Technology at Auburn University, Report No. WHRP 0092-16-02, 2018.
- ROJA, K. L.; MASAD, E.; MOGAWER, W. Performance and blending evaluation of asphalt mixtures containing reclaimed asphalt pavement. *Road Materials and Pavement Design*, v. 22, p. 2441-2457, 2020. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.117679.

- ROWE, G. M. Prepared Discussion for the AAPT paper by Anderson et al.: Evaluation of the Relationship between Asphalt Binder Properties and Non-Load Related Cracking. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, v. 80, p. 649–662, 2011.
- ROWE, G. M., BARRY, J. AND CRAWFORD, K. Evaluation of a 100% RAP recycling project in Fort Wayne, Indiana, *RILEM Bookseries*, v. 11, p. 941–951, 2016. DOI:10.1007/978-94-017-7342-3_75.
- SABOURI, M. et al. A comprehensive evaluation of the fatigue behaviour of plant-produced RAP mixtures. *Road Materials and Pavement Design*, p. 29-54, 2015. DOI: 10.1080/14680629.2015.1076997.
- SABOURI, M.; KIM, Y. R. Development of a failure criterion for asphalt mixtures under different modes of fatigue loading. *Transportation Research Record*, v. 2447, p. 117-125, 2014. DOI: 10.3141/2447-13.
- SA-DA-COSTA, M.; DIOGO, A. C.; FARCAS, F. Life cycle of bitumen: ageing-regeneration-ageing. 6th Eurasphalt & Eurobitume Congress, Prague, Czech Republic, 2016.
- SAFAEI, F. Characterization and modeling of asphalt binder fatigue. Doctoral Dissertation (Doctor of Philosophy). Graduate Faculty of North Carolina State University, 2017.
- SAFAEI, F. et al. Implications of warm-mix asphalt on long-term oxidative ageing and fatigue performance of asphalt binders and mixtures. *Road Materials and Pavement Design*, v. 15, p. 45-61, 2015. DOI: 10.1080/14680629.2014.927050.
- SAFAEI, F. et al. Implications of warm-mix asphalt on long-term oxidative ageing and fatigue performance of asphalt binders and mixtures. *Road Materials and Pavement Design*, v. 15, p. 45-61, 2014. DOI: 10.1080/14680629.2014.927050.
- SAFAEI, F.; CASTORENA, C. Temperature Effects of Linear Amplitude Sweep Testing and Analysis. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Record*, v. 2574 (1), 2016. DOI: 10.3141/2574-10.
- SAFAEI, F.; CASTORENA, C.; KIM, Y. R. Linking asphalt binder fatigue to asphalt mixture fatigue performance using viscoelastic continuum damage modeling. *Mechanics of Time-Dependent Materials*, v. 20, p. 299-323, 2016. DOI: 10.1007/s11043-016-9304-1.
- SAFI, F. R.; AL-QADI, A. L.; HOSSAIN, K.; OZER, H. Total recycled asphalt mixes: characteristics and field performance. *Transportation Research Board*, v. 2673 (12), p. 149-162, 2019. DOI: 10.1177/0361198119849915.
- SALEH, N. F. et al. Effects of aging on asphalt mixture and pavement performance. *Construction and Building Materials*, v. 258, 2020. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120309.
- SANTOS, A. N. V.; SOARES, J. B.; BABADOPULOS, L. F. A. L. Influência da temperatura e da velocidade de tráfego na previsão de área trincada de pavimentos asfálticos. *Revista Transportes*, v. 28, n° 4, 2020. DOI: 10.14295/transportes.v28i4.2394.
- SCHUSTER, S. L. Estudo do comportamento à fadiga de misturas asfálticas aplicadas em campo por meio da teoria viscoelástica de dano contínuo. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2018.
- SCHUSTER, S. L. et al. Fatigue behaviour of plant produced asphalt mixtures through viscoelastic continuum damage model. *Road Materials and Pavement Design*, 2021. DOI: 10.1080/14680629.2021.2009011.
- SHEN, J.; AMIRKHANIAN, S.; MILLER J. A. Effects of rejuvenating agents on Superpave mixtures containing reclaimed asphalt pavement. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 42 p. 376–384, 2007. DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:5(376).
- SHIRODKAR, P. et al. A study to determine the degree of partial blending of reclaimed asphalt pavement (RAP) binder for high RAP hot mix asphalt. *Construction and Building Materials*, v. 25, n. 1, p. 150–155, 2011. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.06.045.
- SHU, X.; HUANG, B.; VUKOSAVLJEVIC, D. Laboratory evaluation of fatigue characteristics of recycled asphalt mixture. *Construction and Building Materials*, v. 22, p. 1323-1330, 2008. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2007.04.019.

- SIDDIQUI, M., ALI, M. F. Investigation of chemical transformations by NMR and GPC during laboratory aging of arabian asphalt". *Fuel*, v. 78, p. 1407-1416, 1999.
- SILVA, H. M. R. D. et al. Are totally recycled hot mix asphalts a sustainable alternative for road paving?. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 60, p. 38-48, 2012. DOI: 10.1016/j.resconrec.2011.11.013.
- SILVA, S. L. Contribuição ao estudo do envelhecimento de ligantes asfálticos. influência da adição de polímeros e comportamento frente à radiação UV. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Tese de Doutorado, 2005.
- SINGH, D.; SHOWKAT, B.; SAWANT, D. A study to compare virgin and target asphalt binder obtained from various RAP blending charts. *Construction and Building Materials*, v. 224, p. 109-123, 2019. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.038.
- SIRIN, O. et al. Effect of ageing on asphalt binders in the State of Qatar: a case study. *Road Materials and Pavement Design*, v. 18, p. 165-184, 2017. DOI: 10.1080/14680629.2017.1389094.
- SIRIN, O.; PAUL, D. K.; KHAN, M. S.; KASSEM, E.; DARABI, M. K. Effect of aging on viscoelastic properties of asphalt mixtures. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, v; 145 (4), 2019. DOI:10.1061/JPEODX.0000137.
- SOENEN, H.; LU, X.; LAUKKANEN, O. Oxidation of bitumen: molecular characterization and influence on rheological properties. *Rheologica Acta*, v. 55 (4), p. 315–326, 2016. DOI:10.1007/s00397-016-0919-6.
- SONG, W.; HUANG, B.; SHU, X. Influence of warm-mix asphalt technology and rejuvenator on performance of asphalt mixtures containing 50% reclaimed asphalt pavement. *Journal of Cleaner Production*, v. 192, p. 191-198, 2018. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.04.269.
- SU, J. F.; QIU, J.; SCHLANGEN, E. Stability investigation of self-healing microcapsules containing rejuvenator for bitumen. *Polymer degradation and stability*, v. 98, p. 1205-1215, 2013. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2013.03.008.
- SU, Z. A sustainable maintenance solution for porous asphalt pavements via rejuvenation technology. In: *Sustainable Construction Materials*, p. 391-407, 2012.
- SUBHY, A. et al. Binder and Mixture Fatigue Performance of Plant-Produced Road Surface Course Asphalt Mixtures with High Contents of Reclaimed Asphalt. *Sustainability*, v. 11, p. 3752, 2019. DOI: 10.3390/su11133752.
- SUZUKI, K. Avaliação do percentual de material fresado em misturas asfálticas recicladas à quente e aplicação em projetos de restauração de pavimentos. 72 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2019.
- TABAKOVIĆ, A. et al. Influence of recycled asphalt pavement on fatigue performance of asphalt concrete base courses. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 22, p. 643-650, 2010. DOI: 10.1061/ASCEMT.1943-5533.0000093.
- TAUSTE, R. et al. The effect of the nature of rejuvenators on the rheological properties of aged asphalt binders. *RILEM 252-CMB*, p. 220-225, 2019. DOI: 10.1007/978-3-030-00476-7_35.
- TAUSTE, R. et al. Understanding the bitumen ageing phenomenon: A review. *Construction and Building Materials*, v. 192, p. 593–609, 2018. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2018.10.169.
- TRAN, N. et. al. Effect of a recycling agent on the performance of high-RAP and high-RAS mixtures: field and lab experiments". *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 29 (1), 2017. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001697.
- TRAN, N. H.; HALL, K. D. Evaluating the predictive equation in determining dynamic moduli of asphalt mixtures used in Arkansas. *Electronic Journal Assoc Asphalt Paving Technology*, 74E, 2005.
- TRAN, N. H.; TAYLOR, A.; WILLIS, R. Effect of rejuvenator on performance properties of hma mixtures with high RAP and RAS contents. NCAT Report 12–05, National Center for Asphalt Technology Auburn, AL, 2012.

- UNDERWOOD, B. S. Multiscale constitutive modeling of asphalt concrete. PhD Dissertation, North Carolina State University, Raleigh, NC, 2011.
- UNDERWOOD, B. S.; KIM, Y. R.; GUDDATI, M. N. Improved calculation method of damage parameter in viscoelastic continuum damage model. *International Journal of Pavement Engineering*, v. 11, p. 459-476, 2010. DOI: 10.1080/10298430903398088.
- UNDERWOOD, B., BAEK, C., KIM, Y. R. Simplified viscoelastic continuum damage model as platform for asphalt concrete fatigue analysis. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 2296(1), p. 36–45, 2012. DOI: 10.3141/229604.
- VILLEGAS-VILLEGAS, R. E. et al. Analysis of Asphalt Oxidation by Means of Accelerated Testing and Environmental Conditions. *Transportation Research Record*, v. 2672, p. 244-255, 2018. DOI: 10.1177/0361198118777630.
- VUKOSAVLJEVIC, D. Fatigue characteristics of field HMA surface mixtures containing recycled asphalt pavement (RAP). 2006.
- WAKEFIELD, A.; ANDERSON, R. M.; MCKAY, Z.; TIGHE, S. L. A Review of Solvent Extraction-Recovery Procedures and their Effect on Recovered Asphalt Binder Properties. Canadian Technical Asphalt Association Conference, 2018.
- WALTHER, A.; BUCHLER, S.; FALCHETTO, A. C. Experimental investigation on asphalt mixtures prepared with reclaimed asphalt pavement and rejuvenators based on the BTSV method. *Road Materials and Pavement Design*, v. 20 (6), p. 1634-1646, 2019. DOI: 10.1080/14680629.2019.1594053.
- WANG, C. et al. Refining the Calculation Method for Fatigue Failure Criterion of Asphalt Binder from Linear Amplitude Sweep Test. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 30, 2018. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002147.
- WANG, C. et al. Unified failure criterion for asphalt binder under cyclic fatigue loading. *Road Materials and Pavement Design*, v. 16, p. 125-148, 2015. DOI: 10.1080/14680629.2015.1077010.
- WANG, C.; CHEN, Y.; XIE, W. A comparative study for fatigue characterization of asphalt binder using the linear amplitude sweep test. *Materials and Structures*, v. 53, 2020. DOI: 10.1617/s11527-020-01530-8.
- WANG, Y. D.; GHANBARI, A.; UNDERWOOD, B. S.; KIM, Y. R. Development of preliminary transfer functions for performance predictions in FlexPAVE™. *Construction and Building Materials*, v. 266, 2021. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121182.
- WANG, Y. D.; KESHAVARZI, B.; KIM, Y. R. Fatigue Performance Analysis of Pavements with RAP Using Viscoelastic Continuum Damage Theory. *KSCCE Journal of Civil Engineering*, v. 22, p. 2118-2125, 2018a. DOI: 10.1007/s12205-018-2648-0.
- WANG, Y. D.; KESHAVARZI, B.; KIM, Y. R. Fatigue performance prediction of asphalt pavements with FlexPAVETM, the S-VECD model, and DR failure criterion. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 2672(40), p. 217–227, 2018b. DOI: 10.1177/0361198118756873.
- WANG, Y. D.; UNDERWOOD, B. S.; KIM, Y. R. Development of a fatigue index parameter, Sapp, for asphalt mixes using viscoelastic continuum damage theory. *International Journal of Pavement Engineering*, v. 23, p. 438-452, 2020. DOI: 10.1080/10298436.2020.1751844.
- WANG, Y. Development of the Framework of Performance-Engineered Mixture Design for Asphalt Concrete. Dissertation, Graduate Faculty of North Carolina State University, North Carolina, 2019.
- WANG, Y.; KIM, R. Development of a pseudo strain energy-based fatigue failure criterion for asphalt mixtures. *International Journal of Pavement Engineering*, v.20, p. 1182-1192, 2017. DOI: 10.1080/10298436.2017.1394100.
- WEST, R. et al. Use of data from specific pavement studies experiment 5 in the long-term pavement performance program to compare virgin and recycled asphalt pavements. *Transportation Research Record*, v. 2208, p. 82-89, 2011. DOI: 10.3141/2208-11.

- WEST, R.; WILLIS, J. R.; MARASTEANU, M. Improved mix design, evaluation, and materials management practices for hot mix asphalt with high reclaimed asphalt pavement content. NCHRP Report 752, Transportation Research Board. Washington: 2013.
- WITCZAK, M. W. et al. Simple performance test for Superpave mix design. NCHRP Report 465. Washington: National Cooperative Highway Research Program, 2002.
- XU, X. et al. Effect of reactive rejuvenators on structure and properties of UV-aged SBS modified bitumen. *Construction and Building Materials*, v. 155, p. 780–788, 2017. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.08.068.
- YAN, J. et al. Experimental study of hot recycled asphalt mixtures with high percentages of reclaimed asphalt pavement and different recycling agents. *Journal of Testing and Evaluation*, v. 42, p. 1183-1190, 2014. DOI: 10.1520/JTE20130251.
- YAN, Y. et al. Enhanced mortar approach to characterize the effect of reclaimed asphalt pavement on virgin binder true grade. *Materials and Structures*, 51:41, 2018. DOI: 10.1617/s11527-018-1168-1.
- YANG, S. H.; LEE, L. C. Characterizing the chemical and rheological properties of severely aged reclaimed asphalt pavement materials with high recycling rate. *Construction and Building Materials*, v. 27, p. 139-146, 2016. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.058.
- YANG, Z. et al. Effect of Aging on Chemical and Rheological Properties of Bitumen. *Polymers*, v. 10, 16 p., 2018. DOI: 10.3390/polym10121345.
- YEN, T. F. Present status of the structure of petroleum heavy ends and its significance to various technical application. *Preprints of ACS Symposium on Advances in Analysis of Petroleum and its Products*, v. 17, p. 102-114, 1972.
- YODER, E. J.; WITCZAK, M. W. Principles of pavement design. John Wiley & Sons, Inc. New York, Second Edition, 1975.
- YOU, Z. P.; GOH, S. W. Laboratory evaluation of warm mix asphalt: a preliminary study. *International Journal of Pavement Research and Technology*, v. 1, p. 34-40, 2008.
- YU, X. et al. Rheological, microscopic, and chemical characterization of the rejuvenating effect on asphalt binders. *Fuel*, v. 135, p. 162-171, 2014. DOI: 10.1016/j.fuel.2014.06.038.
- YUSSOF, N. L.; MONIEUR, D.; AIREY, G. D. The 2S2P1D: An excellent linear viscoelastic model. *Journal of Civil Engineering, Science and Technology*, v. 1(2), p. 1–7, 2010.. DOI: 10.33736/jcest.76.2010.
- ZAUMANIS, M. et al. Influence of six rejuvenators on the performance properties of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) binder and 100% recycled asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, v. 71, p. 538-550, 2014. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.08.073.
- ZAUMANIS, M.; ARRAIGADA, S. A.; ZAYER, W. K.; CAVALLI, M. C.; POULIKAKOS, L. D. (2019). Performance-based design of 100% recycled hot-mix asphalt and validation using traffic load simulator. *Journal of Cleaner Production*, v. 237 (117679). DOI:10.1016/j.jclepro.2019.117679.
- ZAUMANIS, M.; CAVALLI, M. C.; POULIKAKOS, L. D. How not to design 100% recycled asphalt mixture using performance-based tests. *Road Materials and Pavement Design*, v. 21, p. 1634-1646, 2019. DOI: 10.1080/14680629.2018.1561381.
- ZAUMANIS, M.; MALLICK, E. B.; FRANK, R. Evaluation of different recycling agents for restoring aged asphalt binder and performance of 100% recycled asphalt. *Materials and Structures*, v. 48, p. 2475-2488, 2015. DOI: 10.1617/s11527-014-0332-5.
- ZAUMANIS, M.; MALLICK, E. B.; FRANK, R. Evaluation of Rejuvenator's Effectiveness with Conventional Mix Testing for 100% Reclaimed Asphalt Pavement Mixtures. *Journal of Transportation Research Board*, v. 19, p. 17-25, 2013. DOI: 10.3141/2370-03.
- ZAUMANIS, M.; MALLICK, R. B.; FRANK, R. 100% hot mix asphalt recycling: challenges and benefits. *Transportation Research Procedia*, v. 14, p. 3493-3502, 2016. DOI: 10.1016/j.trpro.2016.05.315.

- ZAUMANIS, M.; POULIKAKOS, L. D.; PARTL, M. N. Performance-based design of asphalt mixtures and review of key parameters. *Materials & Design*, v. 141, p. 185-201, 2018. DOI: 10.1016/j.matdes.2017.12.035.
- ZAUMANIS, M.; VALTERS, A. Comparison of two low-temperature cracking tests for use in performance-based asphalt mixture design. *International Journal of Pavement Engineering*, p. 1-9, 2018. DOI: 10.1080/10298436.2018.1549323.
- ZHANG, C.; REN, Q.; QIAN, Z.; WANG, X. Evaluating the effects of high RAP and content and rejuvenating agents on fatigue performance of fine aggregate matrix through DMA Flexural Bending Test. *Materials*, v. 12 (9), 2019. DOI: 10.3390/ma12091508.
- ZHANG, F.; YU, J.; WU, S. Effect of ageing on rheological properties of storage-stable SBS/sulfurmodified asphalts. *Journal of Hazardous Materials*, v. 182, p. 507–517, 2010. DOI:10.1016/j.jhazmat.2010.06.061.
- ZHANG, H. et al. Fatigue resistance of aged asphalt binders: An investigation of different analytical methods in linear amplitude sweep test. *Construction and Building Materials*, v. 241, 2020. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118099.
- ZHANG, H.; XU, G.; CHEN, X.; WANG, R.; SHEN, K. Effect of long-term laboratory aging on rheological properties and cracking resistance of polymer-modified asphalt binders at intermediate and low temperature range. *Construction and Building Materials*, v. 226, p. 767–777, 2019. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.206.
- ZHANG, J. Development of Failure Criteria for Asphalt Concrete Mixtures under Fatigue Loading. Master Thesis, North Carolina State University, Raleigh, NC, 2012.
- ZHANG, J., SABOURI, M., KIM, Y. R., GUDDATI, M. N. Development of a failure criterion for asphalt mixtures under fatigue loading. *Road Materials and Pavement Design*, Vol. 14, p.1-15, 2013. DOI: 10.1080/14680629.2013.812843.
- ZHANG, R.; SIAS, J. E.; DAVE, E. V. Development of new performance indices to evaluate the fatigue properties of asphalt binders with ageing. *Road Materials and Pavement Design*, v. 23, p. 377-396, 2020. DOI: 10.1080/14680629.2020.1826349.
- ZHANG, W. et al. Fatigue resistance evaluation of modified asphalt using a multiple stress creep and recovery (MSCR) test. *Applied Sciences*, v. 8, p. 417, 2018. DOI: 10.3390/app8030417.
- ZHAO, S.; HUANG, B.; SHU, X.; WOODS, M. E. Quantitative characterization of binder blending: how much recycled binder is mobilized during mixing. *Transportation Research Record*, v. 2506, p. 72-80, 2015. DOI: 10.3141/2506-08.
- ZHOU, F. et al. Implementation of a performance-based mix design system in Texas. *Application of Asphalt Mix Performance-Based Specifications*, v. 32, 2014.
- ZHOU, F. et al. Nonrecoverable Behavior of Polymer Modified and Reclaimed Asphalt Pavement Modified Binder under Different Multiple Stress Creep Recovery Tests. *Transportation Research Record*, v. 2672, issue 28, p. 324-336, 2018.
- ZHOU, F.; KARKI, P.; IM, S. Development of a Simple Fatigue Cracking Test for Asphalt Binders. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 2632, p. 79-87, 2017. DOI: 10.3141/2632-09.
- ZHOU, Z.; GU, X.; DONG, Q.; NI, F.; JIANG, Y. Rutting and fatigue cracking performance of SBS-RAP blended binders with a rejuvenator. *Construction and Building Materials*, v. 203, p. 294–303, 2019. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.119.
- ZHU, H. et al. Recycling long-term-aged asphalts using bio-binder/plasticizer-based rejuvenator. *Construction and Building Materials*, v. 147, p. 117–129, 2017. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.04.066.
- ZIYANI, L.; BOULANGÉ, L.; NICOLAI, A.; MOUILLET, V. Bitumen extraction and recovery in road industry: A global methodology in solvent substitution from a comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*, v. 161, p. 53-68, 2017. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.05.022.

APÊNDICES

Apêndice A – Dados S-VECD para as diferentes definições de falha no teste LAS com o envelhecimento

Tabela 45 - Dados S-VECD com base na definição de falha pela queda de 50%|G*|

Ligantes	C vs S		G ^R vs Nf				Wr Sum vs SE			cum(1-C) vs Nf		D ^R
	C1	C2	Sf	Y	Δ	R ²	k	μ	R ²	a	R ²	CSR=0,001
Neat	0,61	0,53	0,71	0,62	-1,25	0,99	0,0061	0,8980	0,99	0,21	0,99	0,21
Neat RTFOT	0,56	0,52	0,84	0,51	-1,16	0,99	0,0056	0,8982	0,99	0,22	0,99	0,22
Neat 20PAV	0,49	0,52	1,09	0,51	-1,09	0,99	0,0030	0,9425	0,99	0,22	0,99	0,22
Neat 40PAV	0,48	0,52	1,12	0,89	-1,15	0,99	0,0035	0,9297	0,99	0,22	0,99	0,22
Neat 80PAV	0,44	0,53	1,32	2,01	-1,23	0,99	0,0090	0,8577	0,99	0,22	0,99	0,22
Neat RAP	0,28	0,52	3,24	6,49	-1,22	0,99	0,0079	0,8645	0,99	0,22	0,99	0,22
SBS	0,64	0,50	0,64	0,20	-1,10	0,99	0,0038	0,9397	0,99	0,22	0,99	0,22
SBS RTFOT	0,59	0,52	0,75	0,25	-1,08	0,99	0,0033	0,9460	0,99	0,22	0,99	0,22
SBS 20PAV	0,51	0,51	1,02	0,51	-1,10	0,99	0,0038	0,9274	0,99	0,23	0,99	0,22
SBS 40PAV	0,48	0,52	1,13	0,93	-1,16	0,99	0,0045	0,9109	0,99	0,22	0,99	0,22
SBS 80PAV	0,44	0,54	1,32	1,85	-1,22	0,99	0,0065	0,8826	0,99	0,21	0,99	0,21
SBS RAP	0,31	0,54	2,59	2,31	-1,12	0,99	0,0031	0,9286	0,99	0,21	0,99	0,21

Tabela 46 - Dados S-VECD com base na definição de falha pela queda de 35% C

Ligantes	C vs S		G ^R vs Nf				Wr Sum vs SE			cum(1-C) vs Nf		D ^R
	C1	C2	Sf	Y	Δ	R ²	k	μ	R ²	a	R ²	CSR=0,001
Neat	0,63	0,55	0,49	0,20	-1,16	0,99	0,0046	0,9131	0,99	0,17	0,99	0,17
Neat RTFOT	0,57	0,53	0,66	0,33	-1,15	0,99	0,0053	0,8968	0,99	0,19	0,99	0,19
Neat 20PAV	0,49	0,53	1,02	0,52	-1,10	0,99	0,0031	0,9393	0,99	0,21	0,99	0,21
Neat 40PAV	0,48	0,52	1,13	0,78	-1,13	0,99	0,0042	0,9162	0,99	0,22	0,99	0,22
Neat 80PAV	0,44	0,53	1,49	1,76	-1,18	0,99	0,0079	0,8700	0,99	0,24	0,99	0,23
Neat RAP	0,28	0,52	4,34	9,33	-1,22	0,93	0,0070	0,8761	0,99	0,27	0,99	0,25
SBS	0,66	0,52	0,42	0,15	-1,15	0,99	0,0043	0,9204	0,99	0,18	0,99	0,18
SBS RTFOT	0,61	0,53	0,56	0,19	-1,10	0,99	0,0034	0,9381	0,99	0,19	0,99	0,19
SBS 20PAV	0,51	0,52	0,89	0,40	-1,10	0,99	0,0037	0,9264	0,99	0,21	0,99	0,21
SBS 40PAV	0,48	0,52	1,08	0,68	-1,12	0,99	0,0042	0,9161	0,99	0,22	0,99	0,21
SBS 80PAV	0,44	0,54	1,51	2,00	-1,20	0,99	0,0063	0,8871	0,99	0,23	0,99	0,23
SBS RAP	0,30	0,53	3,57	3,46	-1,11	0,99	0,0031	0,9310	0,99	0,26	0,99	0,25

Tabela 47 - Dados S-VECD com base na definição de falha pelo pico do C.N

Ligantes	C vs S			G ^R vs Nf			Wr Sum vs SE			cum(1-C) vs Nf		D ^R
	C1	C2	Sf	Y	Δ	R ²	k	μ	R ²	a	R ²	CSR=0,001
Neat	0,61	0,53	0,70	9,76	-1,62	0,99	0,0149	0,8223	0,99	0,20	0,96	0,21
Neat RTFOT	0,55	0,51	1,01	1,46	-1,26	0,99	0,0073	0,8810	0,99	0,25	0,99	0,25
Neat 20PAV	0,48	0,51	1,41	0,23	-0,93	0,99	0,0024	0,9639	0,99	0,26	0,99	0,26
Neat 40PAV	0,48	0,51	1,39	0,62	-1,06	0,99	0,0037	0,9286	0,99	0,26	0,99	0,25
Neat 80PAV	0,44	0,52	1,58	0,20	-0,87	0,99	0,0040	0,9222	0,99	0,26	0,98	0,24
Neat RAP	0,28	0,53	2,82	0,77	-0,94	0,96	0,0037	0,9143	0,99	0,21	0,98	0,21
SBS	0,63	0,49	0,80	1,09	-1,28	0,96	0,0059	0,9071	0,99	0,25	0,97	0,26
SBS RTFOT	0,58	0,50	1,00	0,89	-1,19	0,99	0,0040	0,9347	0,99	0,26	0,99	0,26
SBS 20PAV	0,50	0,50	1,38	1,33	-1,17	0,99	0,0043	0,9229	0,99	0,26	0,99	0,27
SBS 40PAV	0,48	0,51	1,55	0,21	-0,89	0,99	0,0028	0,9521	0,99	0,28	0,99	0,26
SBS 80PAV	0,44	0,53	1,57	0,47	-0,99	0,99	0,0041	0,9190	0,99	0,25	0,99	0,24
SBS RAP	0,31	0,55	2,46	2,79	-1,16	0,99	0,0033	0,9229	0,99	0,20	0,99	0,20

Tabela 48 - Dados S-VECD com base na definição de falha pelo pico do W_S^R

Ligantes	C vs S			G ^R vs Nf			Wr Sum vs SE			cum(1-C) vs Nf		D ^R
	C1	C2	Sf	Y	Δ	R ²	k	μ	R ²	a	R ²	CSR=0,001
Neat	0,59	0,52	0,97	669,90	-2,11	0,99	0,0555	0,7234	0,98	0,23	0,78	0,26
Neat RTFOT	0,54	0,59	1,55	192,25	-1,82	0,99	0,0255	0,7922	0,99	0,29	0,95	0,31
Neat 20PAV	0,47	0,47	2,76	383,03	-1,77	0,99	0,0051	0,9139	0,99	0,35	0,95	0,37
Neat 40PAV	0,46	0,46	3,39	1035,36	-1,84	0,99	0,0099	0,8675	0,99	0,38	0,93	0,40
Neat 80PAV	0,42	0,46	4,50	571,12	-1,70	0,99	0,0091	0,8742	0,99	0,41	0,99	0,43
Neat RAP	0,28	0,51	5,64	6,54	-1,12	0,98	0,0053	0,8960	0,99	0,29	0,98	0,28
SBS	0,61	0,47	1,27	4,52	-1,42	0,99	0,0087	0,8827	0,99	0,21	0,96	0,26
SBS RTFOT	0,56	0,47	1,72	141,10	-1,74	0,99	0,0080	0,8888	0,99	0,33	0,94	0,35
SBS 20PAV	0,46	0,45	3,47	866,57	-1,80	0,97	0,0058	0,9106	0,99	0,40	0,97	0,42
SBS 40PAV	0,45	0,45	3,95	163,05	-1,56	0,99	0,0042	0,9297	0,99	0,42	0,99	0,44
SBS 80PAV	0,41	0,45	5,69	652,73	-1,64	0,99	0,0056	0,9078	0,99	0,47	0,99	0,49
SBS RAP	0,30	0,48	9,79	1530,96	-1,69	0,99	0,0016	0,9763	0,99	0,43	0,97	0,45

Tabela 49 - Dados S-VECD com base na definição de falha pelo pico do δ

Ligantes	C vs S		G ^R vs Nf				W _r Sum vs SE			cum(1-C) vs Nf		D ^R
	C1	C2	Sf	Y	Δ	R ²	k	μ	R ²	a	R ²	CSR=0,001
Neat	0,59	0,52	1,72	1340,95	-2,10	0,99	0,0382	0,7670	0,98	0,30	0,79	0,32
Neat RTFOT	0,53	0,48	2,40	202,58	-1,76	0,99	0,0193	0,8150	0,99	0,34	0,96	0,36
Neat 20PAV	0,46	0,46	3,68	705,13	-1,80	0,99	0,0046	0,9223	0,99	0,38	0,92	0,41
Neat 40PAV	0,45	0,45	4,46	396,24	-1,67	0,99	0,0085	0,8775	0,99	0,42	0,98	0,44
Neat 80PAV	0,42	0,45	6,09	193,98	-1,51	0,99	0,0088	0,8759	0,99	0,46	0,99	0,47
Neat RAP	0,28	0,51	7,29	61,37	-1,37	0,99	0,0059	0,8923	0,99	0,32	0,99	0,33
SBS	0,59	0,44	2,15	18675,25	-2,31	0,98	0,0010	1,0472	0,99	0,38	0,78	0,42
SBS RTFOT	0,54	0,44	3,38	3175,97	-2,05	0,99	0,0005	1,0915	0,99	0,25	0,98	0,35
SBS 20PAV	0,46	0,42	6,48	286,60	-1,54	0,99	0,0106	0,8624	0,97	0,52	0,98	0,54
SBS 40PAV	0,45	0,43	5,65	13640	-2,05	0,99	0,0004	1,0909	0,99	0,46	0,93	0,49
SBS 80PAV	0,41	0,44	6,89	2009,17	-1,75	0,99	0,0039	0,9319	0,99	0,49	0,98	0,51
SBS RAP	0,30	0,47	11,71	4160,94	-1,78	0,99	0,0008	1,0195	0,99	0,46	0,96	0,48

Tabela 50 - Dados S-VECD com base na definição de falha pelo pico do C².N.(1-C)

Ligantes	C vs S		G ^R vs Nf				W _r Sum vs SE			cum(1-C) vs Nf		D ^R
	C1	C2	Sf	Y	Δ	R ²	k	μ	R ²	a	R ²	CSR=0,001
Neat	0,61	0,53	0,70	2,7890	-1,4480	0,99	0,0097	0,8596	0,99	0,2041	0,98	0,22
Neat RTFOT	0,56	0,51	0,92	0,5841	-1,1570	0,99	0,0057	0,8989	0,99	0,2358	0,99	0,23
Neat 20PAV	0,49	0,52	1,20	0,5221	-1,0720	0,99	0,0029	0,9459	0,99	0,2346	0,99	0,23
Neat 40PAV	0,48	0,52	1,20	0,5655	-1,0820	0,99	0,0038	0,9244	0,99	0,2317	0,99	0,22
Neat 80PAV	0,44	0,53	1,39	0,7489	-1,0790	0,99	0,0061	0,8878	0,99	0,2350	0,99	0,21
Neat RAP	0,28	0,52	3,05	3,1020	-1,1240	0,99	0,0061	0,8814	0,99	0,2181	0,99	0,20
SBS	0,64	0,50	0,70	0,3249	-1,1446	0,99	0,0044	0,9298	0,99	0,2387	0,99	0,23
SBS RTFOT	0,59	0,51	0,85	0,2383	-1,0515	0,99	0,0031	0,9521	0,99	0,2428	0,99	0,23
SBS 20PAV	0,50	0,51	1,14	0,4052	-1,0465	0,99	0,0034	0,9373	0,99	0,2443	0,99	0,23
SBS 40PAV	0,48	0,52	1,24	0,4113	-1,0261	0,99	0,0034	0,9332	0,99	0,2387	0,99	0,22
SBS 80PAV	0,44	0,54	1,38	0,9891	-1,1194	0,99	0,0052	0,8992	0,99	0,2228	0,99	0,21
SBS RAP	0,31	0,55	2,56	2,5192	-1,1358	0,99	0,0032	0,9266	0,99	0,2083	0,99	0,21

Apêndice B – Efeitos do envelhecimento nos diferentes critérios de ruptura determinados por diferentes definições de falha

Figura 199 – Critérios de ruptura determinados com base na queda de 50% $|G^*|$ para os ligantes Neat (a, b, c) e SBS (d, e, f)

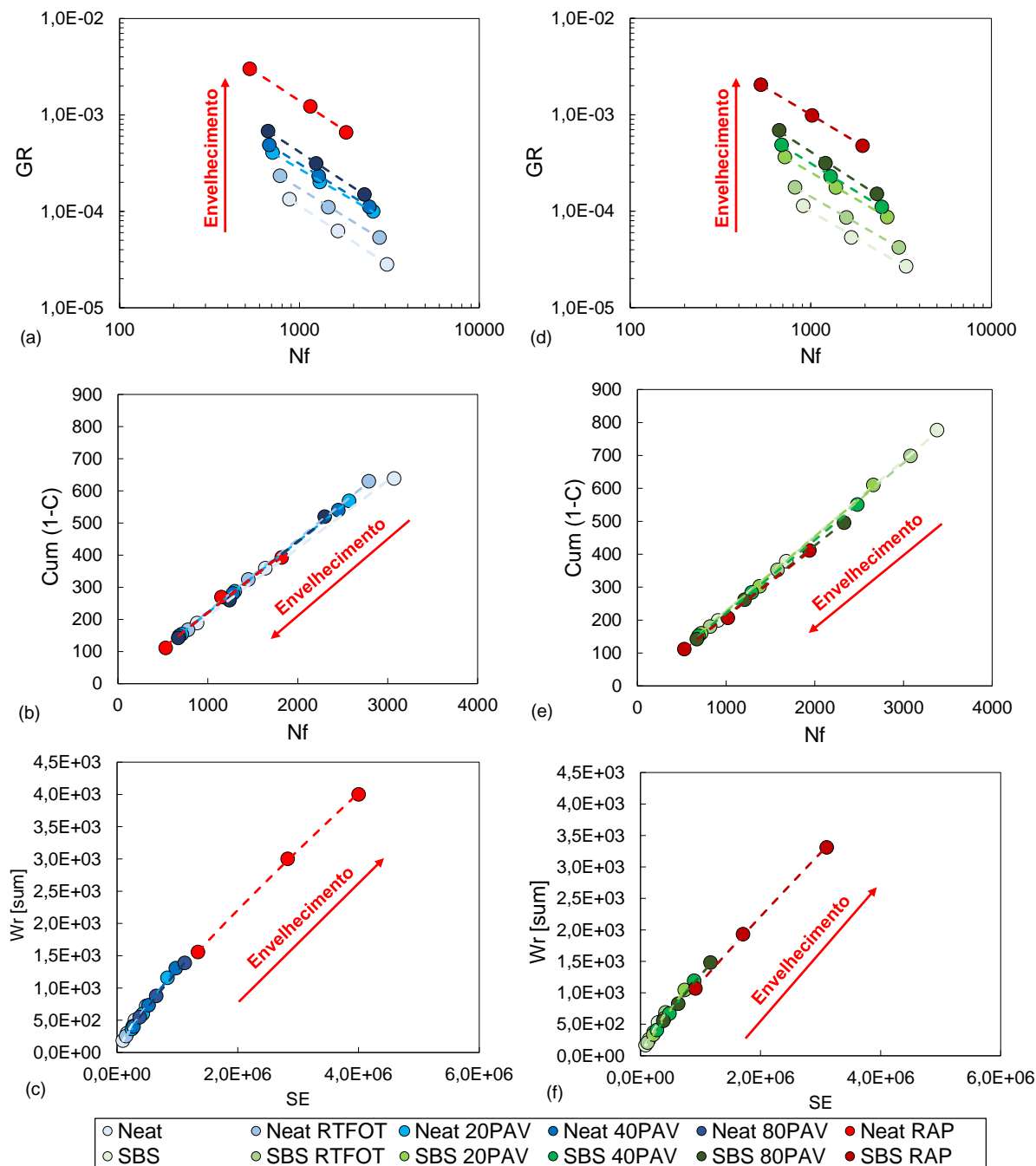


Figura 200 – Critérios de ruptura determinados com base na queda de 35% C para os ligantes Neat (a, b, c) e SBS (d, e, f)

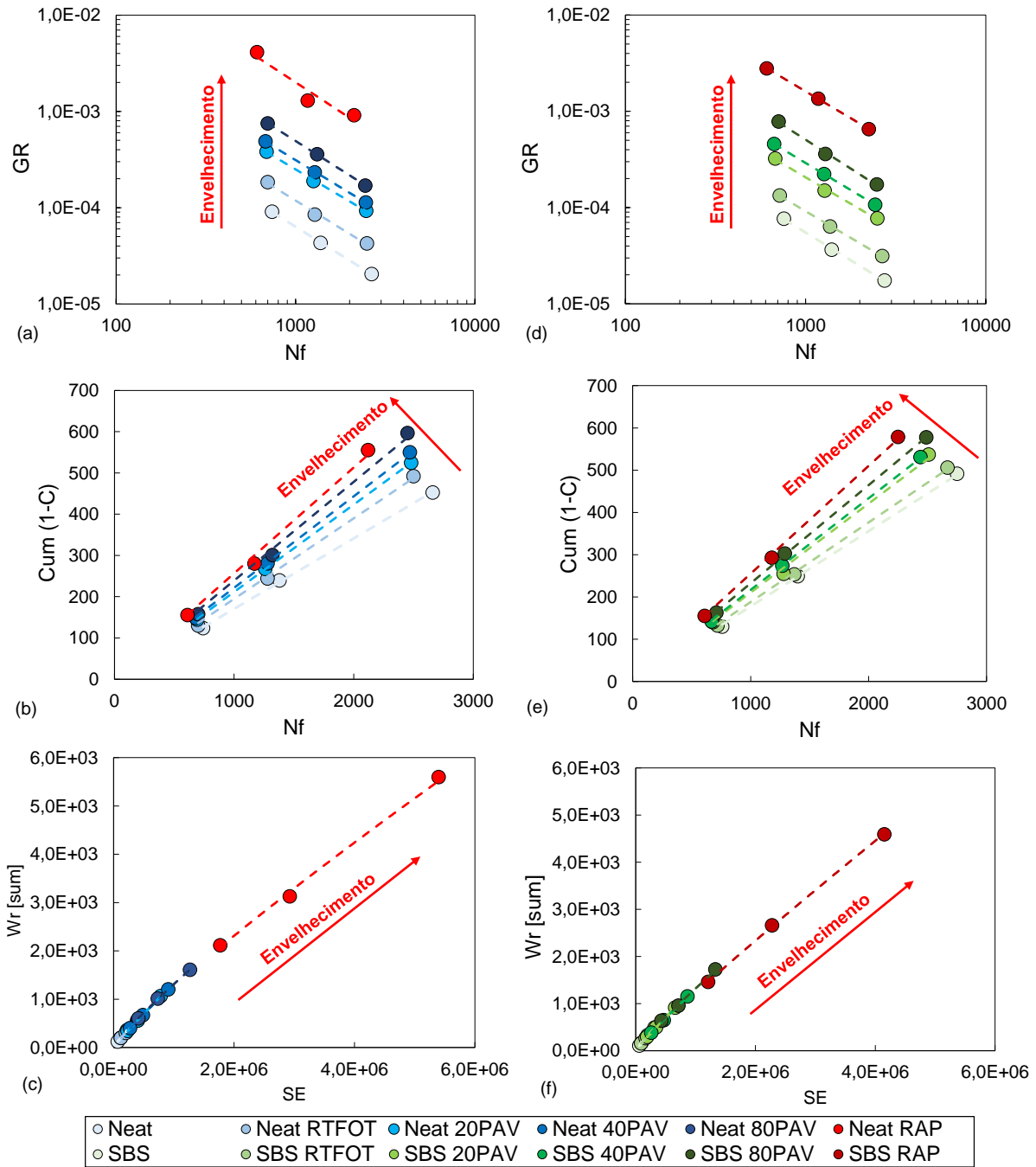


Figura 201 – Critérios de ruptura determinados com base no pico C.N para os ligantes Neat (a, b, c) e SBS (d, e, f)

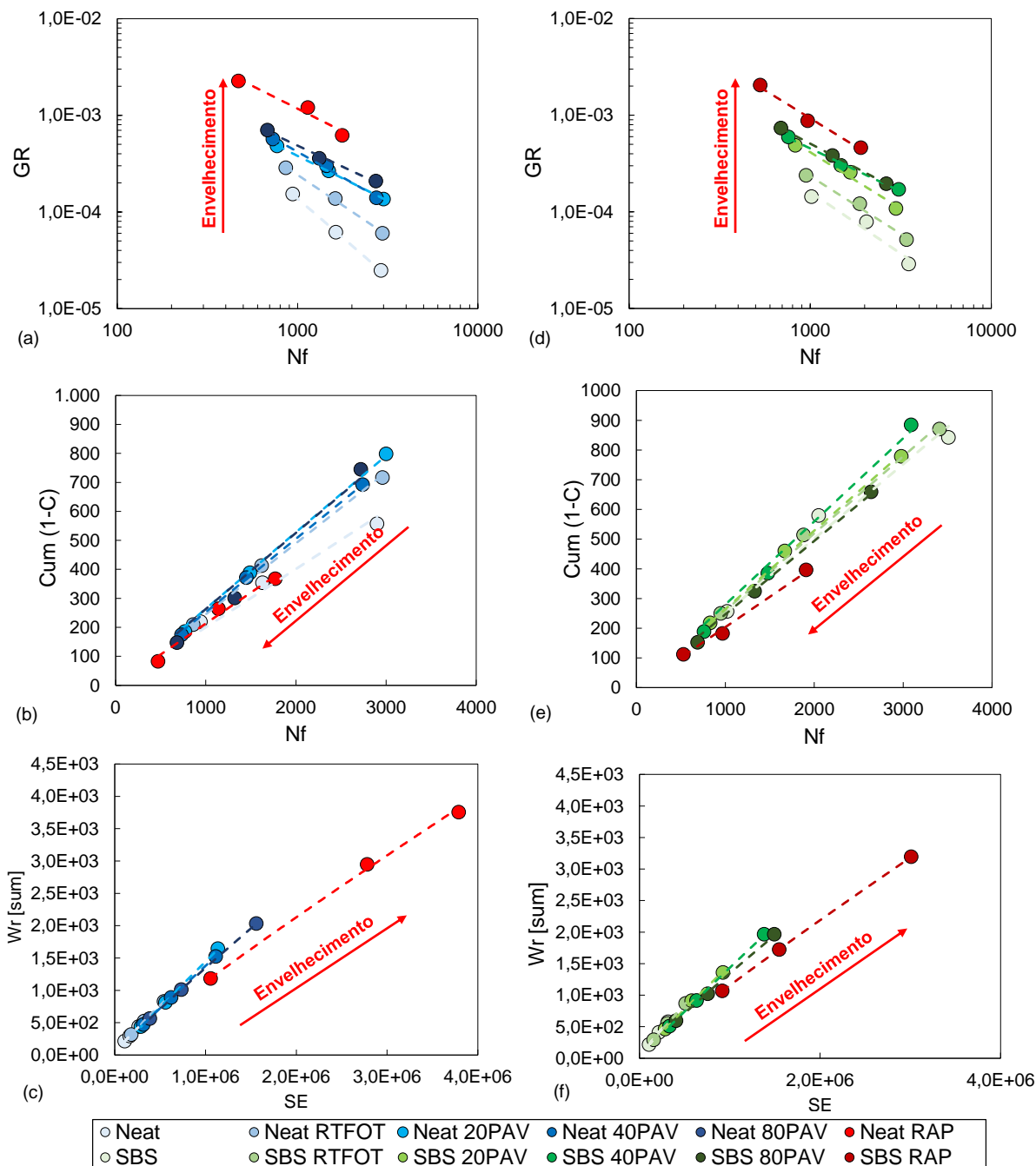


Figura 202 – Critérios de ruptura determinados com base no pico de W_S^R para os ligantes Neat (a, b, c) e SBS (d, e, f)

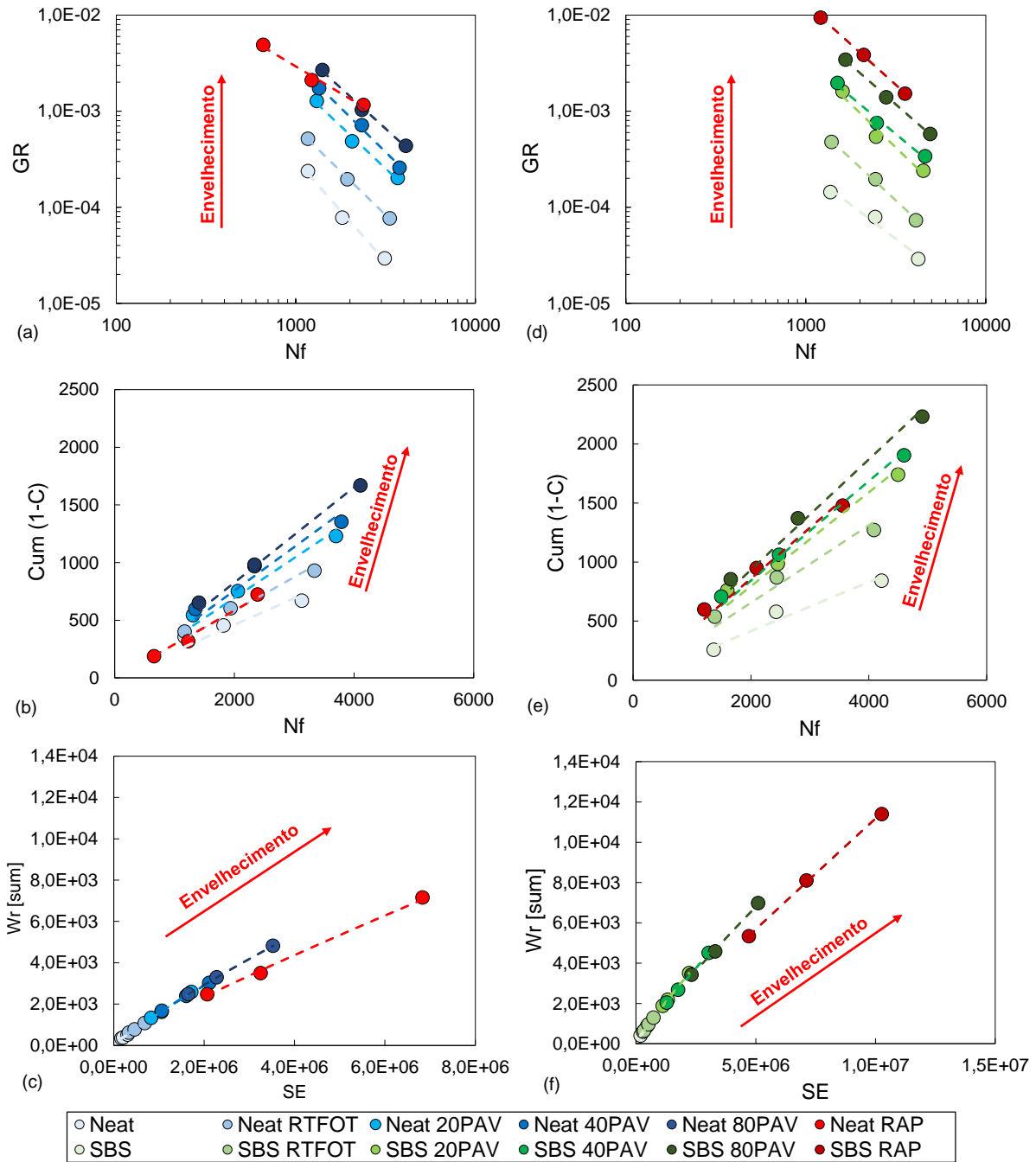


Figura 203 – Critérios de ruptura determinados com base no pico do δ para os ligantes Neat (a, b, c) e SBS (d, e, f)

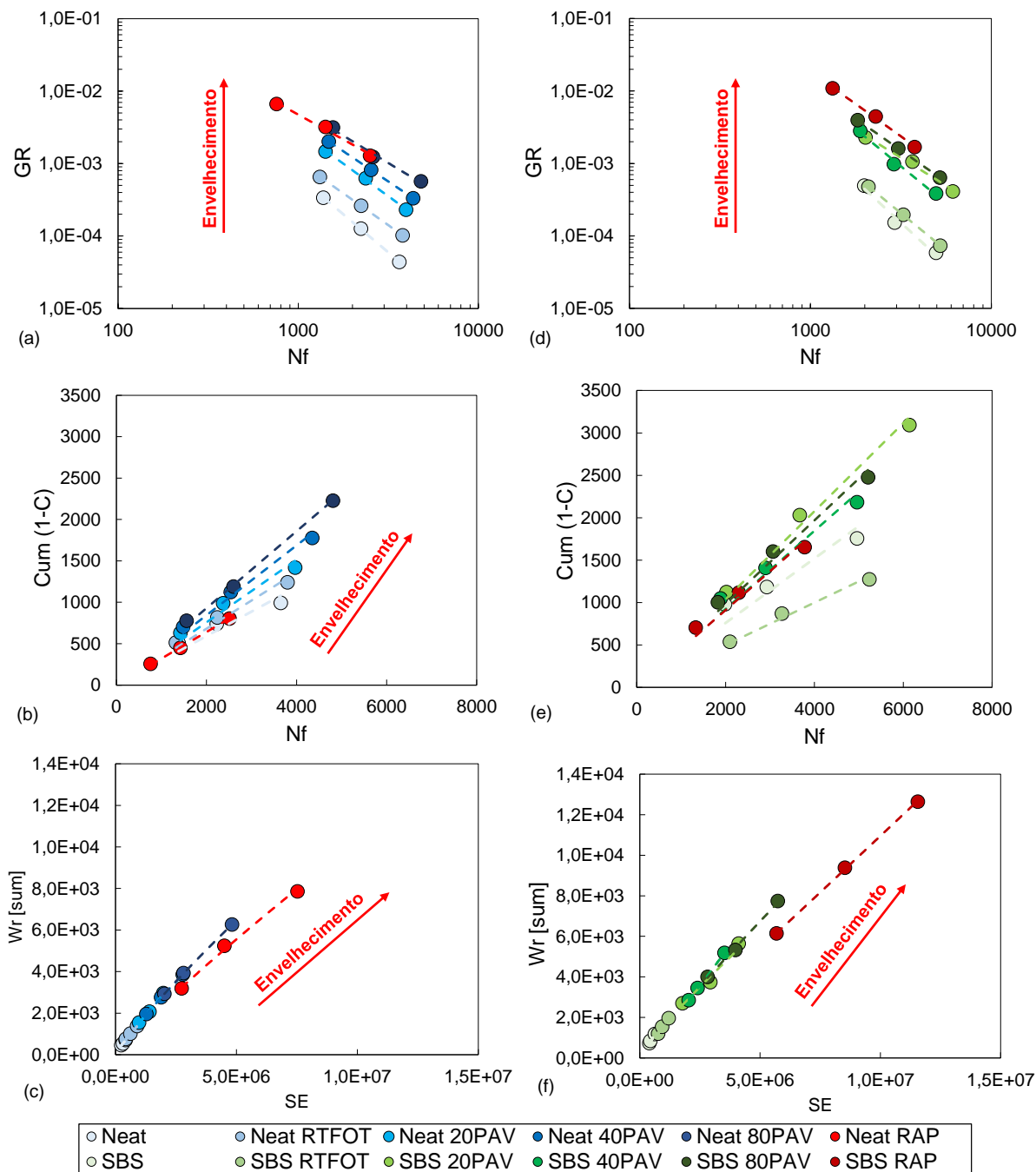
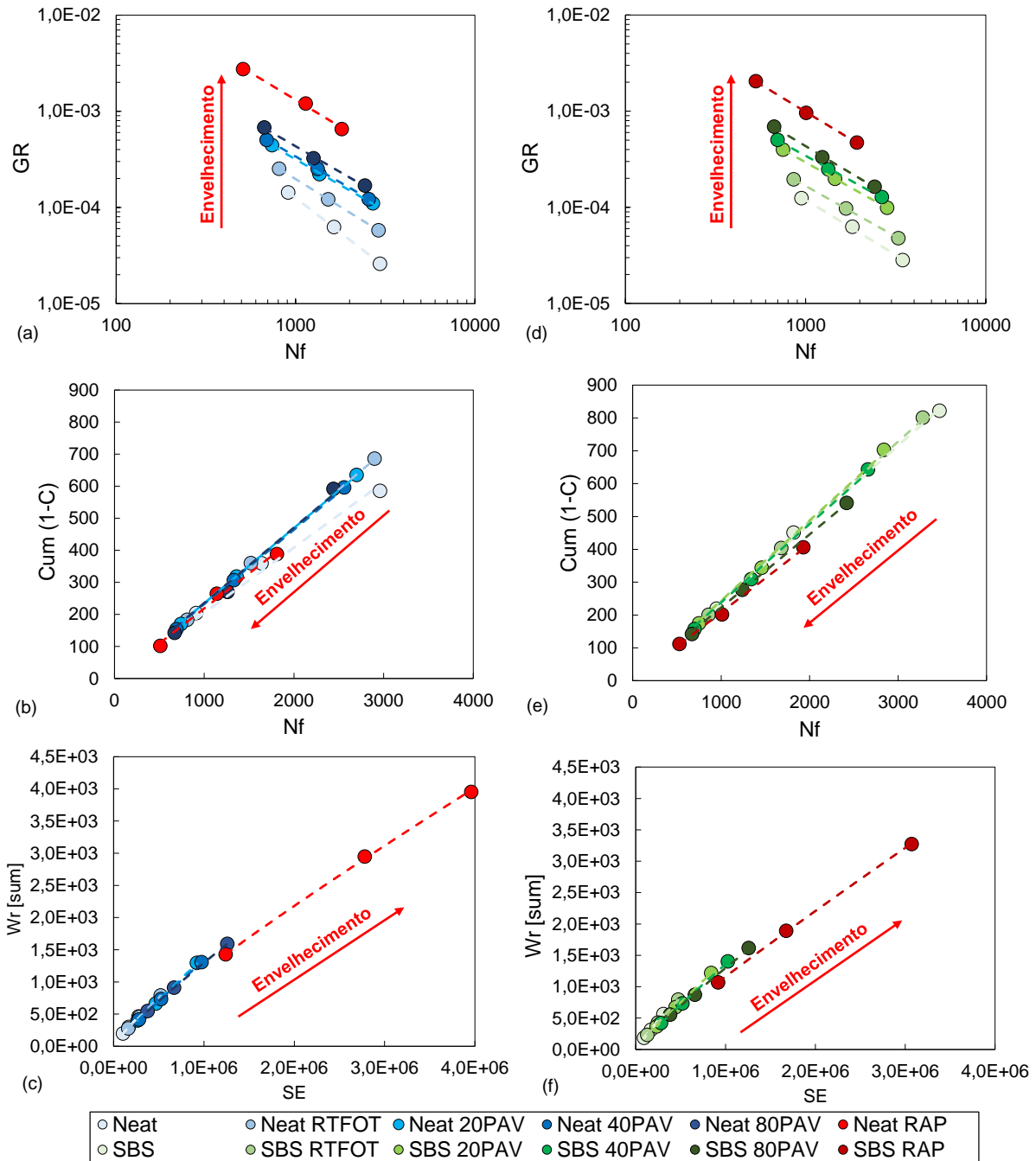


Figura 204 – Critérios de ruptura determinados com base no pico C².N.(1-C) para os ligantes Neat (a, b, c) e SBS (d, e, f)



Apêndice C – Efeito do envelhecimento na simulação da vida de fadiga com base nas equações de Wang et al. (2015), Wang et al. (2018) e Safaei (2017) e diferentes definições de falha.

Figura 205 – Nf calculado com base na definição de queda de 50%|G*| para os ligantes Neat (a, b, c) e SBS (d, e, f) em diferentes condições de envelhecimento e leis de fadiga

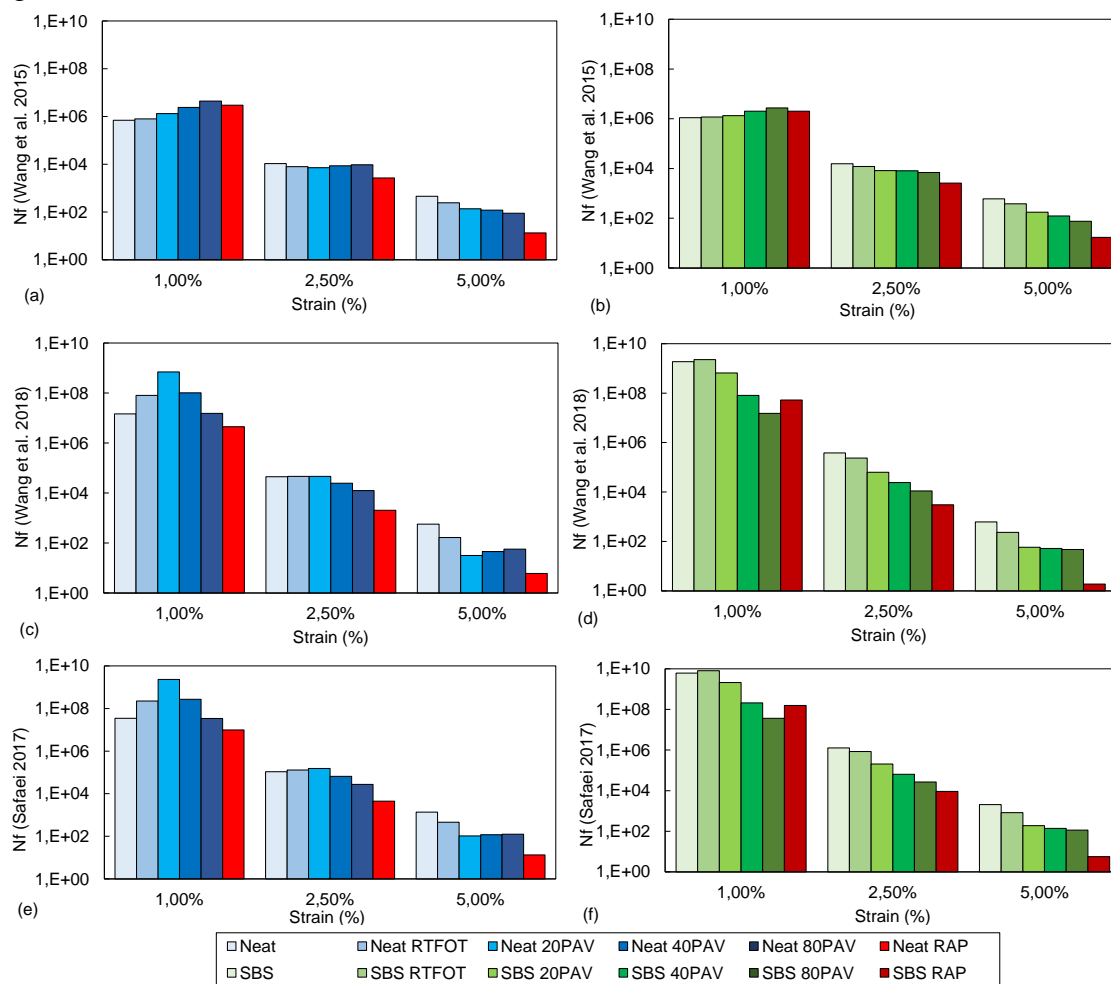


Figura 206 – Nf calculado com base na definição de queda de 35%C para os ligantes Neat (a, b, c) e SBS (d, e, f) em diferentes condições de envelhecimento e leis de fadiga

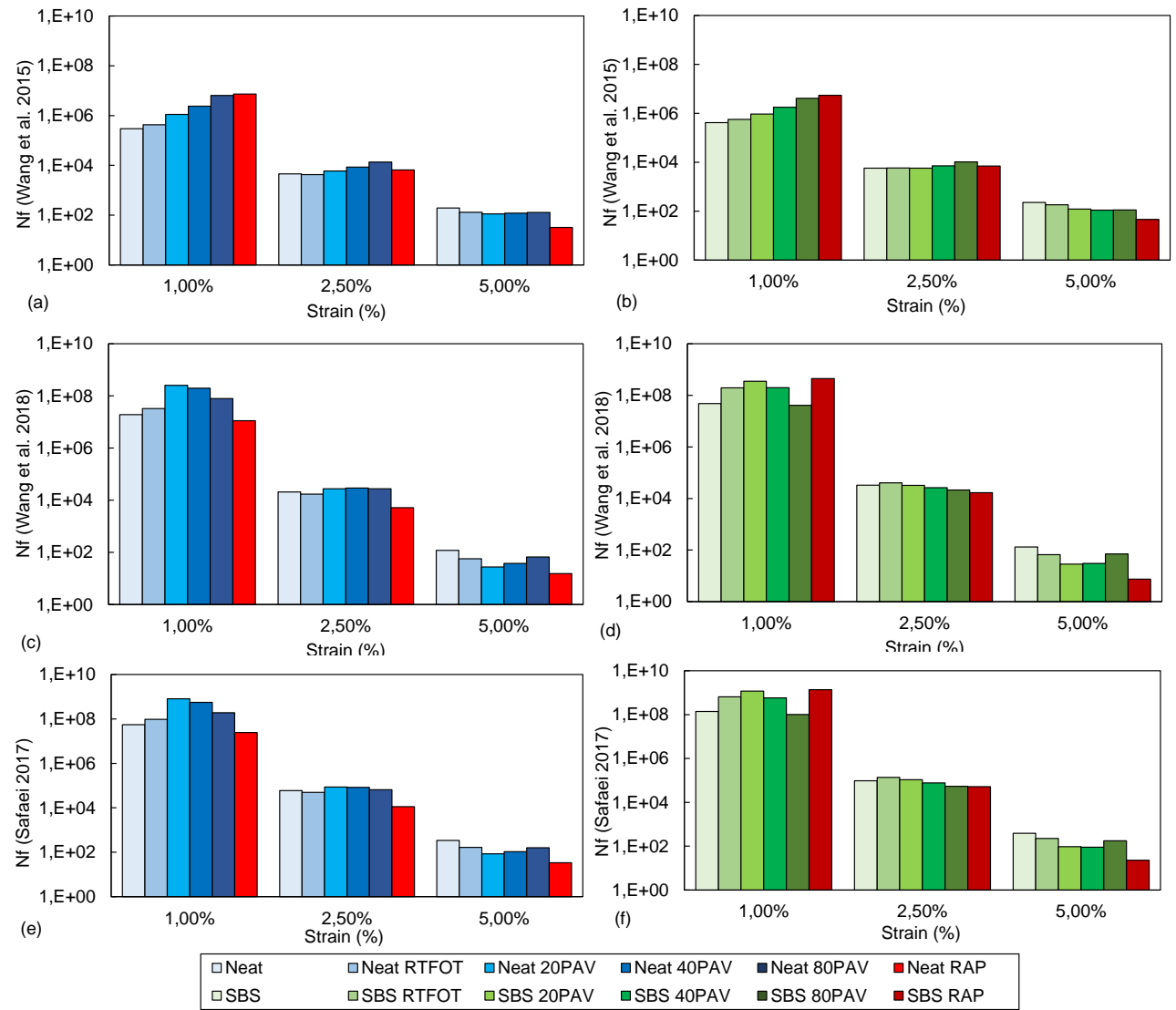


Figura 207 – Nf calculado com base na definição pico C.N para os ligantes Neat (a, b, c) e SBS (d, e, f) em diferentes condições de envelhecimento e leis de fadiga

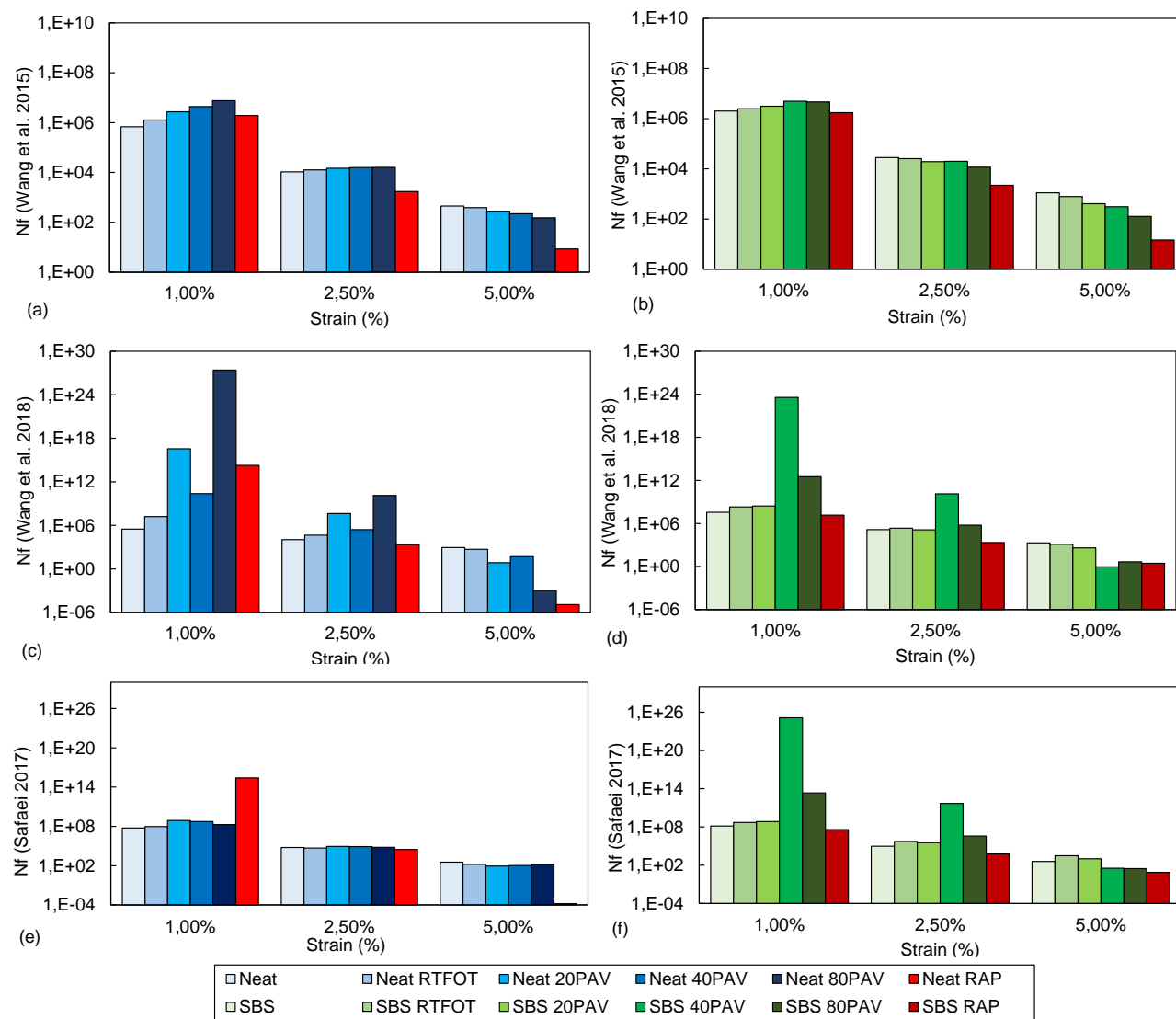
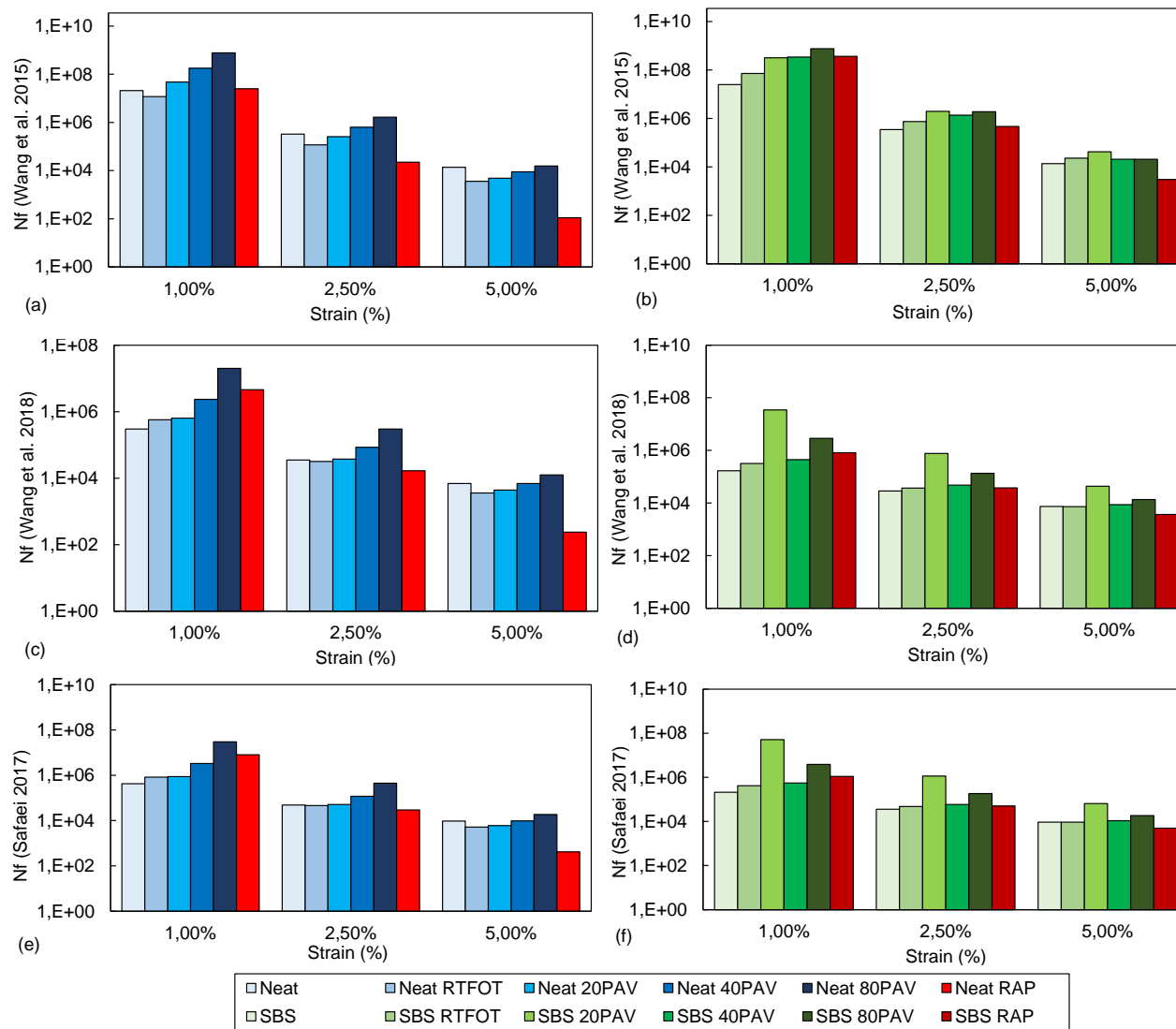


Figura 209 – Nf calculado com base na definição do pico δ para os ligantes Neat (a, b, c) e SBS (d, e, f) em diferentes condições de envelhecimento e leis de fadiga



Apêndice D – Dados S-VECD para as diferentes definições de falha no teste LAS com o rejuvenescimento.

Tabela 51 - Dados S-VECD com base na definição de falha redução de 50% |G*|

Ligantes	C vs S		G ^R vs Nf				Wr Sum vs SE			cum(1-C) vs Nf		D ^R
	C1	C2	Sf	Y	Δ	R ²	k	μ	R ²	a	R ²	
Neat	0,61	0,53	0,71	0,62	-1,25	0,99	0,0061	0,8980	0,99	0,21	0,99	0,21
Neat RAP + 4%S	0,41	0,53	1,55	3,13	-1,26	0,99	0,0090	0,8561	0,99	0,22	0,99	0,22
Neat RAP + 8%S	0,60	0,49	0,72	0,97	-1,26	0,99	0,0086	0,8636	0,99	0,23	0,99	0,23
Neat RAP + 12%S	0,80	0,45	0,37	0,65	-1,35	0,99	0,0151	0,8219	0,99	0,23	0,99	0,24
Neat RAP + 16%S	1,13	0,48	0,18	2,78	-1,70	0,99	0,0441	0,7146	0,99	0,21	0,99	0,22
Neat RAP + 4%R	0,43	0,52	1,40	2,31	-1,24	0,99	0,0045	0,9063	0,99	0,22	0,99	0,22
Neat RAP + 8%R	0,64	0,48	0,63	0,52	-1,20	0,99	0,0063	0,8915	0,99	0,23	0,99	0,23
Neat RAP + 12%R	0,80	0,44	0,36	0,34	-1,27	0,99	0,0077	0,8852	0,99	0,24	0,99	0,24
Neat RAP + 16%R	0,94	0,43	0,15	23,36	-2,03	0,99	0,7618	0,4025	0,94	0,20	0,92	0,21
Neat RAP	0,28	0,52	3,24	6,49	-1,22	0,99	0,0079	0,8645	0,99	0,22	0,99	0,22
SBS	0,64	0,50	0,64	0,20	-1,10	0,99	0,0038	0,9397	0,99	0,22	0,99	0,22
SBS RAP + 4%S	0,45	0,47	1,26	0,80	-1,11	0,99	0,0031	0,9361	0,99	0,22	0,99	0,22
SBS RAP + 8%S	0,62	0,40	0,59	0,61	-1,23	0,99	0,0103	0,8507	0,99	0,24	0,99	0,24
SBS RAP + 12%S	0,85	0,43	0,30	0,16	-1,20	0,99	0,0070	0,8911	0,99	0,24	0,99	0,24
SBS RAP + 16%S	1,17	0,43	0,14	1,42	-1,64	0,99	0,0500	0,6915	0,99	0,23	0,98	0,24
SBS RAP + 4%R	0,48	0,46	1,11	1,01	-1,17	0,99	0,0059	0,8887	0,99	0,23	0,99	0,22
SBS RAP + 8%R	0,71	0,47	0,49	0,29	-1,17	0,99	0,0056	0,9024	0,99	0,24	0,99	0,23
SBS RAP + 12%R	0,89	0,42	0,25	0,31	-1,32	0,99	0,0128	0,8380	0,99	0,24	0,99	0,24
SBS RAP + 16%R	1,35	0,47	0,12	11,43	-1,95	0,99	0,3043	0,4973	0,99	0,21	0,94	0,22
SBS RAP	0,31	0,54	2,59	2,31	-1,12	0,99	0,0031	0,9286	0,99	0,21	0,99	0,21

Tabela 52 - Dados S-VECD com base na definição de falha redução de 35% da integridade

Ligantes	C vs S		G ^R vs Nf				W _r Sum vs SE			cum(1-C) vs Nf		D ^R
	C1	C2	Sf	Y	Δ	R ²	k	μ	R ²	a	R ²	
Neat	0,63	0,55	0,49	0,20	-1,16	0,99	0,0046	0,9131	0,99	0,17	0,99	0,17
Neat RAP + 4%S	0,41	0,53	1,66	6,80	-1,35	0,99	0,0117	0,8386	0,99	0,23	0,99	0,23
Neat RAP + 8%S	0,61	0,50	0,61	0,56	-1,22	0,99	0,0073	0,8734	0,99	0,21	0,99	0,21
Neat RAP + 12%S	0,82	0,47	0,27	0,33	-1,32	0,99	0,0123	0,8297	0,99	0,20	0,99	0,20
Neat RAP + 16%S	1,07	0,45	0,12	0,11	-1,35	0,99	0,0105	0,8463	0,99	0,18	0,99	0,18
Neat RAP + 4%R	0,43	0,52	1,46	4,51	-1,33	0,99	0,0054	0,8934	0,99	0,22	0,99	0,23
Neat RAP + 8%R	0,65	0,49	0,52	0,30	-1,17	0,99	0,0056	0,8965	0,99	0,21	0,99	0,21
Neat RAP + 12%R	0,82	0,46	0,25	0,09	-1,17	0,99	0,0053	0,9087	0,99	0,20	0,99	0,20
Neat RAP + 16%R	1,01	0,46	0,18	0,34	-1,56	0,99	0,0400	0,6942	0,99	0,17	0,99	0,18
Neat RAP	0,28	0,52	4,34	9,33	-1,22	0,93	0,0070	0,8761	0,99	0,27	0,99	0,25
SBS	0,66	0,52	0,42	0,15	-1,15	0,99	0,0043	0,9204	0,99	0,18	0,99	0,18
SBS RAP + 4%S	0,46	0,53	1,29	1,01	-1,14	0,99	0,0033	0,9320	0,99	0,22	0,99	0,22
SBS RAP + 8%S	0,67	0,48	0,47	0,59	-1,28	0,99	0,0118	0,8318	0,99	0,21	0,99	0,21
SBS RAP + 12%S	0,88	0,45	0,21	0,06	-1,15	0,99	0,0055	0,9028	0,99	0,20	0,99	0,20
SBS RAP + 16%S	1,19	0,44	0,08	0,07	-1,34	0,99	0,0117	0,8229	0,99	0,18	0,99	0,19
SBS RAP + 4%R	0,49	0,52	1,10	1,17	-1,19	0,99	0,0062	0,8845	0,99	0,23	0,99	0,22
SBS RAP + 8%R	0,73	0,48	0,38	0,18	-1,16	0,99	0,0053	0,9003	0,99	0,20	0,99	0,20
SBS RAP + 12%R	0,92	0,44	0,16	0,10	-1,60	0,99	0,0090	0,8561	0,99	0,19	0,99	0,19
SBS RAP + 16%R	1,26	0,44	0,07	1,25	-1,53	0,99	0,0267	0,7394	0,99	0,17	0,99	0,18
SBS RAP	0,30	0,53	3,57	3,46	-1,11	0,99	0,0031	0,9310	0,99	0,26	0,99	0,25

Tabela 53 - Dados S-VECD com base na definição de falha C.N

Ligantes	C vs S		G ^R vs Nf				Wr Sum vs SE			cum(1-C) vs Nf		D ^R
	C1	C2	Sf	Y	Δ	R ²	k	μ	R ²	a	R ²	
Neat	0,61	0,53	0,7	9,76	-1,62	0,99	0,0149	0,8223	0,99	0,20	0,96	0,21
Neat RAP + 4%S	0,42	0,53	1,44	3,05	-1,27	0,99	0,0084	0,8604	0,99	0,22	0,99	0,22
Neat RAP + 8%S	0,59	0,47	0,91	549,26	-2,07	0,99	0,1824	0,6257	0,99	0,24	0,82	0,26
Neat RAP + 12%S	0,78	0,44	0,44	229,08	-2,08	0,99	0,3609	0,5700	0,98	0,24	0,91	0,26
Neat RAP + 16%S	1,07	0,45	0,15	31,61	-2,04	0,99	0,1428	0,5898	0,97	0,19	0,94	0,20
Neat RAP + 4%R	0,42	0,53	1,53	2,02	-1,20	0,99	0,0033	0,9596	0,99	0,22	0,99	0,22
Neat RAP + 8%R	0,62	0,47	0,83	225,00	-1,96	0,99	0,0743	0,6975	0,99	0,25	0,89	0,27
Neat RAP + 12%R	0,78	0,43	0,42	274,61	-2,10	0,99	0,1740	0,6136	0,99	0,24	0,85	0,26
Neat RAP + 16%R	0,94	0,43	0,11	328,67	-2,43	0,99	6,7105	0,1562	0,30	0,17	0,68	0,19
Neat RAP	0,28	0,53	2,82	0,77	-0,94	0,96	0,0037	0,9143	0,99	0,21	0,98	0,21
SBS	0,63	0,49	0,8	1,09	-1,28	0,96	0,0059	0,9071	0,99	0,25	0,97	0,26
SBS RAP + 4%S	0,45	0,51	1,67	0,30	-0,92	0,99	0,0023	0,9600	0,99	0,27	0,99	0,26
SBS RAP + 8%S	0,63	0,44	1,03	21,19	-1,58	0,99	0,0266	0,7898	0,99	0,31	0,99	0,32
SBS RAP + 12%S	0,83	0,42	0,39	90,91	-1,97	0,99	0,1015	0,6584	0,99	0,26	0,93	0,28
SBS RAP + 16%S	1,14	0,42	0,14	372,72	-2,36	0,99	2,6020	0,2809	0,79	0,21	0,89	0,24
SBS RAP + 4%R	0,48	0,44	1,59	0,23	-0,89	0,99	0,0034	0,9367	0,99	0,29	0,99	0,27
SBS RAP + 8%R	0,68	0,44	0,82	6,67	-1,47	0,99	0,0117	0,8544	0,99	0,30	0,99	0,31
SBS RAP + 12%R	0,88	0,41	0,30	80,04	-2,00	0,99	0,1627	0,6071	0,95	0,25	0,94	0,26
SBS RAP + 16%R	1,25	0,44	0,09	158,52	-2,32	0,99	2,3653	0,2630	0,93	0,19	0,77	0,21
SBS RAP	0,31	0,55	2,46	2,79	-1,16	0,99	0,0033	0,9229	0,99	0,20	0,99	0,2

Tabela 54 - Dados S-VECD com base na definição de falha PSE

Ligantes	C vs S		G ^R vs Nf				Wr Sum vs SE			cum(1-C) vs Nf		D ^R
	C1	C2	Sf	Y	Δ	R ²	k	μ	R ²	a	R ²	
Neat	0,59	0,52	0,97	669,9	-2,11	0,99	0,0555	0,7234	0,98	0,23	0,78	0,26
Neat RAP + 4%S	0,41	0,49	3,14	38120,45	-2,38	0,99	0,1568	0,6856	0,89	0,30	0,73	0,33
Neat RAP + 8%S	0,57	0,45	1,58	7212,91	-2,27	0,99	0,6103	0,5517	0,99	0,32	0,79	0,34
Neat RAP + 12%S	0,77	0,43	0,56	960,02	-2,21	0,99	0,8722	0,4818	0,96	0,27	0,87	0,29
Neat RAP + 16%S	1,11	0,47	0,18	84,11	0,47	0,99	0,2357	0,5486	0,97	0,20	0,79	0,22
Neat RAP + 4%R	0,40	0,50	3,32	12378,78	-2,22	0,99	0,0191	0,8149	0,99	0,31	0,70	0,34
Neat RAP + 8%R	0,61	0,45	1,33	1313,26	-2,08	0,99	0,1243	0,6710	0,99	0,31	0,87	0,34
Neat RAP + 12%R	0,78	0,43	0,52	1173,16	-2,25	0,99	0,4123	0,5464	0,99	0,26	0,80	0,29
Neat RAP + 16%R	0,92	0,42	0,15	80419,00	-2,49	0,99	15,8708	0,0836	0,07	0,19	0,66	0,21
Neat RAP	0,28	0,51	5,64	6,54	-1,12	0,98	0,0053	0,896	0,99	0,29	0,98	0,28
SBS	0,61	0,47	1,27	4,52	-1,42	0,99	0,0087	0,8827	0,99	0,21	0,96	0,26
SBS RAP + 4%S	0,43	0,46	4,00	144580,65	-2,44	0,99	0,0086	0,8769	0,99	0,38	0,60	0,42
SBS RAP + 8%S	0,61	0,42	1,03	93,82	-1,72	0,99	0,0747	0,7208	0,99	0,25	0,99	0,32
SBS RAP + 12%S	0,82	0,41	0,49	335,53	-2,09	0,99	0,1841	0,6139	0,99	0,28	0,90	0,30
SBS RAP + 16%S	1,15	0,42	0,17	486,45	-2,35	0,99	3,2002	0,2745	0,84	0,24	0,91	0,26
SBS RAP + 4%R	0,46	0,45	3,75	193,74	-1,59	0,99	0,0084	0,8811	0,99	0,42	0,99	0,43
SBS RAP + 8%R	0,66	0,42	1,12	117,60	-1,77	0,99	0,0241	0,8031	0,99	0,34	0,97	0,36
SBS RAP + 12%R	0,87	0,41	0,38	247,97	-2,10	0,99	0,3023	0,5597	0,95	0,27	0,92	0,29
SBS RAP + 16%R	1,30	0,45	0,12	286,86	-2,36	0,99	4,0653	0,2186	0,97	0,21	0,76	0,22
SBS RAP	0,3	0,48	9,79	1530,96	-1,69	0,99	0,0016	0,9763	0,99	0,43	0,97	0,45

Tabela 55 - Dados S-VECD com base na definição de falha do ângulo de fase

Ligantes	C vs S		G ^R vs Nf				Wr Sum vs SE			cum(1-C) vs Nf		D ^R
	C1	C2	Sf	Y	Δ	R ²	k	μ	R ²	a	R ²	
Neat	0,59	0,52	1,72	1340,95	-2,1	0,99	0,0382	0,767	0,98	0,3	0,79	0,32
Neat RAP + 4%S	0,41	0,48	3,95	84696,47	-2,44	0,99	0,2927	0,6257	0,91	0,34	0,79	0,36
Neat RAP + 8%S	0,57	0,44	2,18	21761,76	-2,35	0,99	0,5295	0,5686	0,99	0,36	0,84	0,38
Neat RAP + 12%S	0,78	0,44	0,86	171,62	-1,93	0,99	0,3699	0,5629	0,99	0,31	0,96	0,33
Neat RAP + 16%S	1,33	0,55	0,32	137,21	-2,15	0,99	0,2905	0,5387	0,97	0,28	0,70	0,27
Neat RAP + 4%R	0,40	0,49	4,02	326077,23	-2,61	0,99	0,0206	0,8107	0,99	0,24	0,33	0,37
Neat RAP + 8%R	0,60	0,44	2,29	591,28	-1,88	0,98	0,0618	0,7288	0,99	0,39	0,94	0,41
Neat RAP + 12%R	0,80	0,45	0,87	9,58	-1,56	0,99	0,1517	0,6397	0,99	0,33	0,99	0,34
Neat RAP + 16%R	0,91	0,42	0,32	4,17	-1,68	0,99	2,9514	0,2873	0,99	0,30	0,99	0,30
Neat RAP	0,28	0,51	7,29	61,37	-1,37	0,99	0,0059	0,8923	0,99	0,32	0,99	0,33
SBS	0,59	0,44	2,15	18675,25	-2,31	0,98	0,001	1,0472	0,99	0,38	0,78	0,42
SBS RAP + 4%S	0,43	0,43	5,88	848,36	-1,70	0,99	0,0020	0,9747	0,99	0,45	0,98	0,48
SBS RAP + 8%S	0,60	0,41	2,02	415,85	-1,83	0,99	0,0669	0,7318	0,99	0,40	0,99	0,41
SBS RAP + 12%S	0,82	0,42	0,72	829,36	-2,15	0,99	0,2106	0,6086	0,99	0,32	0,83	0,34
SBS RAP + 16%S	1,22	0,45	0,28	836834,09	-3,22	0,99	24084,9500	-0,6037	0,34	0,27	-1,30	0,30
SBS RAP + 4%R	0,45	0,43	4,85	327,91	-1,62	0,99	0,0073	0,8899	0,99	0,45	0,99	0,46
SBS RAP + 8%R	0,66	0,41	1,74	873,71	-1,97	0,99	0,0175	0,8296	0,99	0,38	0,95	0,40
SBS RAP + 12%R	0,90	0,42	0,61	22899,90	-2,61	0,99	0,9442	0,4654	0,93	0,30	0,61	0,33
SBS RAP + 16%R	1,62	0,53	0,23	80,68	-2,10	0,99	3,4620	0,2610	0,99	0,27	0,92	0,29
SBS RAP	0,3	0,47	11,71	4160,94	-1,78	0,99	0,0008	1,0195	0,99	0,46	0,96	0,48

Tabela 56 - Dados S-VECD com base na definição de falha do C².N.(1-C)

Ligantes	C vs S		G ^R vs Nf				W _r Sum vs SE			cum(1-C) vs Nf		D ^R
	C1	C2	Sf	Y	Δ	R ²	k	μ	R ²	a	R ²	
Neat	0,61	0,53	0,7	2,789	-1,448	0,99	0,0097	0,8596	0,99	0,2041	0,98	0,22
Neat RAP + 4%S	0,41	0,53	1,51	2,84	-1,25	0,99	0,0086	0,8590	0,99	0,22	0,99	0,21
Neat RAP + 8%S	0,60	0,48	0,77	6,70	-1,51	0,99	0,0183	0,8029	0,99	0,23	0,97	0,24
Neat RAP + 12%S	0,79	0,45	0,40	13,64	1,73	0,99	0,0590	0,7039	0,99	0,23	0,98	0,25
Neat RAP + 16%S	1,08	0,46	0,16	9,20	-1,87	0,99	0,0709	0,6634	0,99	0,19	0,92	0,21
Neat RAP + 4%R	0,43	0,52	1,36	4,14	-1,33	0,99	0,0053	0,8941	0,99	0,21	0,99	0,22
Neat RAP + 8%R	0,63	0,48	0,70	2,73	-1,41	0,99	0,0108	0,8490	0,99	0,24	0,99	0,24
Neat RAP + 12%R	0,79	0,44	0,39	13,08	-1,72	0,99	0,0306	0,7649	0,99	0,2372	0,9600	0,25
Neat RAP + 16%R	0,93	0,42	0,13	85,21	-2,23	0,99	1,6223	0,3153	0,73	0,18	0,85	0,20
Neat RAP	0,28	0,52	3,05	3,102	-1,124	0,99	0,0061	0,8814	0,99	0,2181	0,99	0,2
SBS	0,64	0,5	0,7	0,3249	-1,1446	0,99	0,0044	0,9298	0,99	0,2387	0,99	0,23
SBS RAP + 4%S	0,45	0,47	1,37	0,52	-1,03	0,99	0,0027	0,9473	0,99	0,23	0,99	0,23
SBS RAP + 8%S	0,62	0,39	0,74	0,59	-1,18	0,99	0,0089	0,8686	0,99	0,27	0,99	0,27
SBS RAP + 12%S	0,84	0,42	0,35	3,80	-1,58	0,99	0,0220	0,7916	0,99	0,25	0,99	0,26
SBS RAP + 16%S	1,15	0,42	0,14	52,80	-2,11	0,99	0,4498	0,4639	0,97	0,22	0,94	0,24
SBS RAP + 4%R	0,48	0,46	1,24	0,54	-1,06	0,99	0,0046	0,9103	0,91	0,25	0,99	0,24
SBS RAP + 8%R	0,66	0,38	0,61	0,35	-1,15	0,99	0,0055	0,9093	0,99	0,27	0,99	0,27
SBS RAP + 12%R	0,88	0,41	0,28	8,29	-1,73	0,99	0,0518	0,7111	0,99	0,24	0,98	0,26
SBS RAP + 16%R	1,35	0,46	0,10	50,00	-2,16	0,99	0,8059	0,3853	0,99	0,20	0,86	0,21
SBS RAP	0,31	0,55	2,56	2,5192	-1,1358	0,99	0,0032	0,9266	0,99	0,2083	0,99	0,21

Apêndice E – Efeito do rejuvenescimento nos diferentes critérios de ruptura

Figura 211 – Critérios de ruptura determinados com base na queda de 50% $|G^*|$ para os ligantes Neat RAP com diferentes concentrações de agente S (a, b, c) e R (d, e, f)

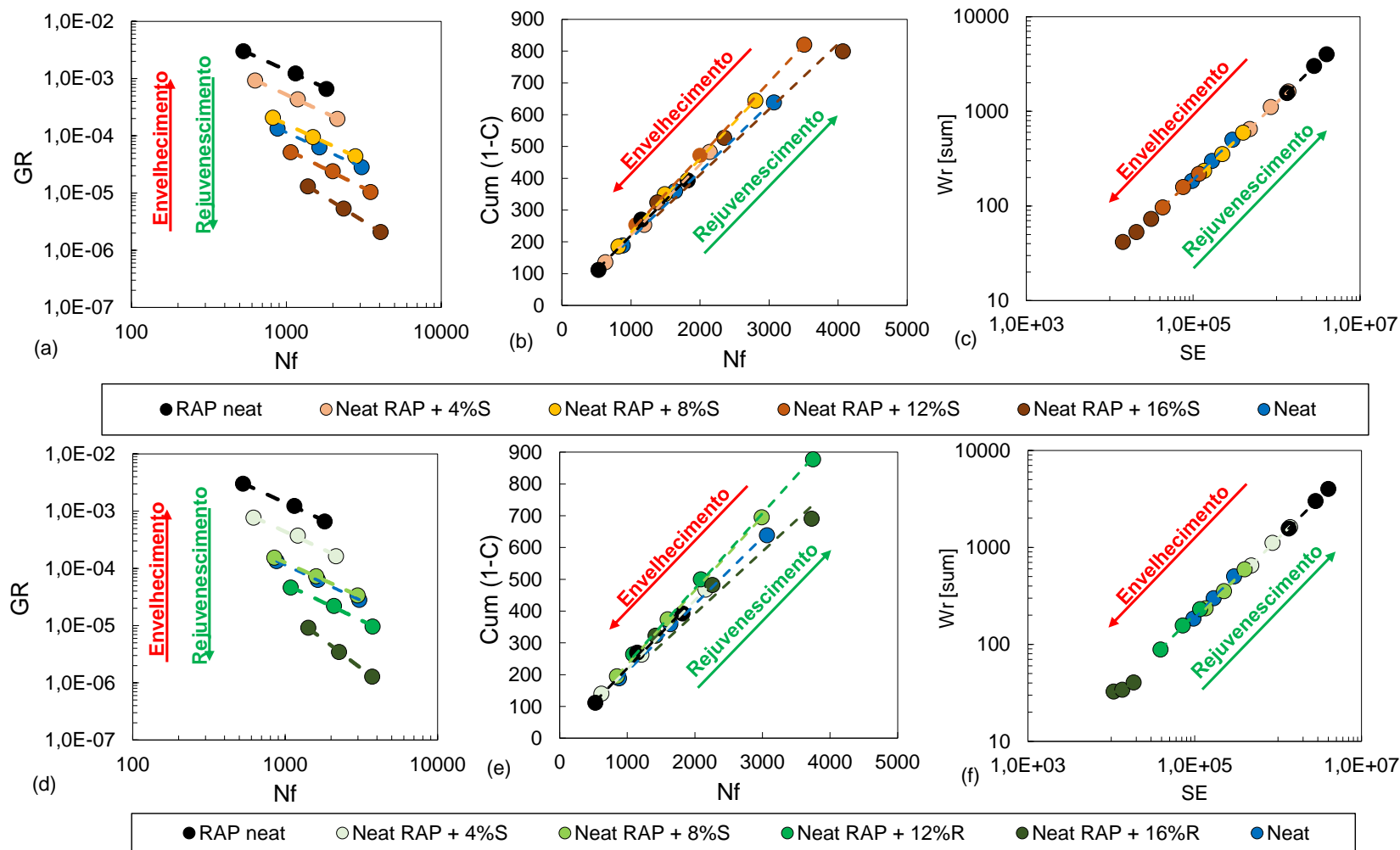


Figura 212 – Critérios de ruptura determinados com base na queda de 50%|G*| para os ligantes Neat RAP com diferentes concentrações de agente S (a, b, c) e R (d, e, f)

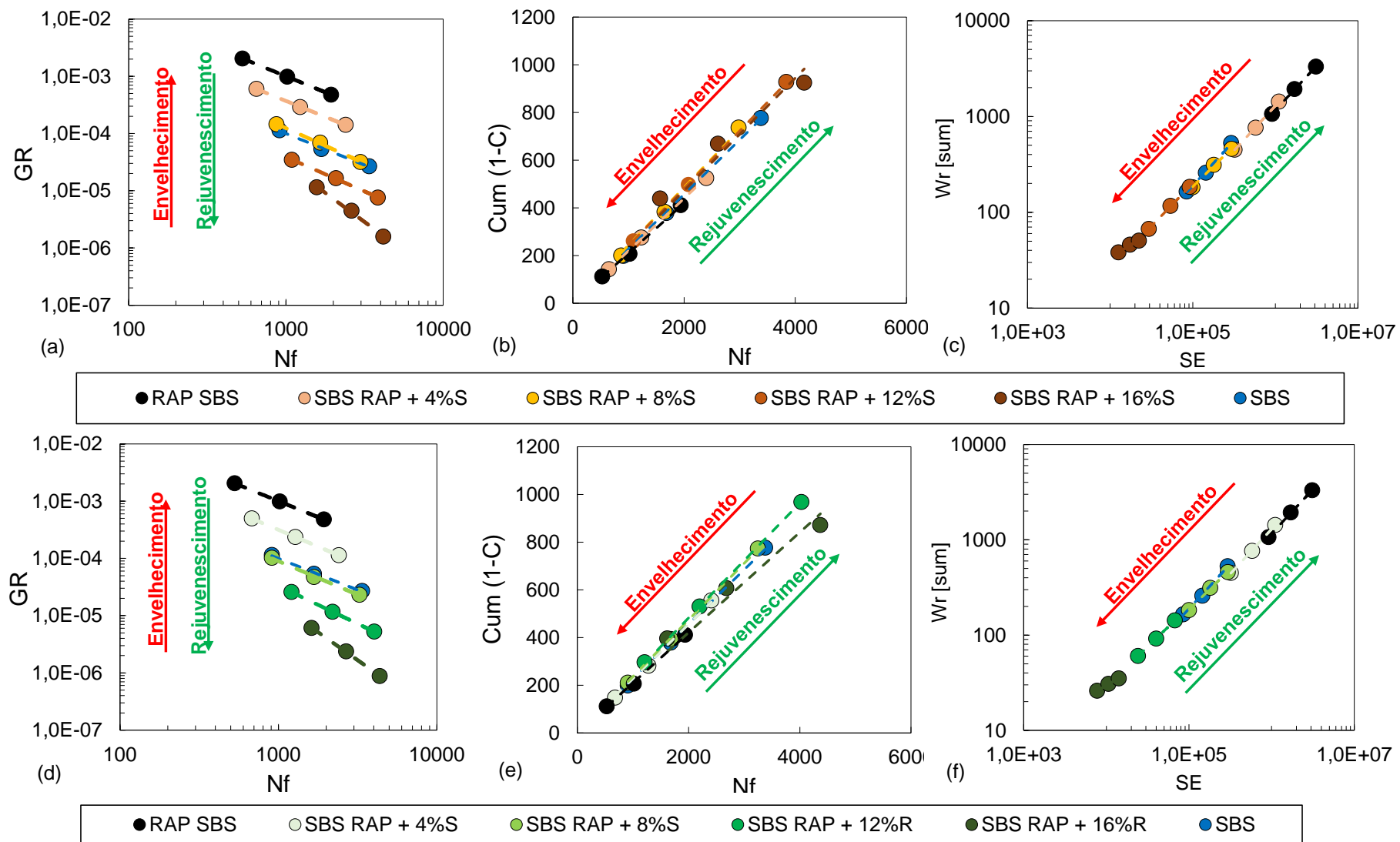


Figura 213 – Gráfico de mistura entre critérios de ruptura vs diferentes concentrações de AR S e R com o ligante Neat RAP determinados com base na definição de falha de queda de 50% $|G^*|$

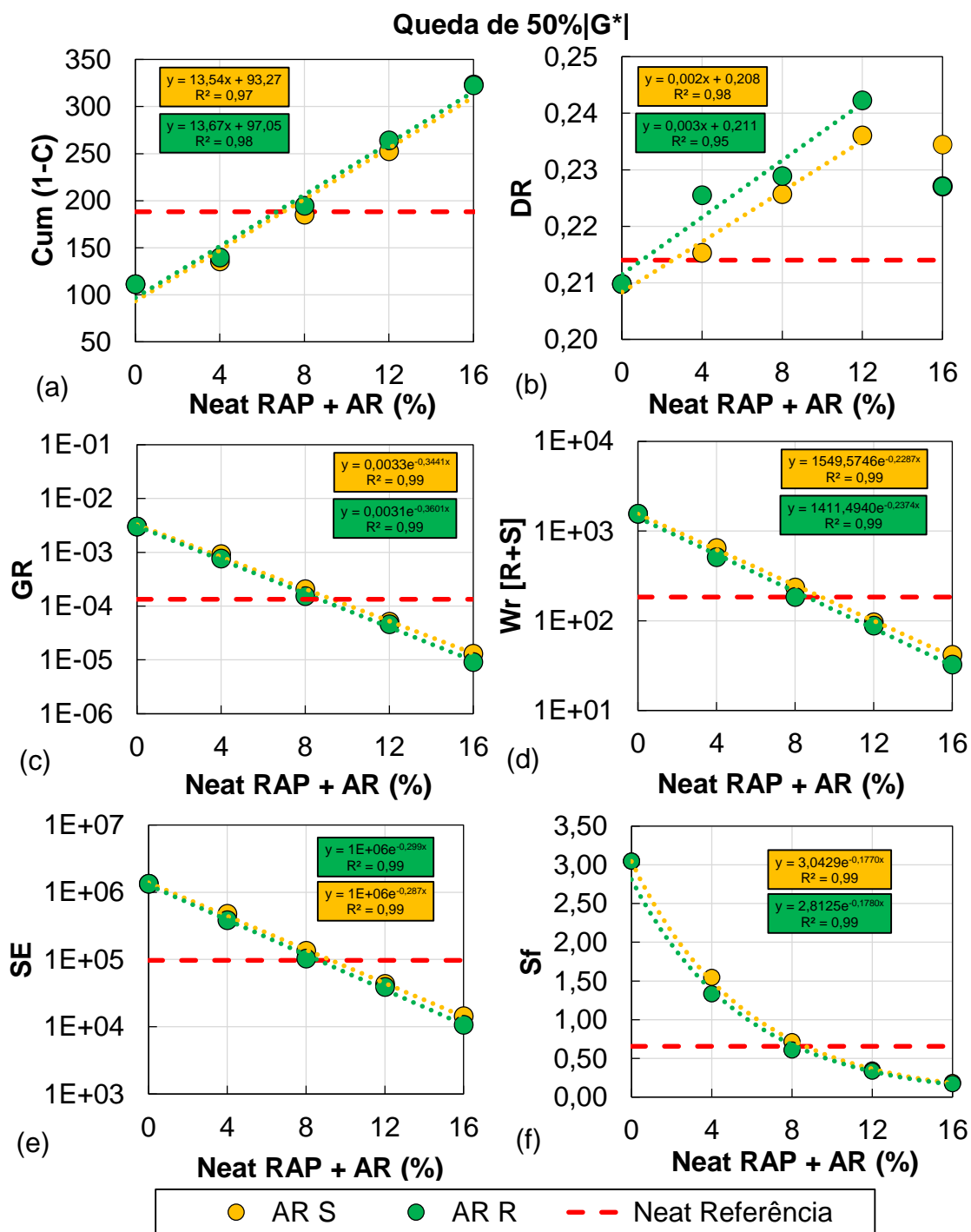


Figura 214 – Gráfico de mistura entre critérios de ruptura vs diferentes concentrações de AR S e R com o ligante SBS RAP determinados com base na definição de falha de queda de 50% $|G^*|$

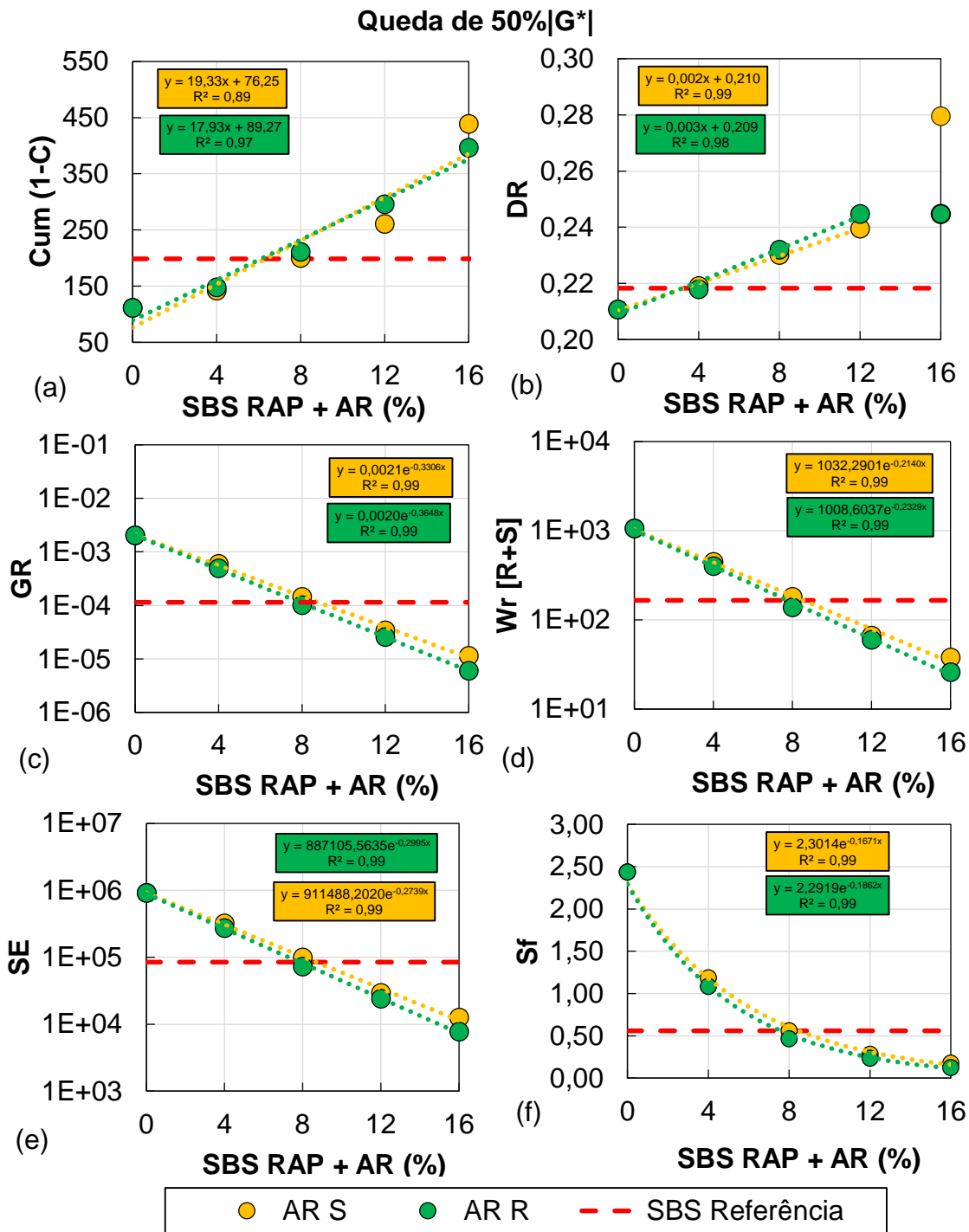


Figura 215 – Critérios de ruptura determinados com base na queda de 35% C para os ligantes Neat RAP com diferentes concentrações de agente S (a, b, c) e R (d, e, f)

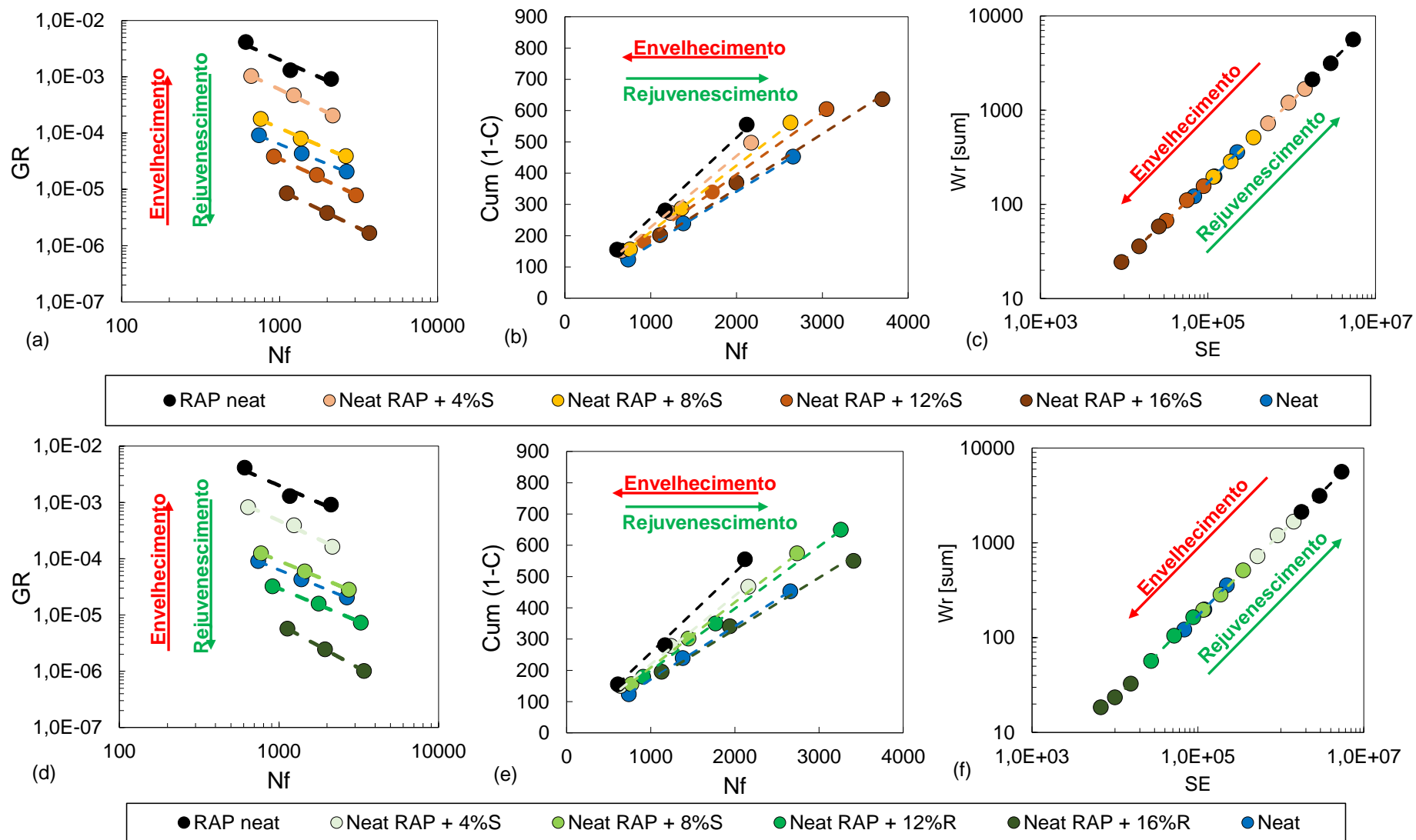


Figura 216 – Critérios de ruptura determinados com base na queda de 35% C para os ligantes SBS RAP com diferentes concentrações de agente S (a, b, c) e R (d, e, f)

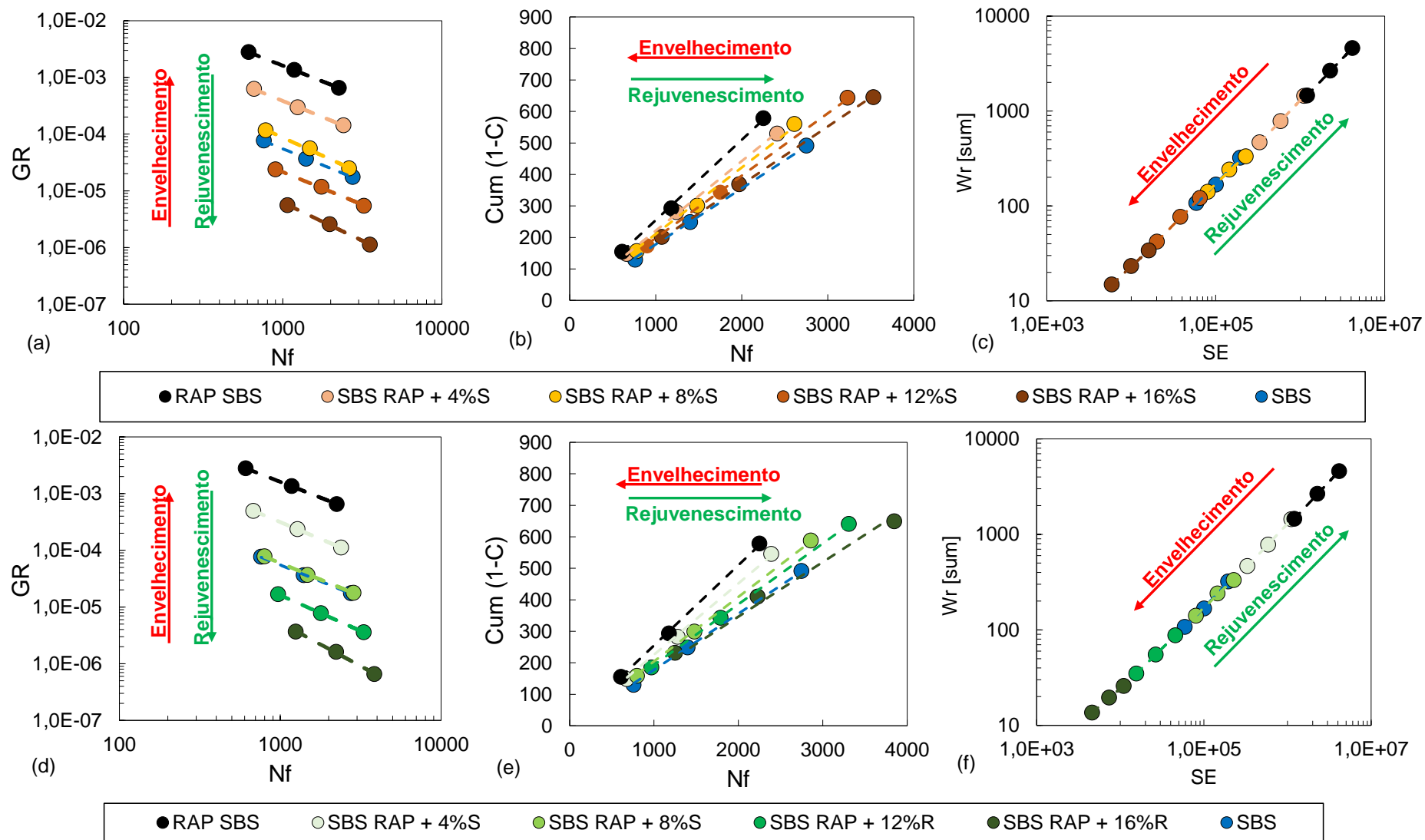


Figura 217 – Gráfico de mistura entre critérios de ruptura vs diferentes concentrações de AR S e R com o ligante Neat RAP determinados com base na definição de falha de queda de 35%C

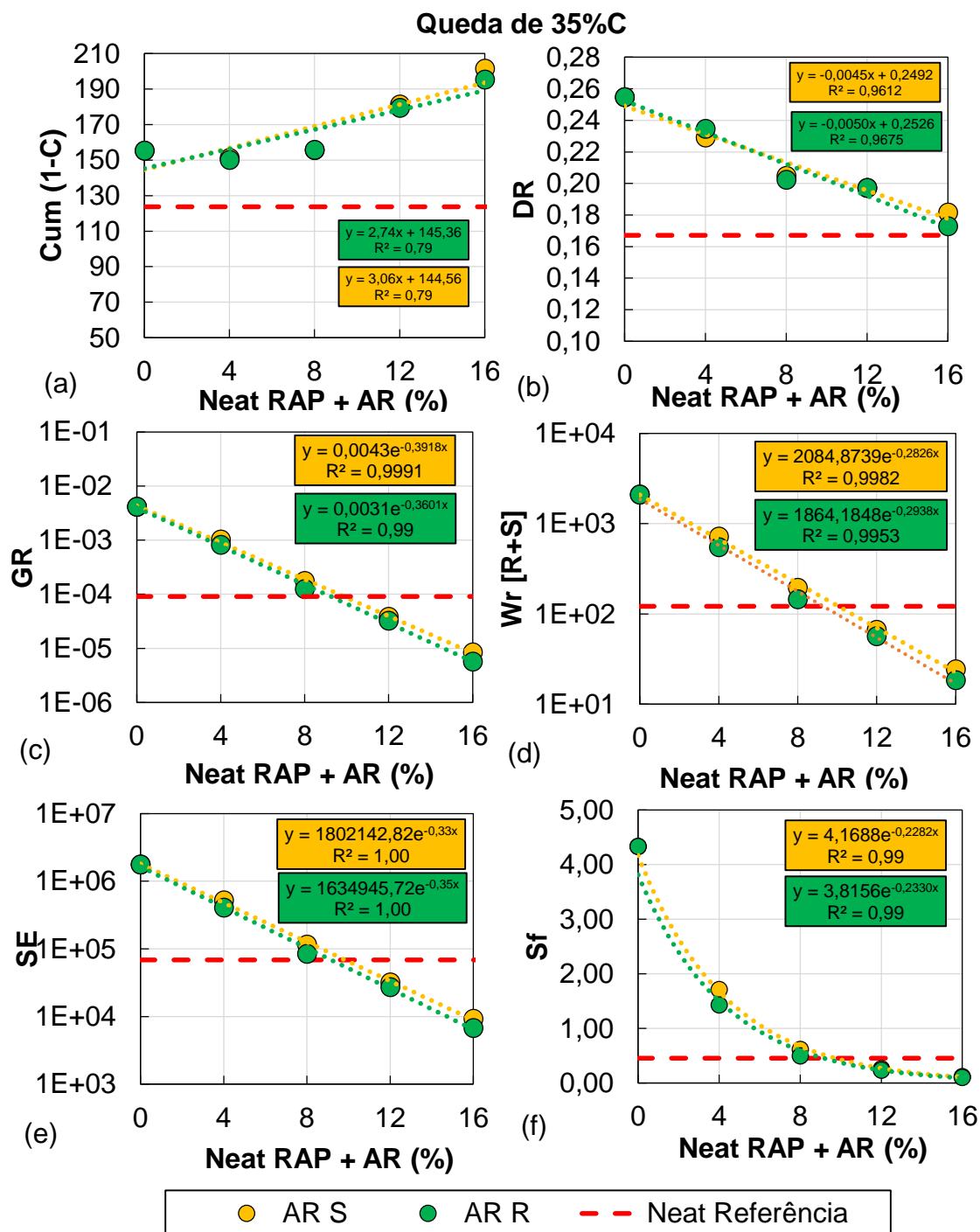


Figura 218 – Gráfico de mistura entre critérios de ruptura vs diferentes concentrações de AR S e R com o ligante SBS RAP determinados com base na definição de falha de queda de 35%C

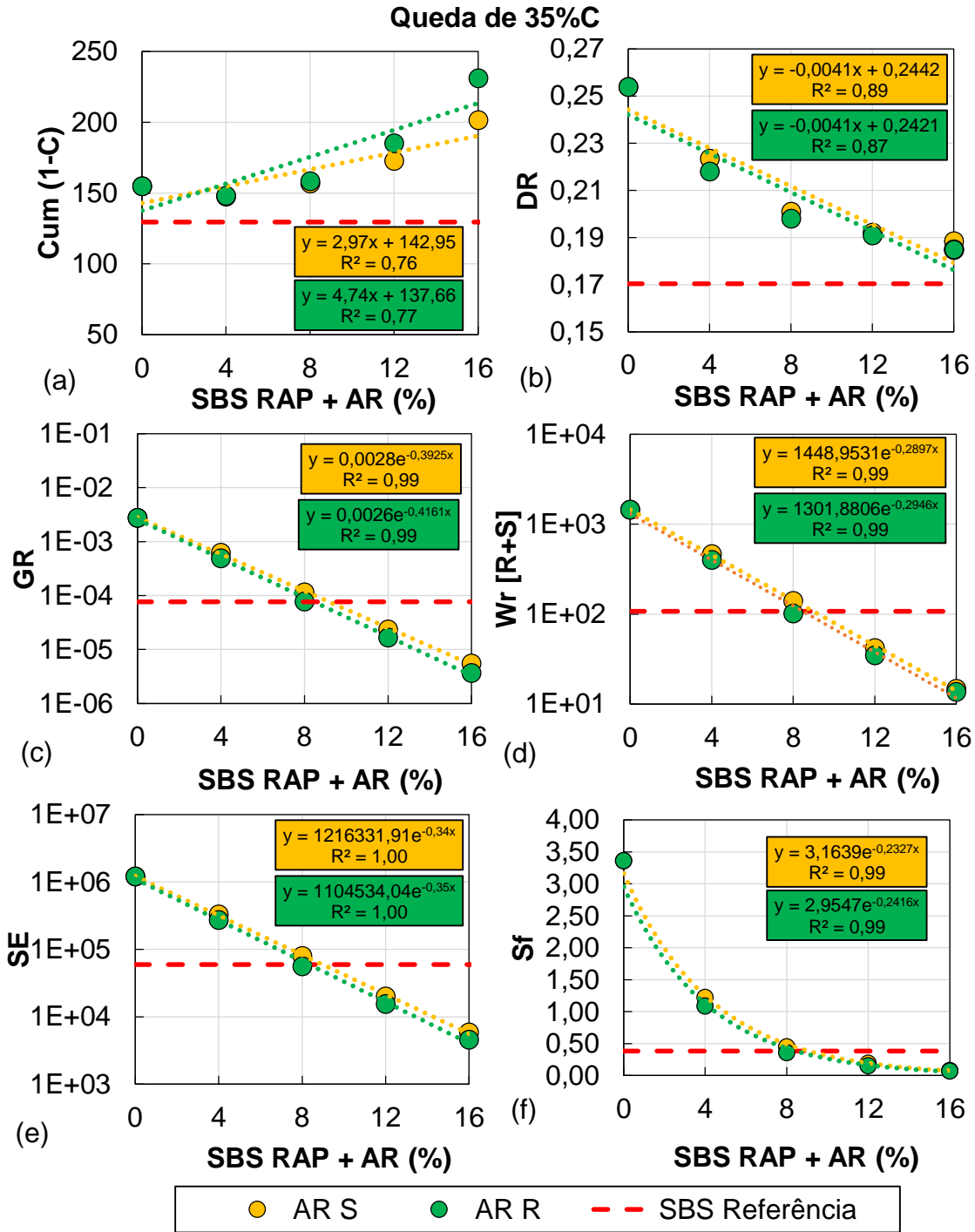


Figura 219 – Critérios de ruptura determinados com base no pico de C.N para os ligantes Neat RAP com diferentes concentrações de agente S (a, b, c) e R (d, e, f)

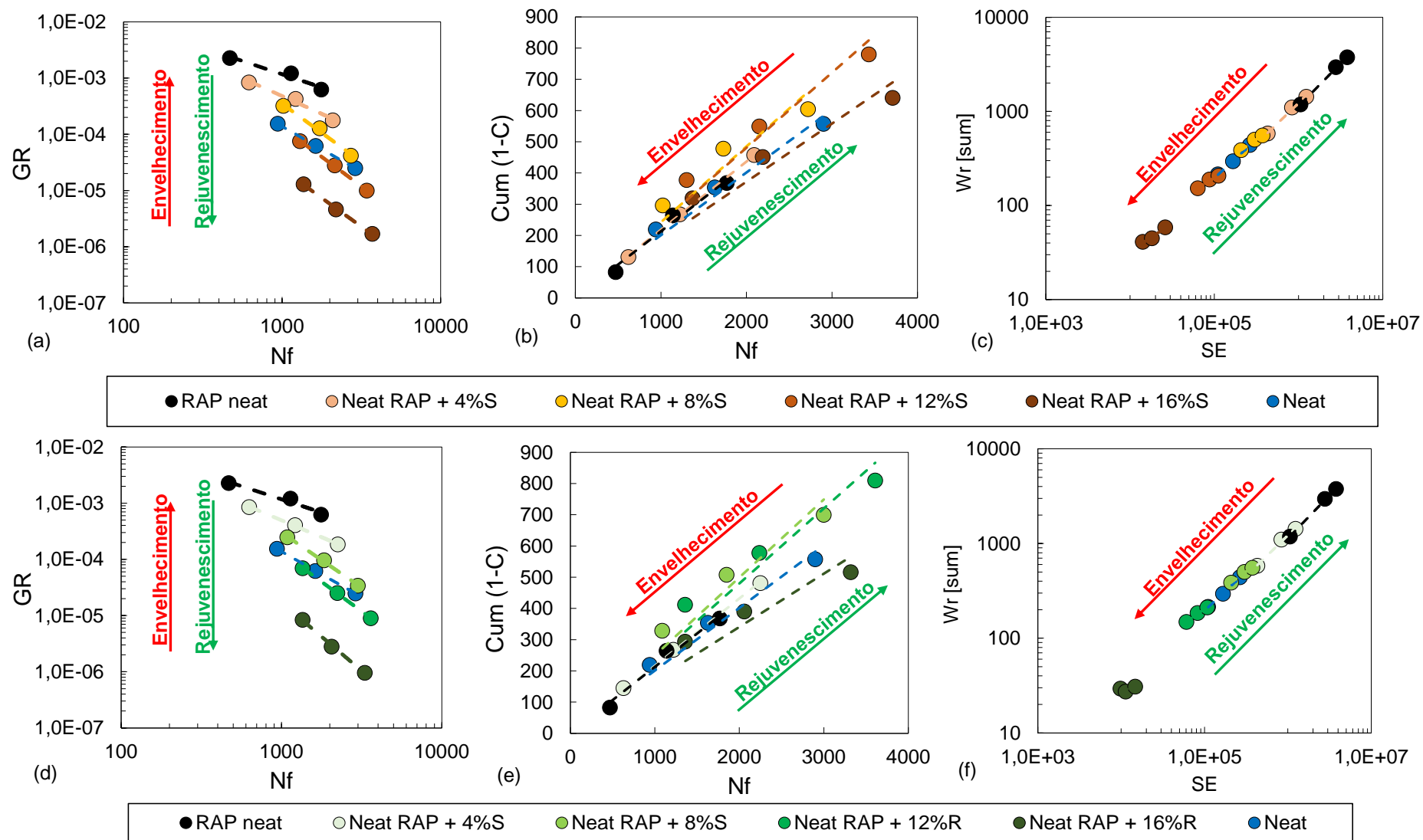


Figura 220 – Critérios de ruptura determinados com base no pico de C.N para os ligantes SBS RAP com diferentes concentrações de agente S (a, b, c) e R (d, e, f)

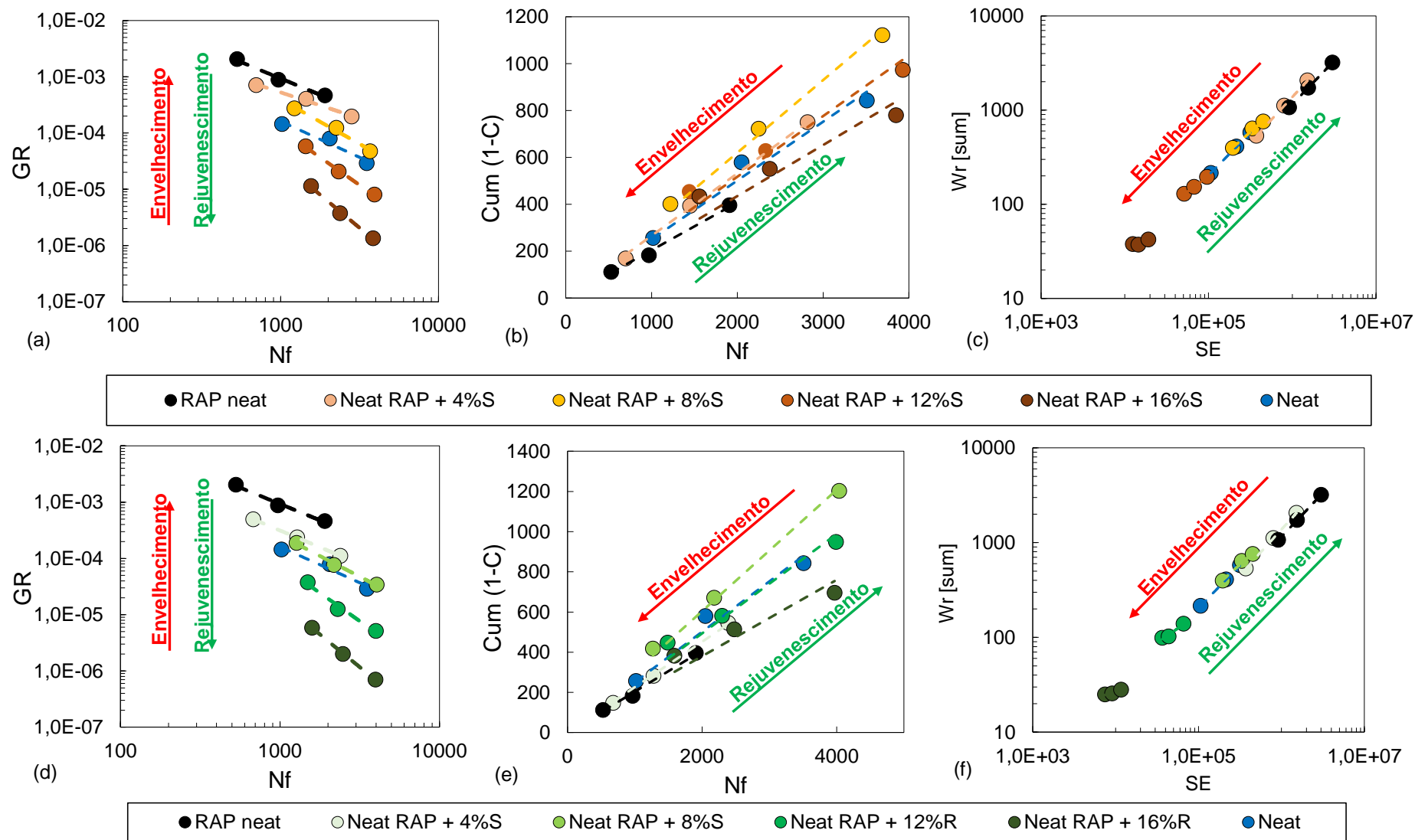


Figura 221 – Gráfico de mistura entre critérios de ruptura vs diferentes concentrações de AR S e R com o ligante Neat RAP determinados com base na definição de falha de pico de C.N

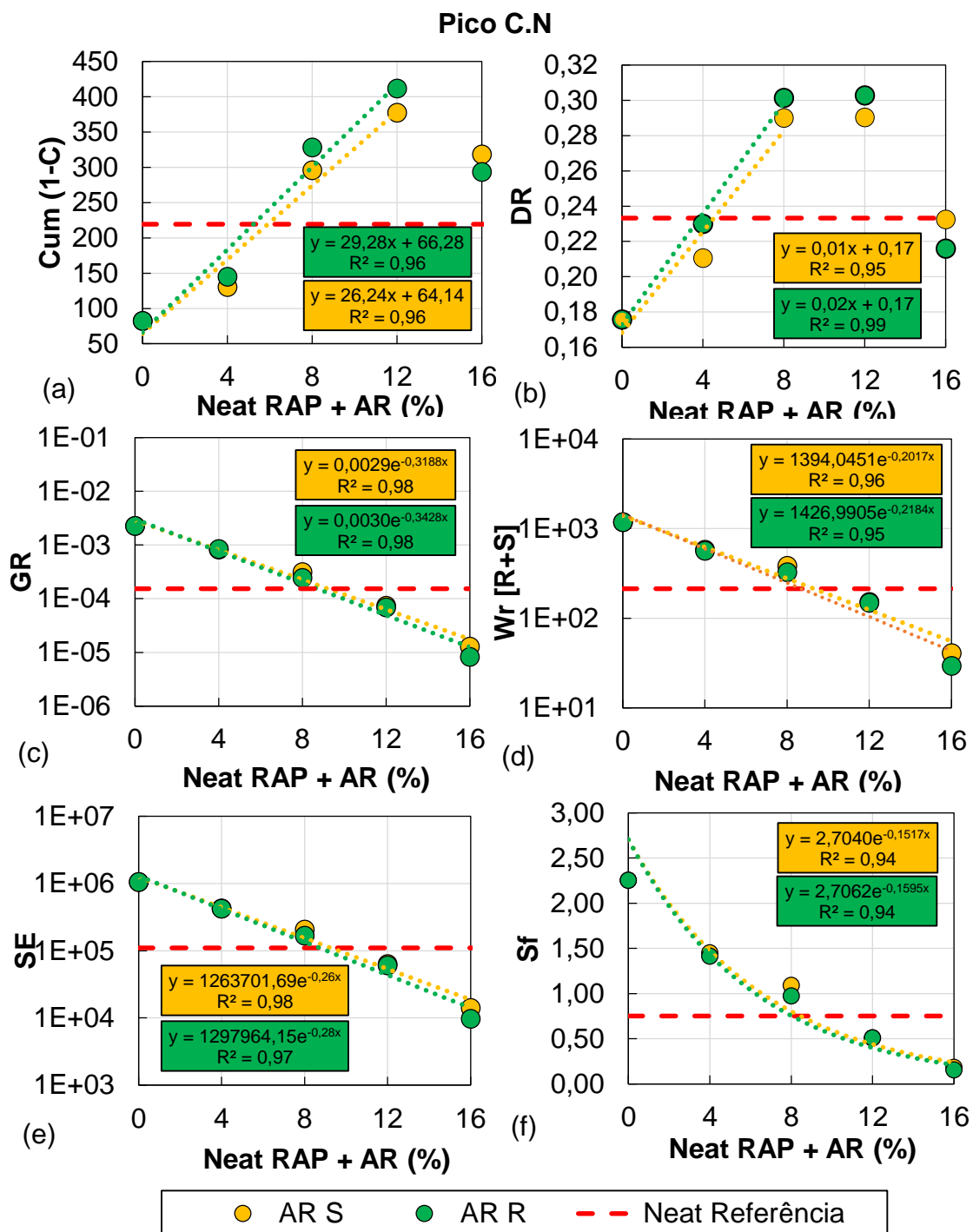


Figura 222 – Gráfico de mistura entre critérios de ruptura vs diferentes concentrações de AR S e R com o ligante SBS RAP determinados com base na definição de falha pico de C.N

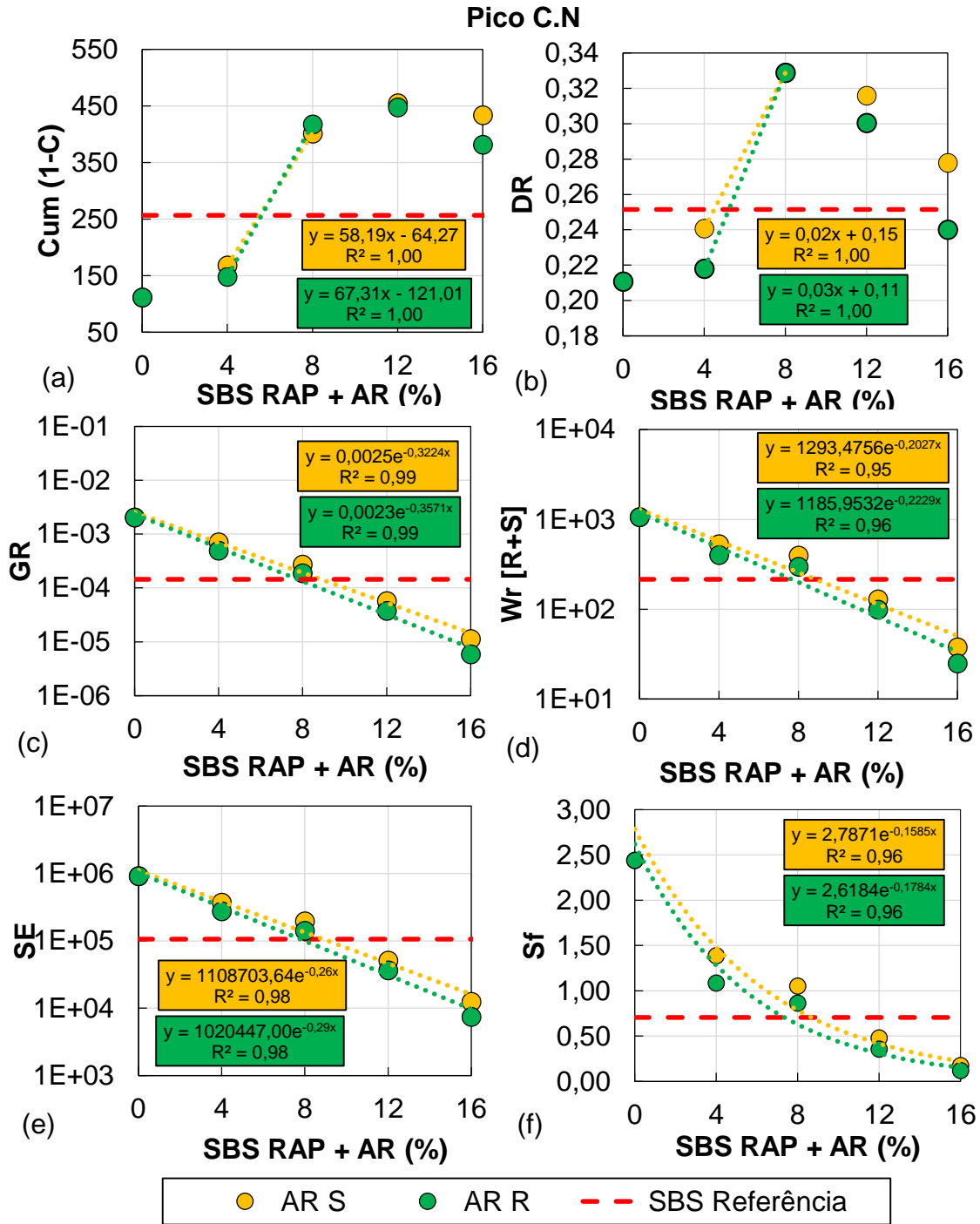


Figura 223 – Critérios de ruptura determinados com base no pico de W_S^R para os ligantes Neat RAP com diferentes concentrações de agente S (a, b, c) e R (d, e, f)

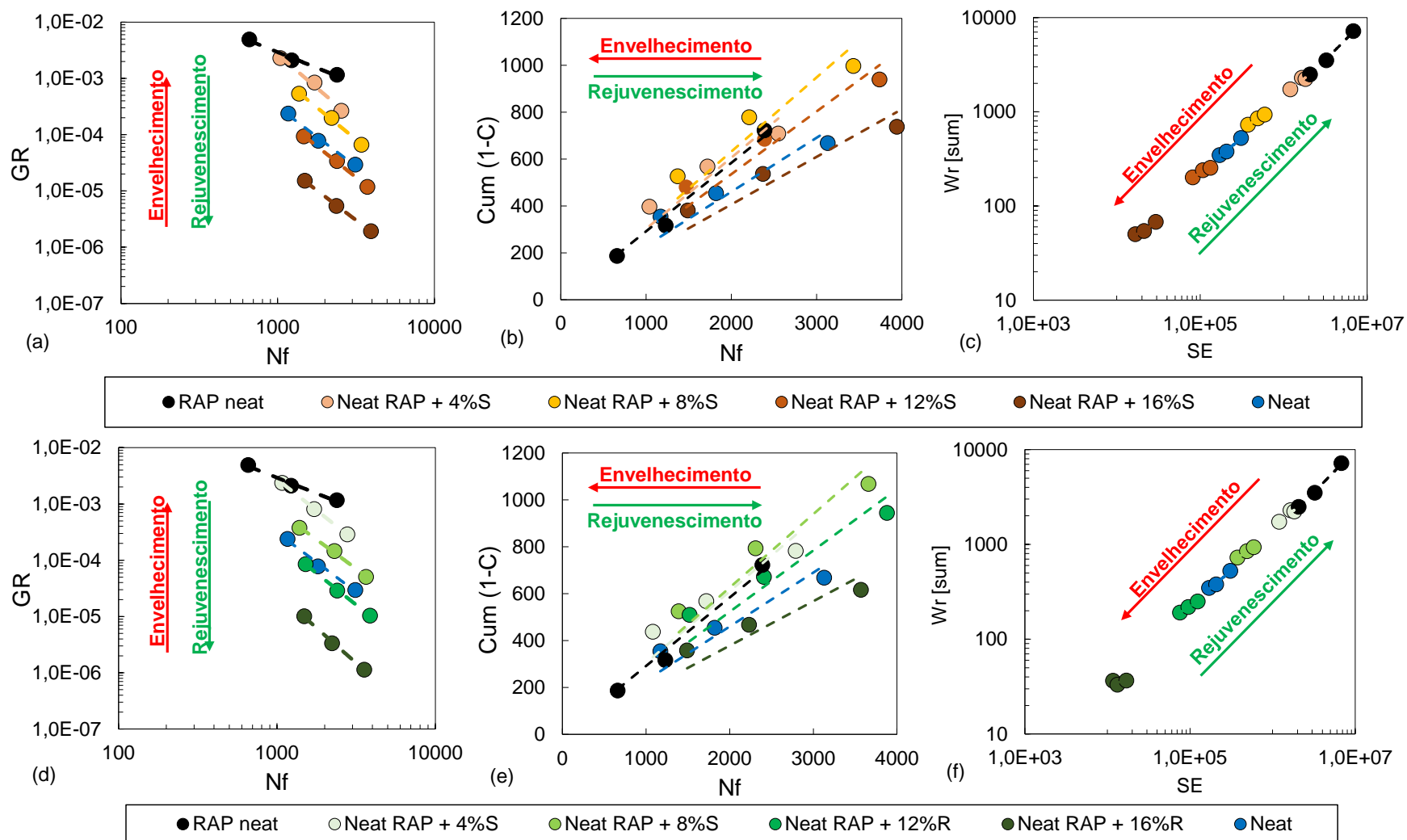


Figura 224 – Critérios de ruptura determinados com base no pico de W_S^R para os ligantes Neat RAP com diferentes concentrações de agente S (a, b, c) e R (d, e, f)

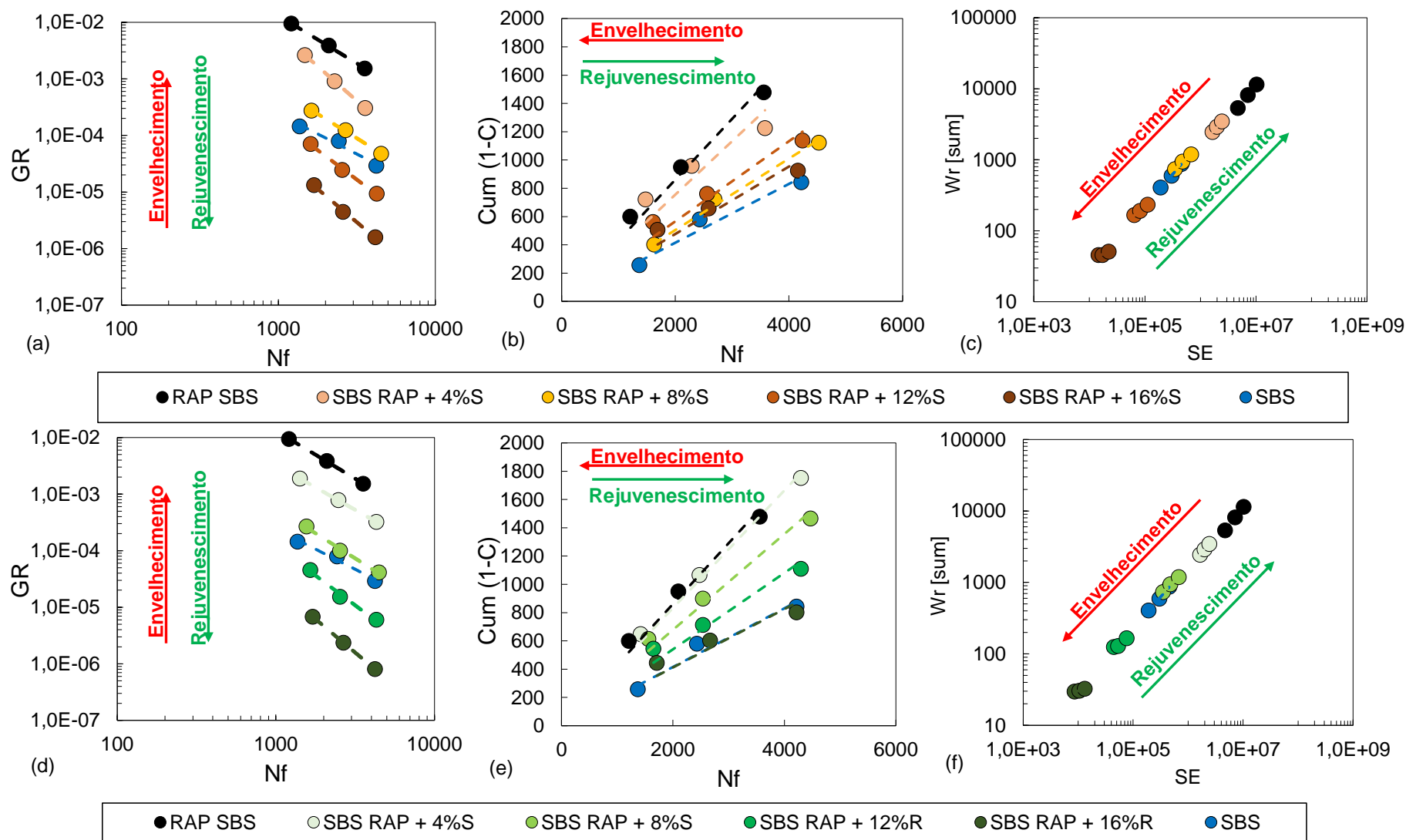


Figura 225 – Gráfico de mistura entre critérios de ruptura vs diferentes concentrações de AR S e R com o ligante Neat RAP determinados com base na definição de falha pico de W_S^R

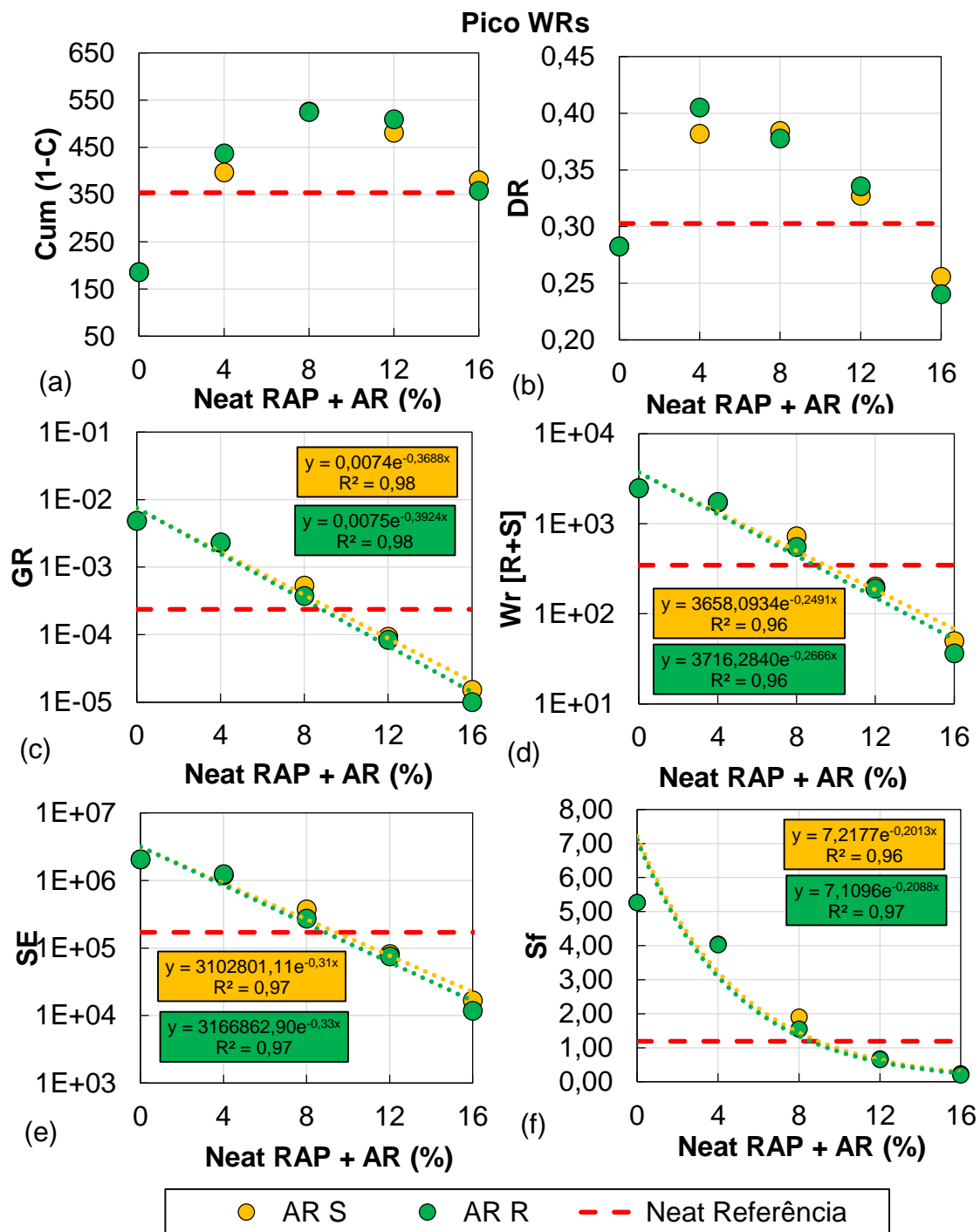


Figura 226 – Gráfico de mistura entre critérios de ruptura vs diferentes concentrações de AR S e R com o ligante SBS RAP determinados com base na definição de falha pico de W_S^R

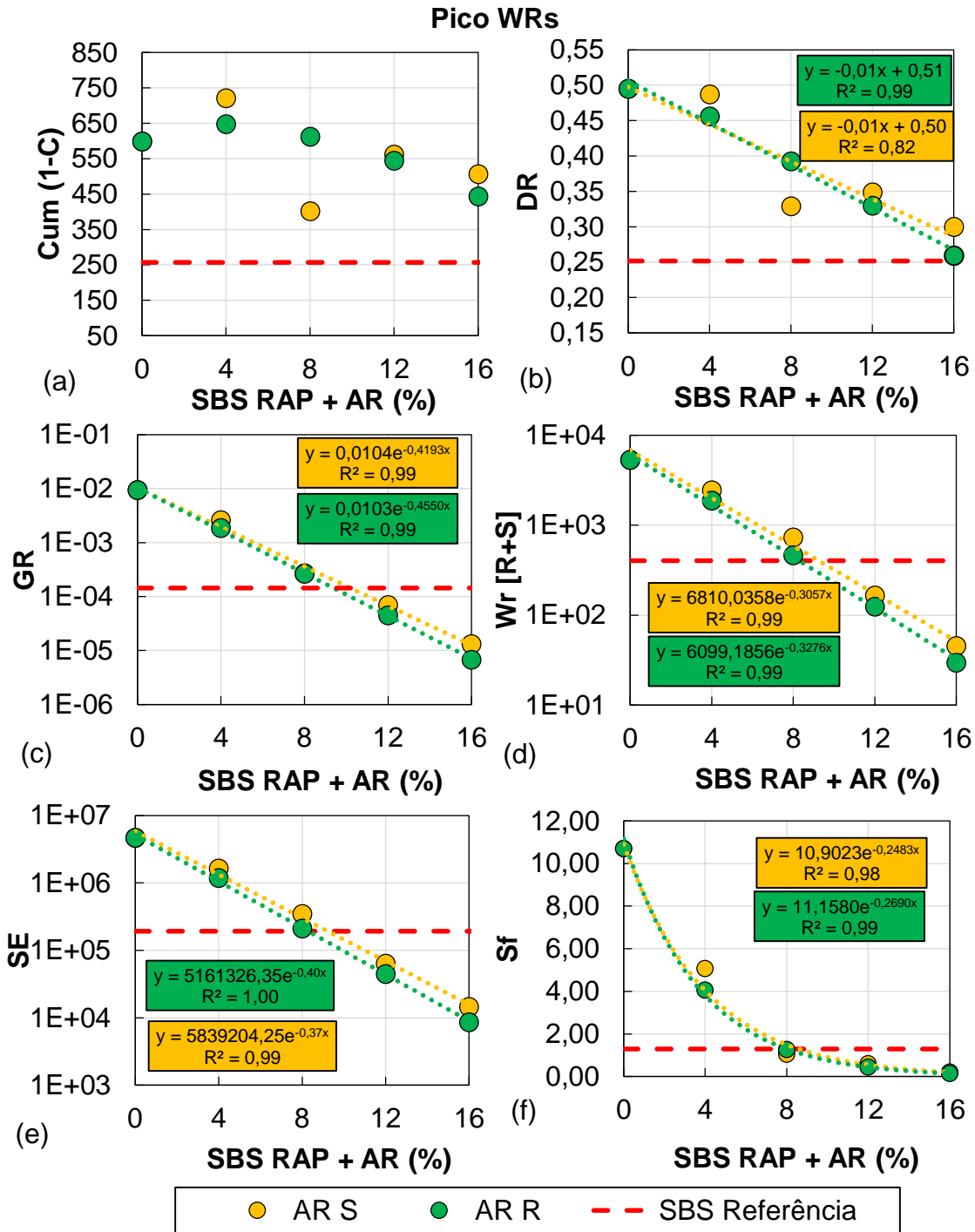


Figura 227 – Critérios de ruptura determinados com base no pico do δ para os ligantes Neat RAP com diferentes concentrações de agente S (a, b, c) e R (d, e, f)

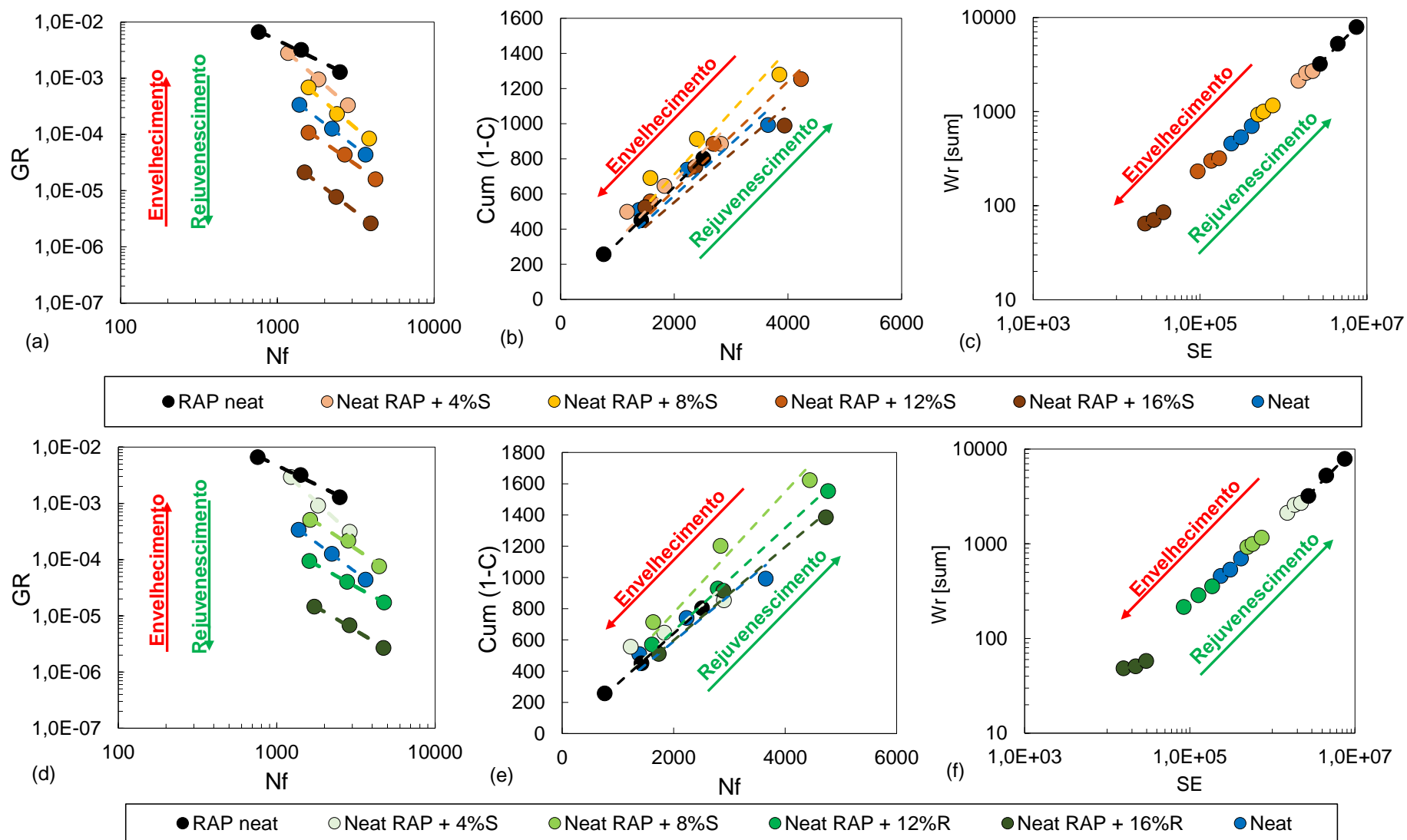


Figura 228 – Critérios de ruptura determinados com base no pico do δ para os ligantes SBS RAP com diferentes concentrações de agente S (a, b, c) e R (d, e, f)

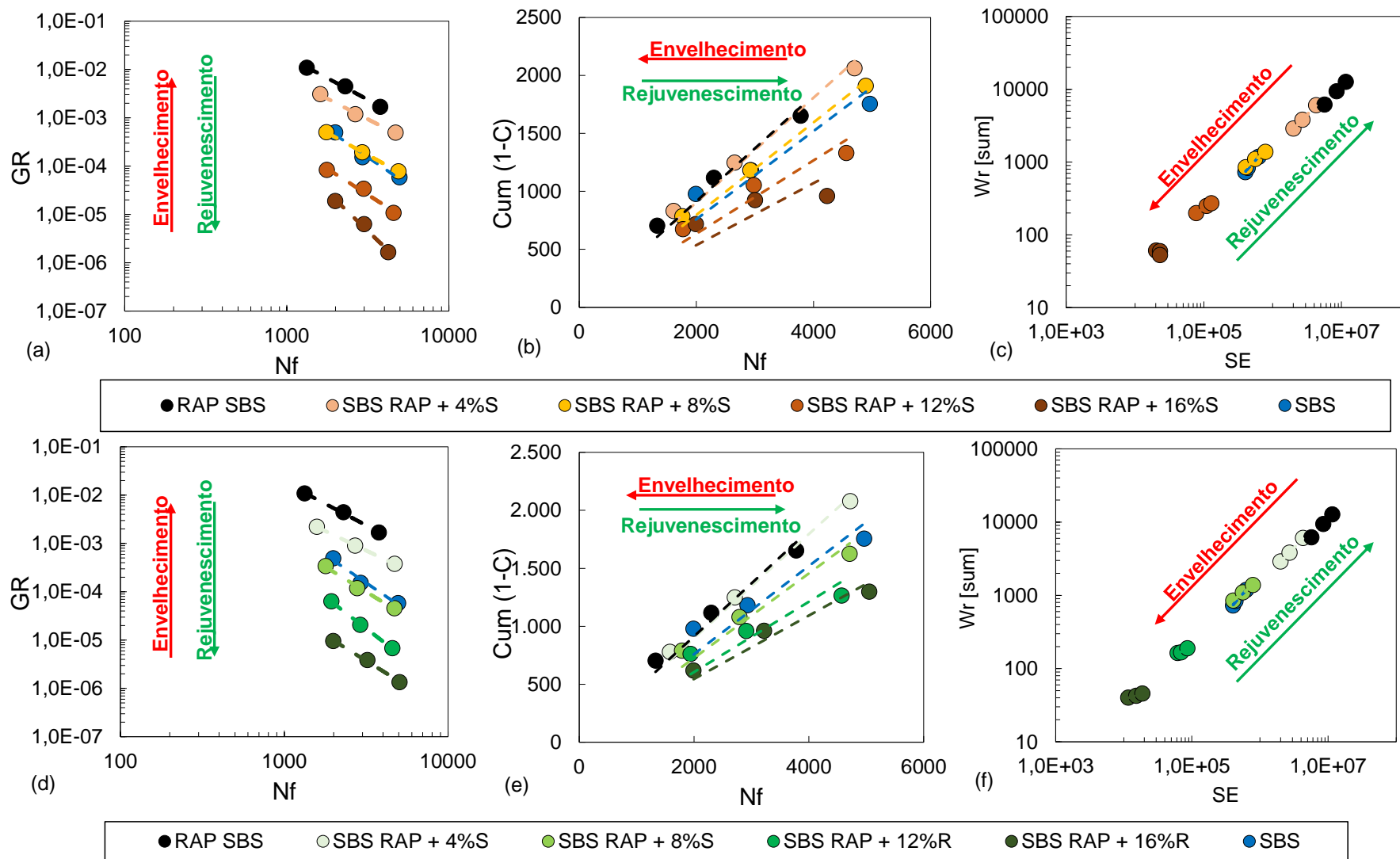


Figura 229 – Gráfico de mistura entre critérios de ruptura vs diferentes concentrações de AR S e R com o ligante Neat RAP determinados com base na definição de falha do pico do δ

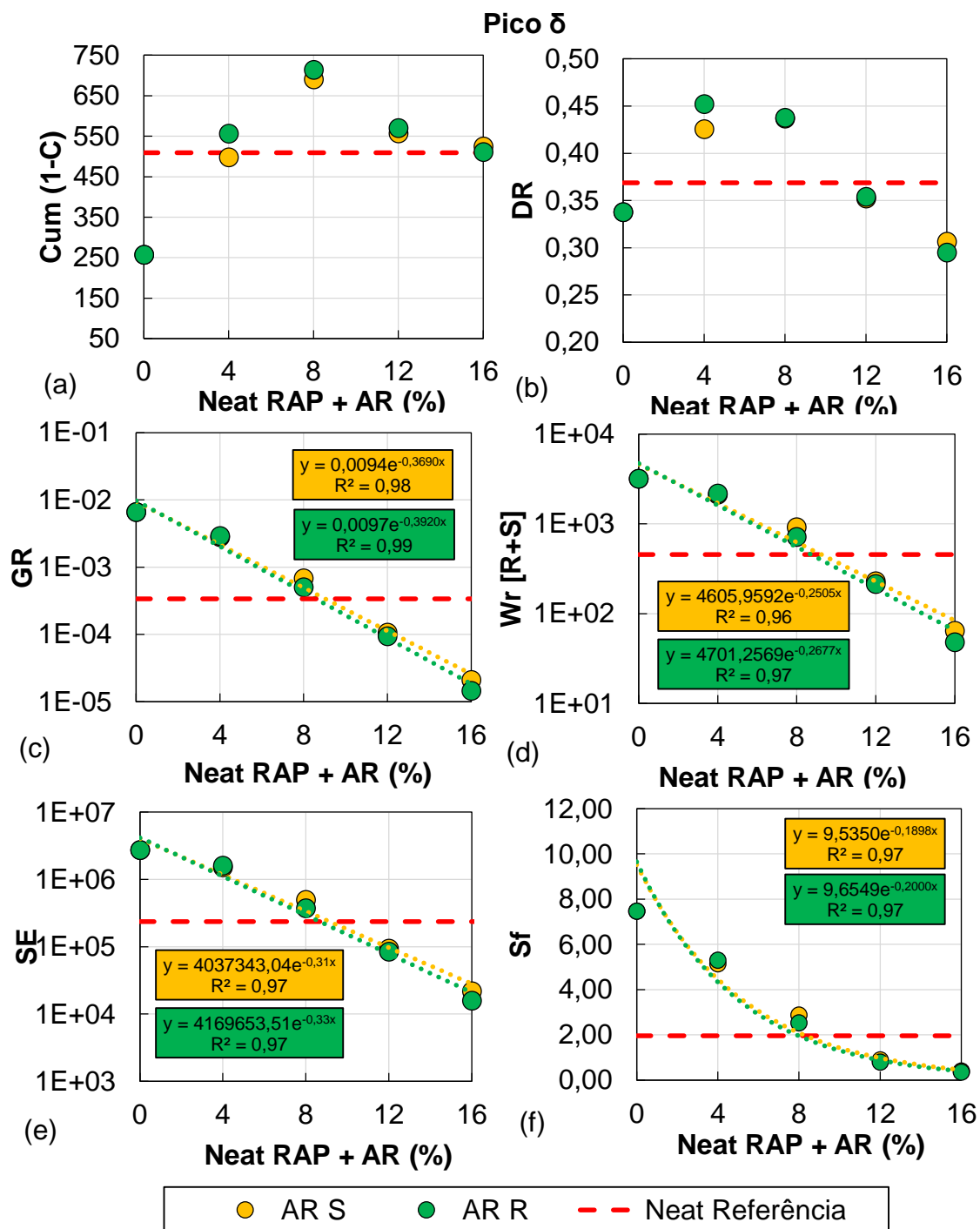


Figura 230 – Gráfico de mistura entre critérios de ruptura vs diferentes concentrações de AR S e R com o ligante SBS RAP determinados com base na definição de falha do pico do δ

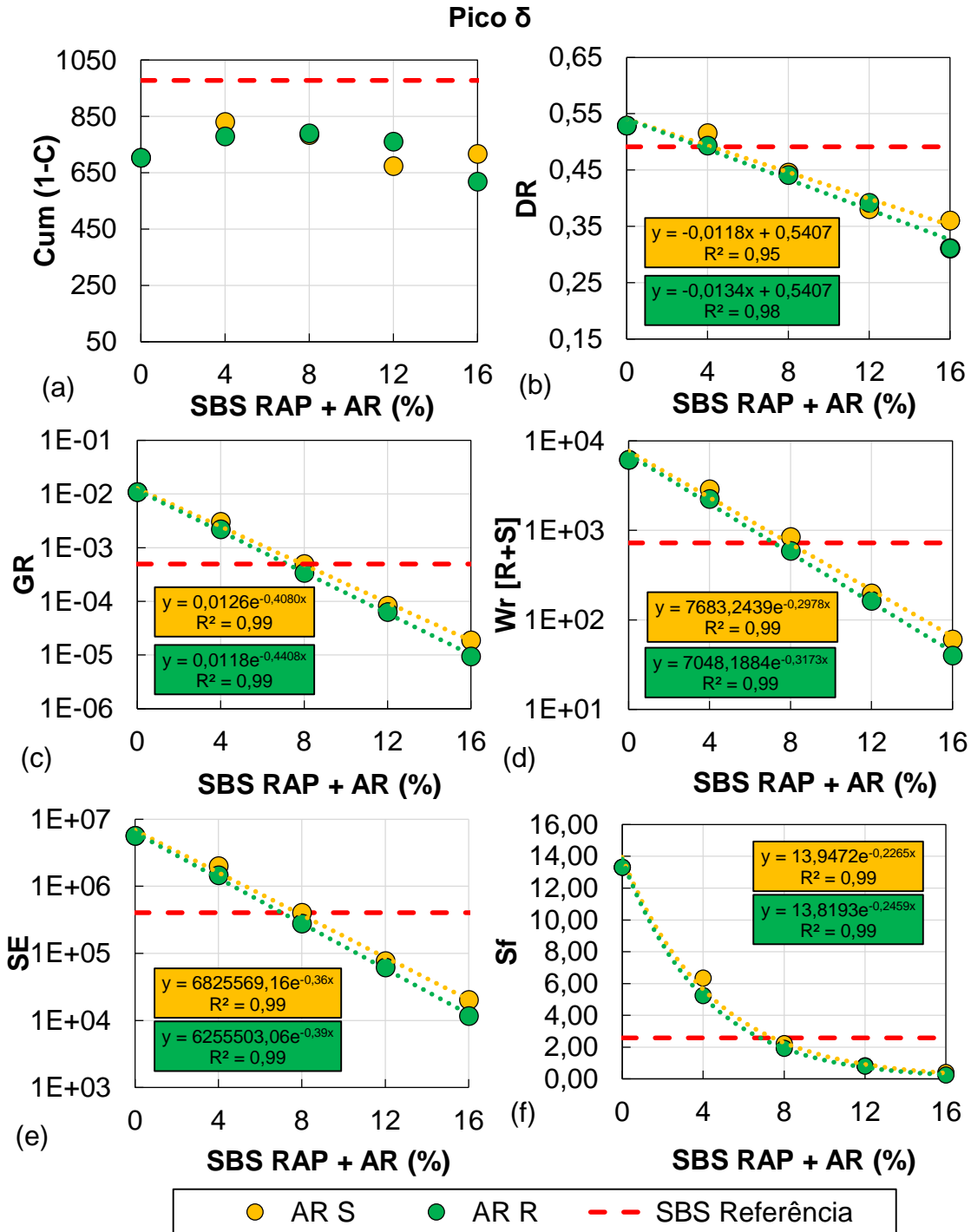


Figura 231 – Critérios de ruptura determinados com base no $C^2.N.(1-C)$ para os ligantes Neat RAP com diferentes concentrações de agente S (a, b, c) e R (d, e, f)

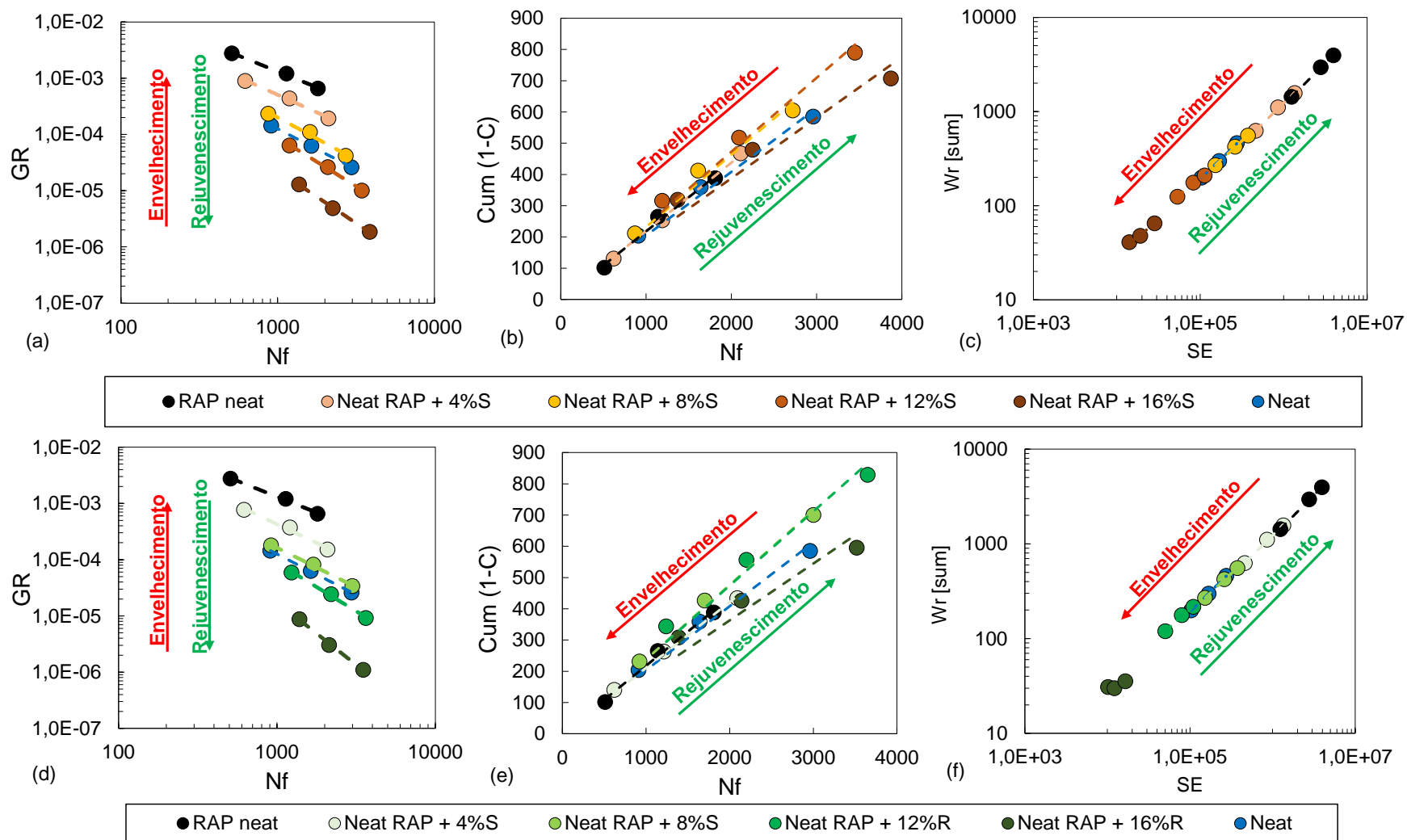


Figura 232 – Critérios de ruptura determinados com base no $C^2.N.(1-C)$ para os ligantes SBS RAP com diferentes concentrações de agente S (a, b, c) e R (d, e, f)

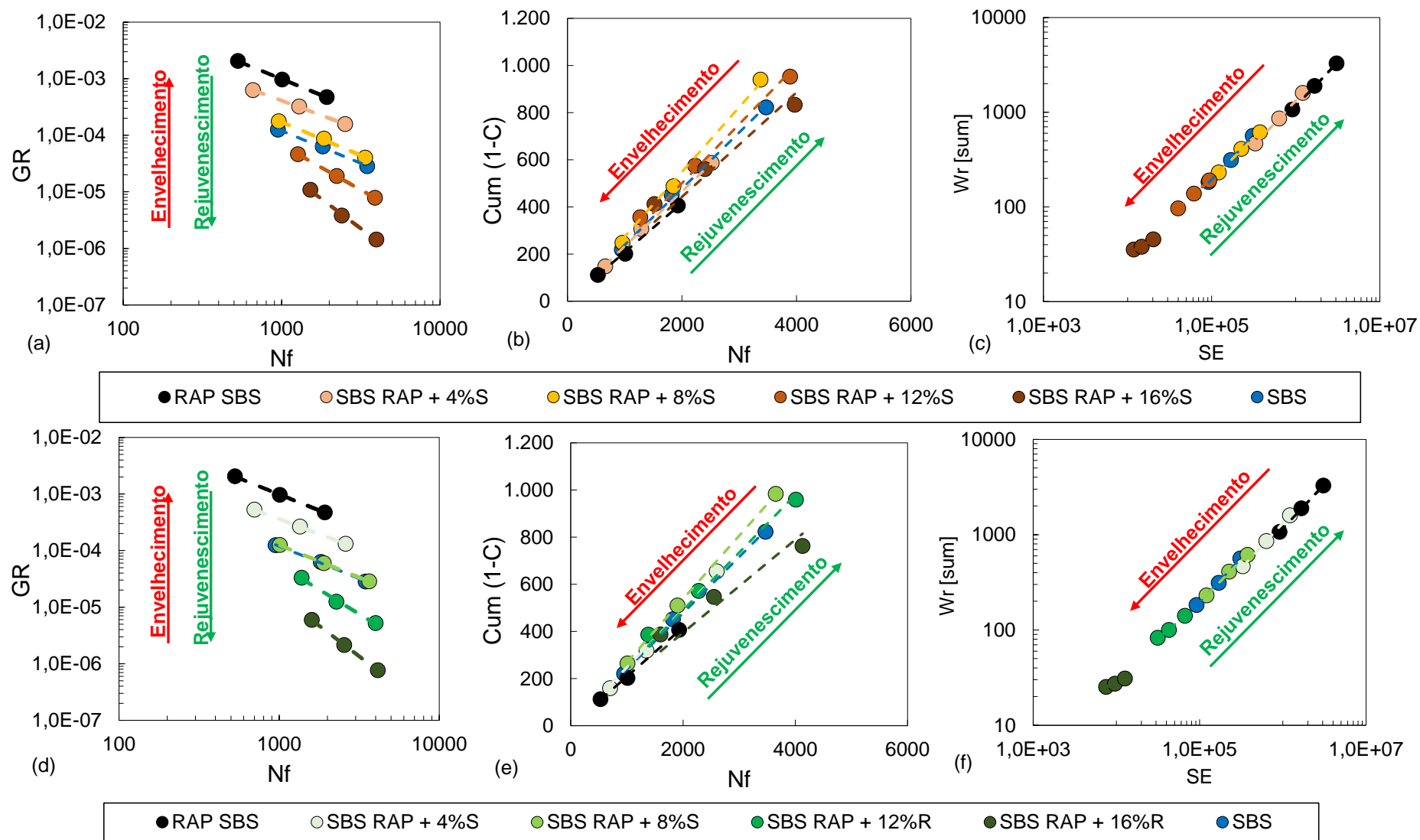


Figura 233 – Gráfico de mistura entre critérios de ruptura vs diferentes concentrações de AR S e R com o ligante Neat RAP determinados com base na definição de falha do C².N.(1-C)

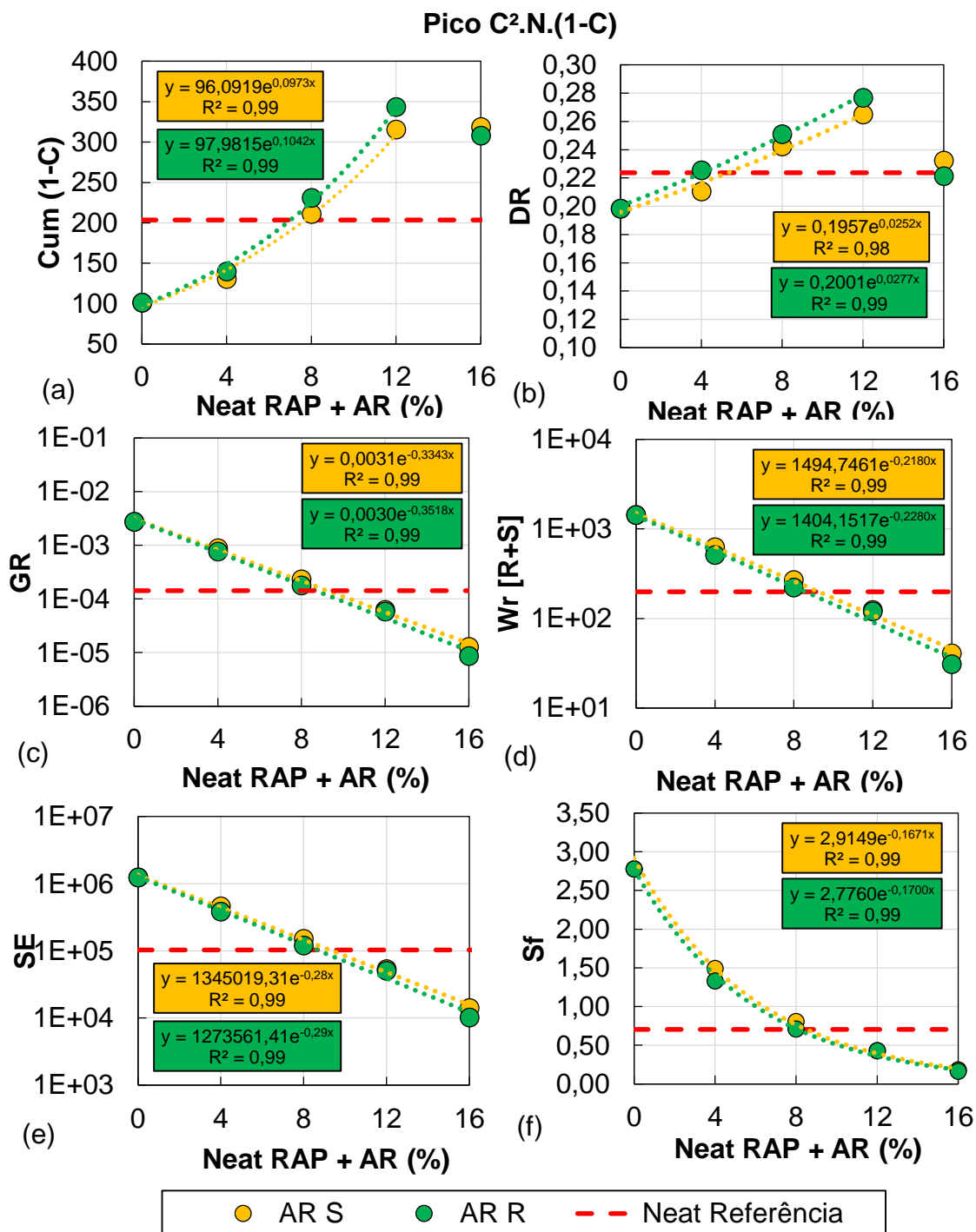
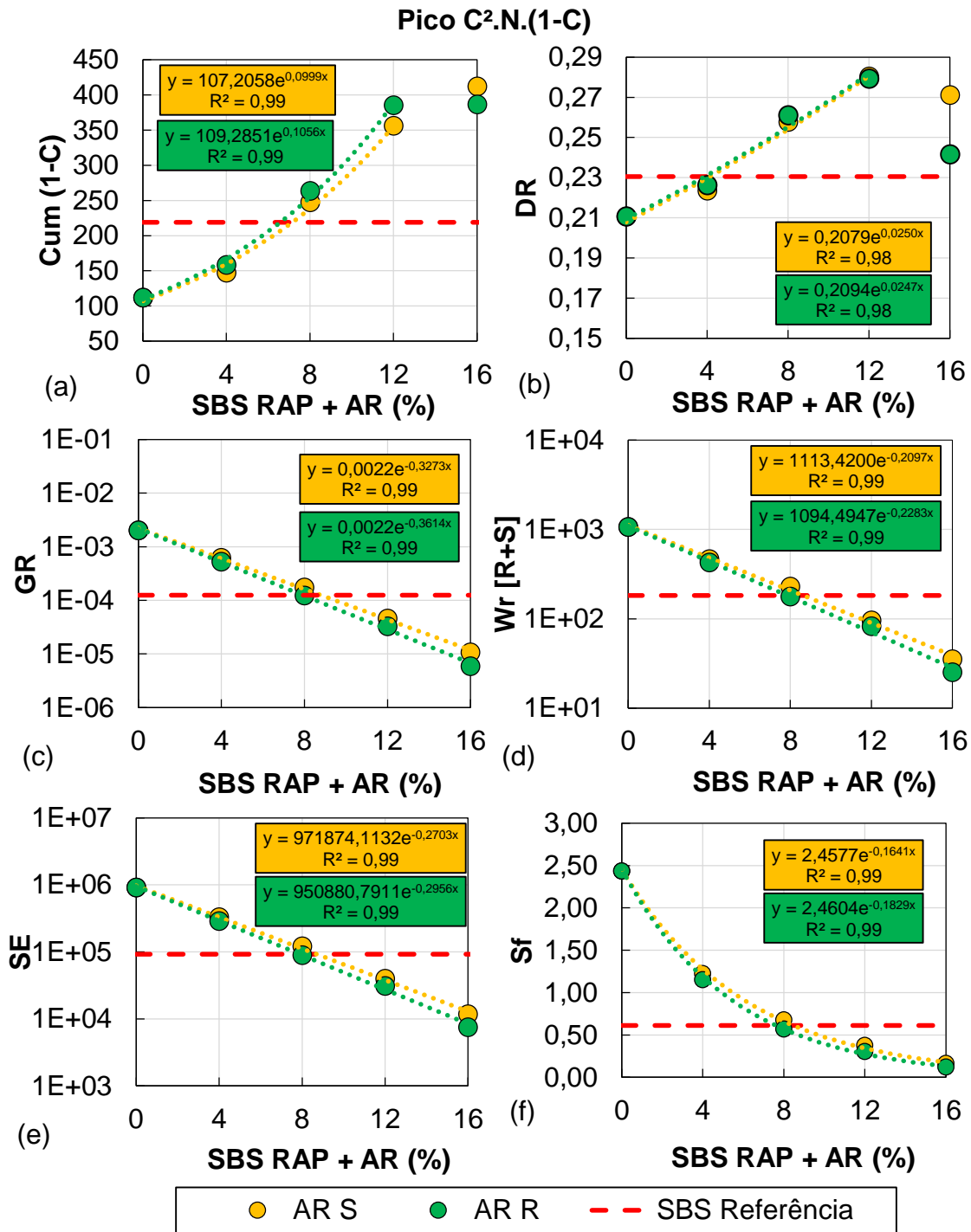


Figura 234 – Gráfico de mistura entre critérios de ruptura vs diferentes concentrações de AR S e R com o ligante SBS RAP determinados com base na definição de falha do C².N.(1-C)



Apêndice F – Efeito do rejuvenescimento na simulação da vida de fadiga com base nas equações de Wang et al. (2015), Wang et al. (2018) e Safaei (2017) e diferentes definições de falha

Figura 235 – Vida de fadiga dos ligantes Neat RAP com diferentes concentrações de AR S (a, b, c) e R (d, e, f) determinados com base na definição de falha de queda de 50%|G*| e diferentes leis de fadiga

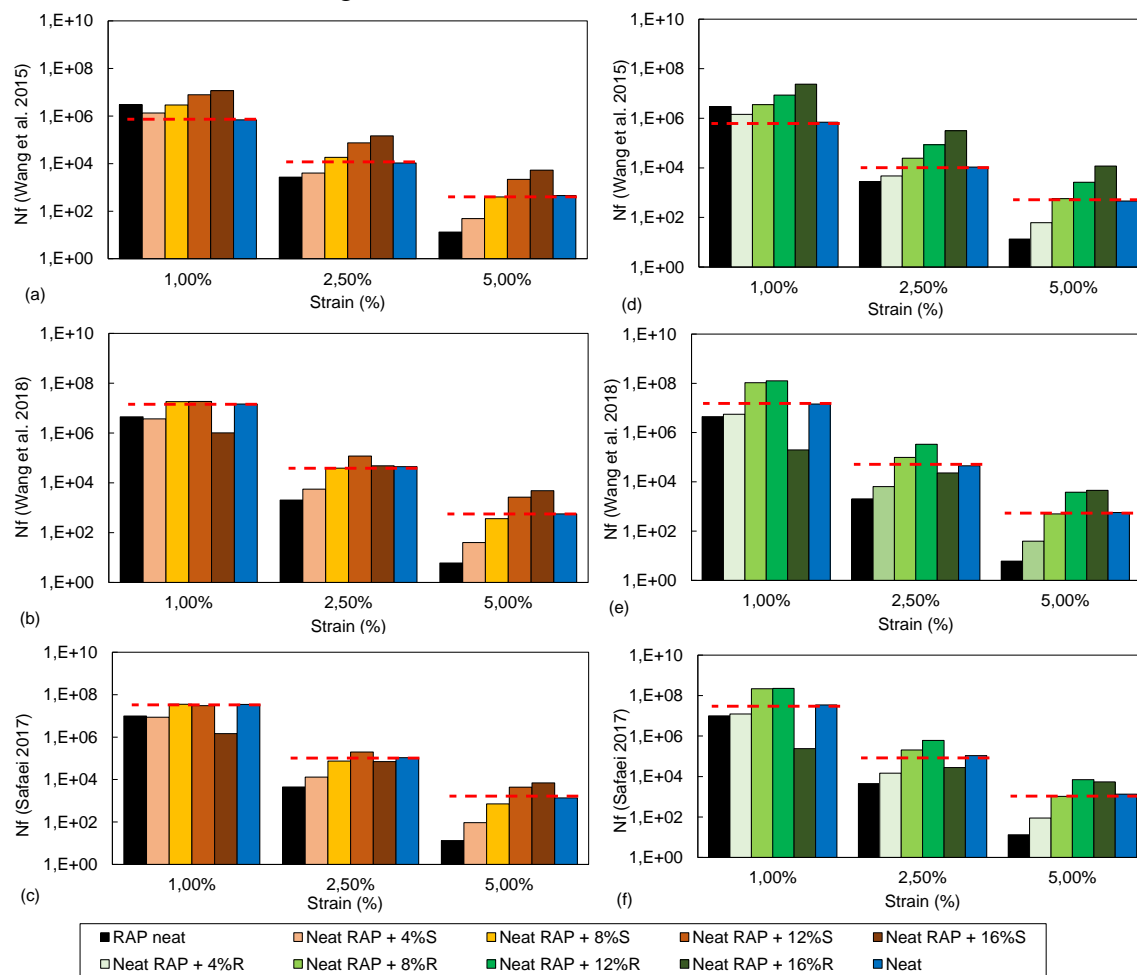


Figura 236 – Vida de fadiga dos ligantes SBS RAP com diferentes concentrações de AR S (a, b, c) e R (d, e, f) determinados com base na definição de falha de queda de 50% |G*| e diferentes leis de fadiga

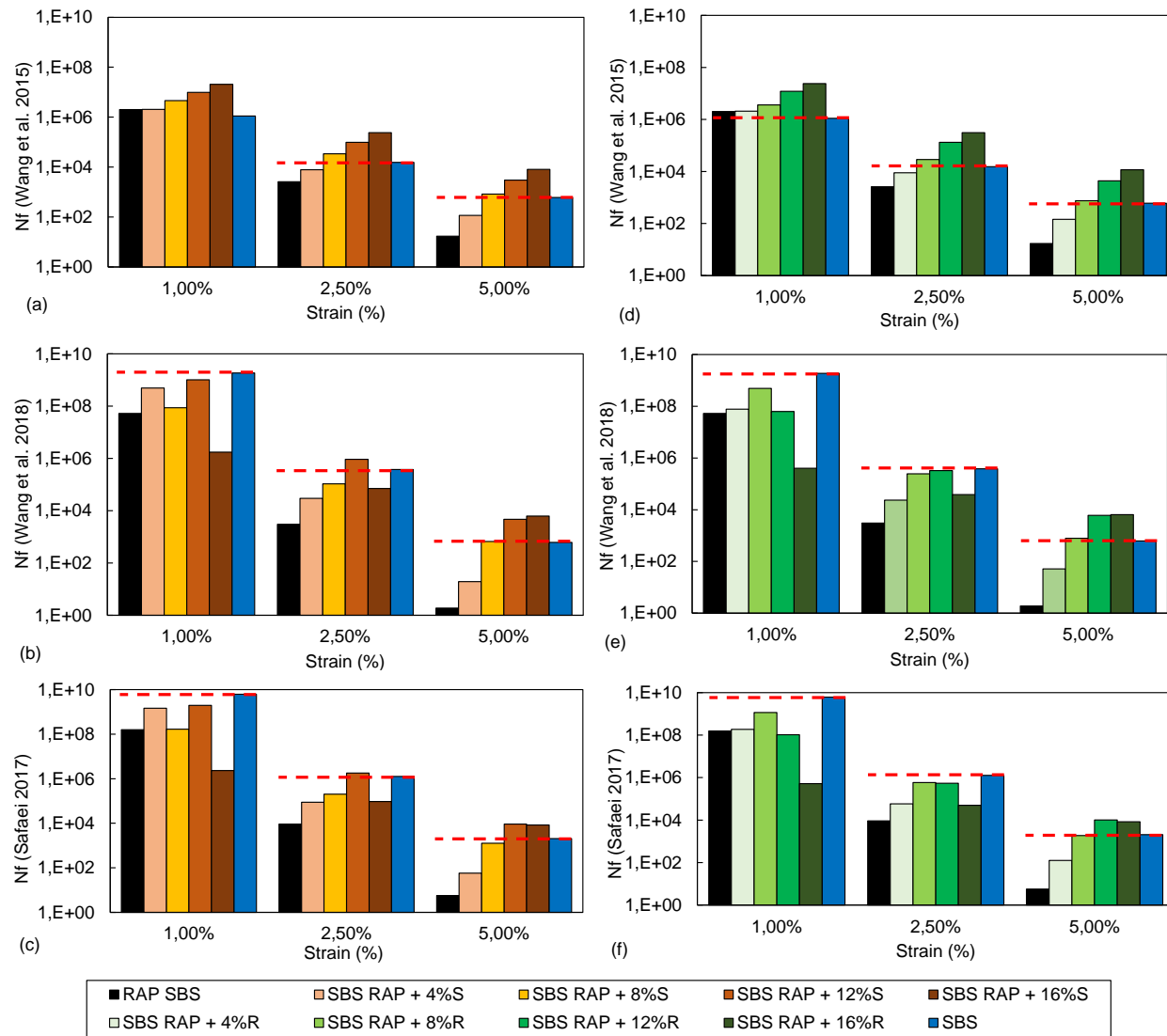


Figura 237 – Gráfico de mistura entre Nf em 5% de deformação por diferentes leis para previsão de desempenho vs diferentes concentrações de AR S e R com o ligante Neat RAP (a, b, c) e SBS RAP (d, e, f) determinados com base na definição de falha de queda de 50% |G*|

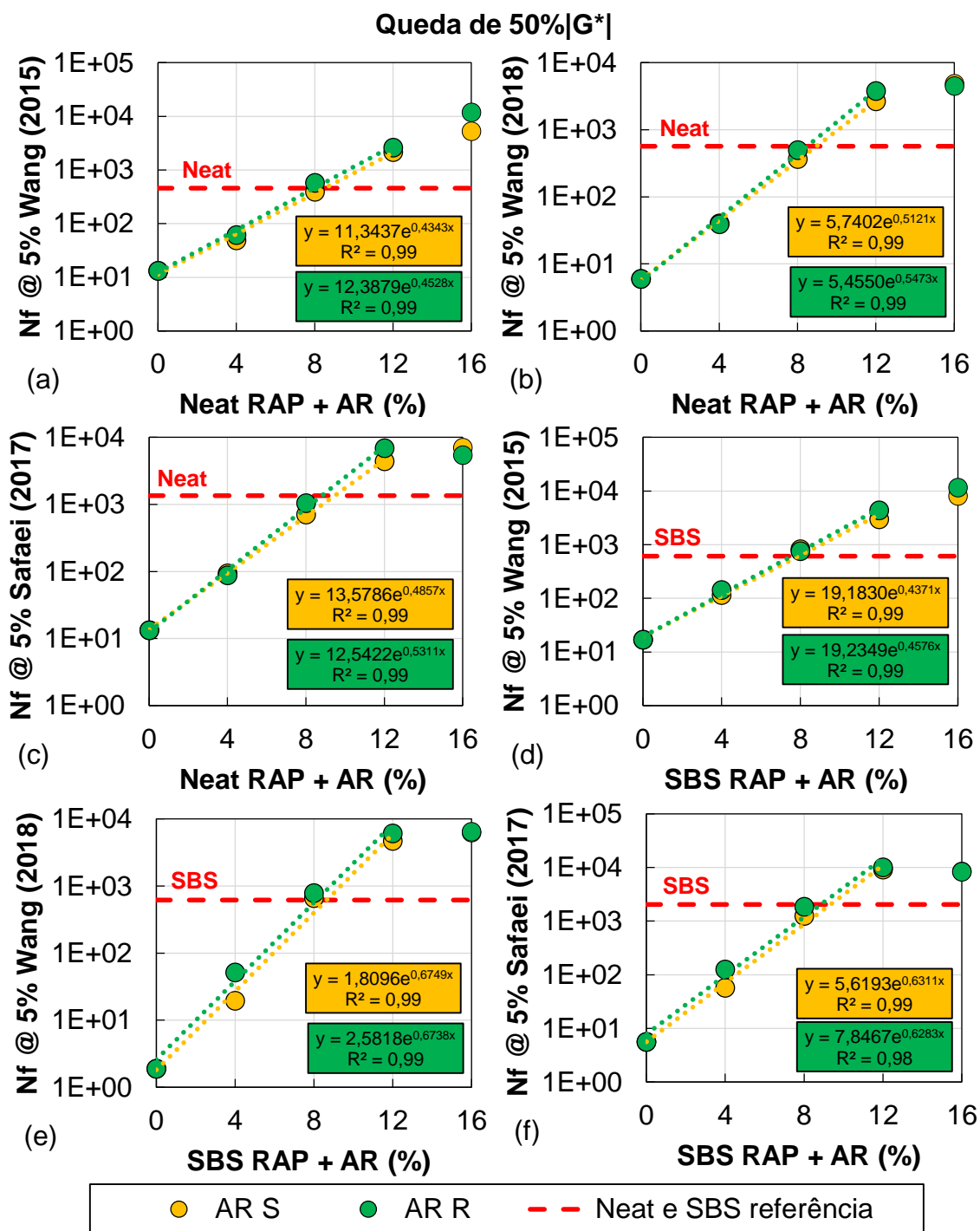


Figura 238 – Vida de fadiga dos ligantes Neat RAP com diferentes concentrações de AR S (a, b, c) e R (d, e, f) determinados com base na definição de falha de queda de 35% C e diferentes leis de fadiga

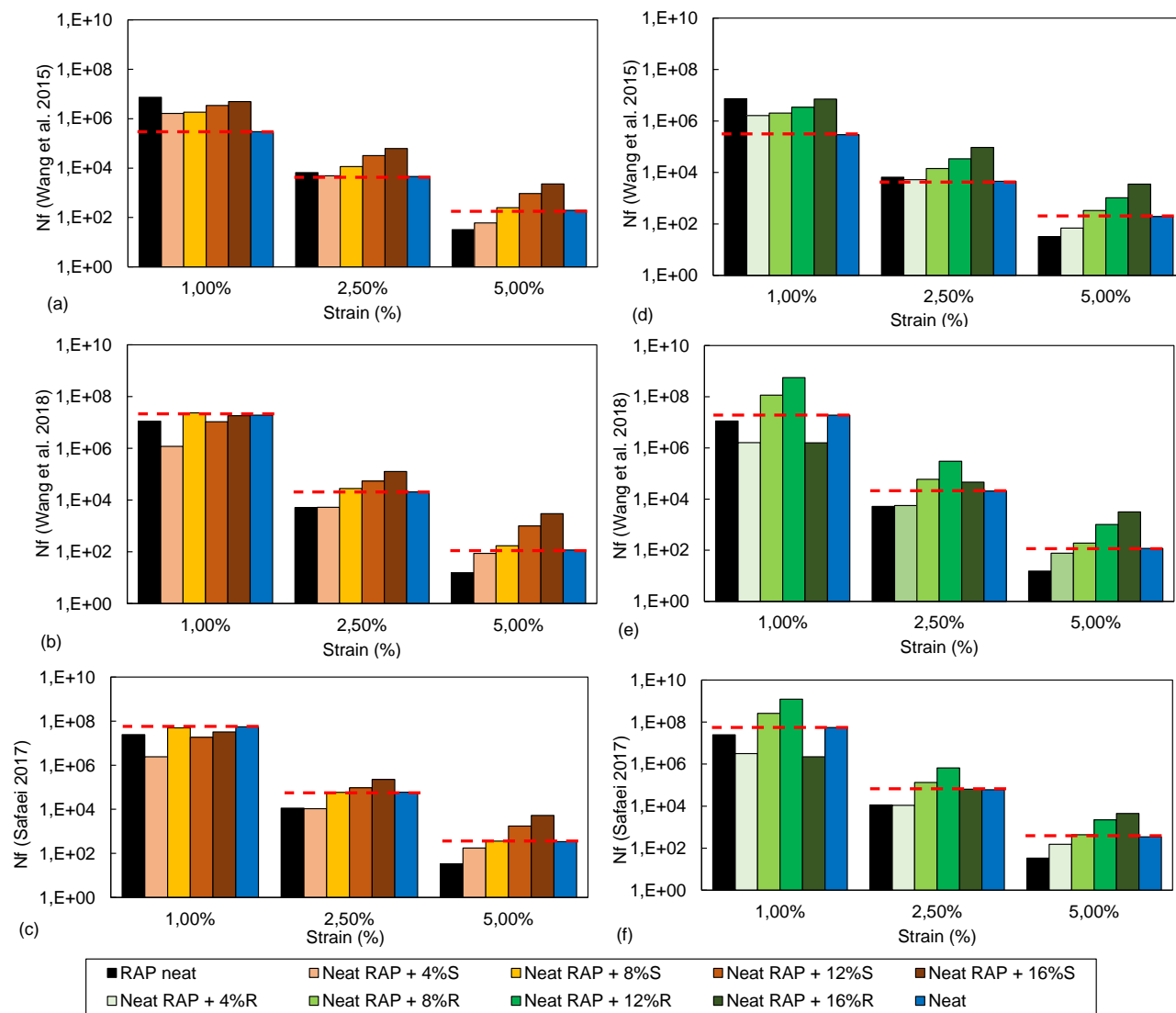


Figura 240 – Gráfico de mistura entre Nf em 5% de deformação por diferentes leis para previsão de desempenho vs diferentes concentrações de AR S e R com o ligante Neat RAP (a, b, c) e SBS RAP (d, e, f) determinados com base na definição de falha de queda de 35% C

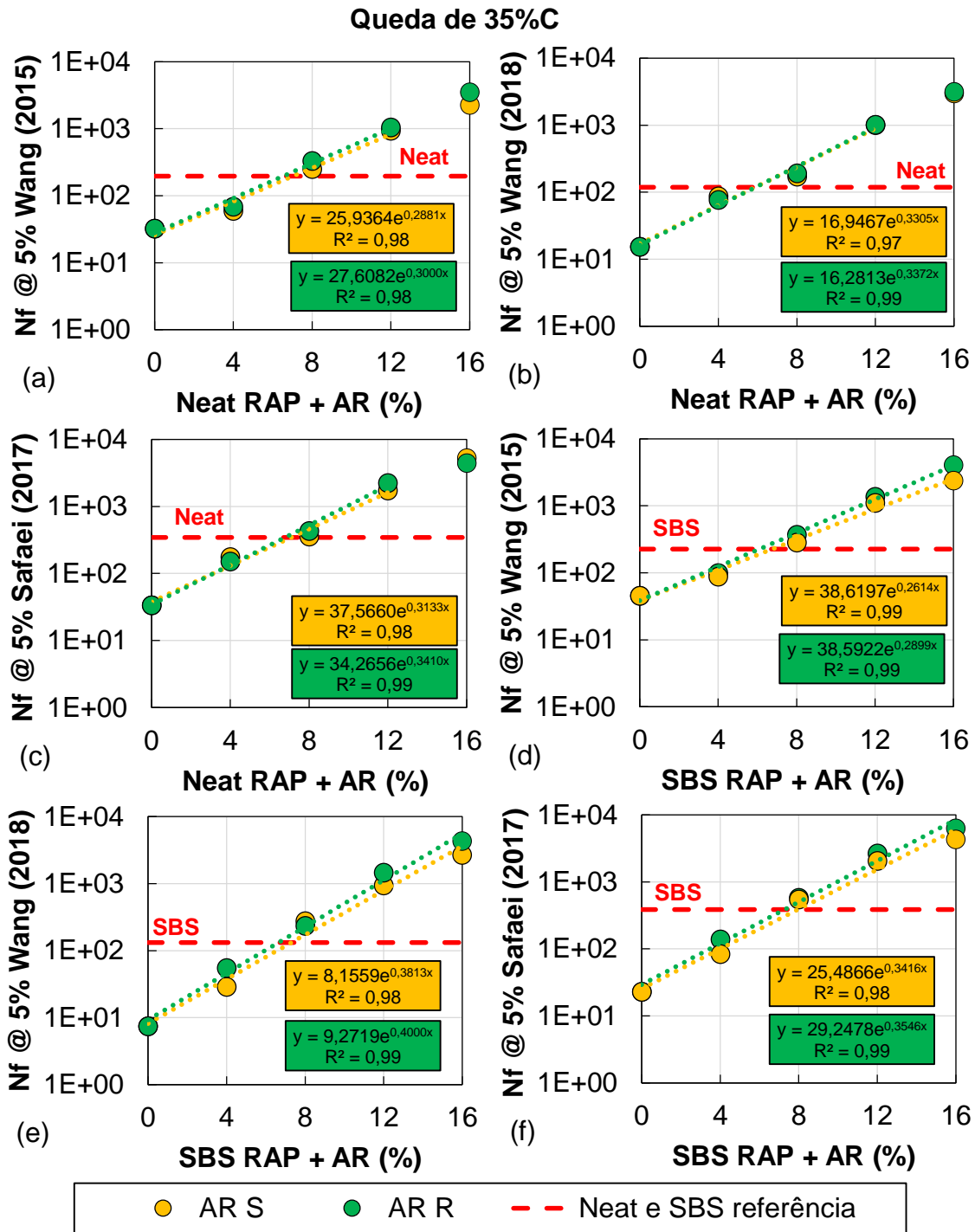


Figura 241 – Vida de fadiga dos ligantes Neat RAP com diferentes concentrações de AR S (a, b, c) e R (d, e, f) determinados com base na definição de falha de pico de C.N e diferentes leis de fadiga

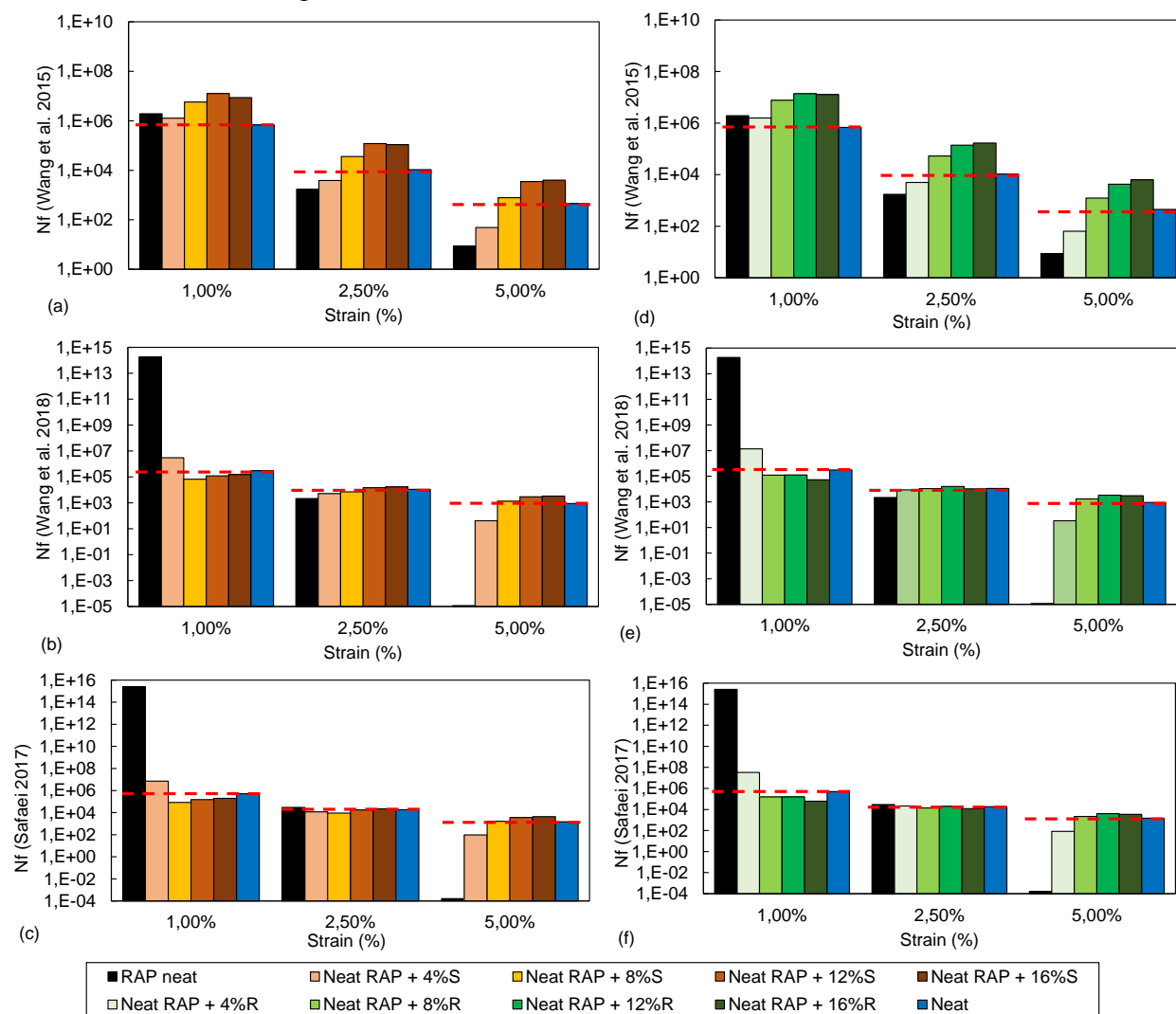


Figura 242 – Vida de fadiga dos ligantes SBS RAP com diferentes concentrações de AR S (a, b, c) e R (d, e, f) determinados com base na definição de falha de pico de C.N e diferentes leis de fadiga

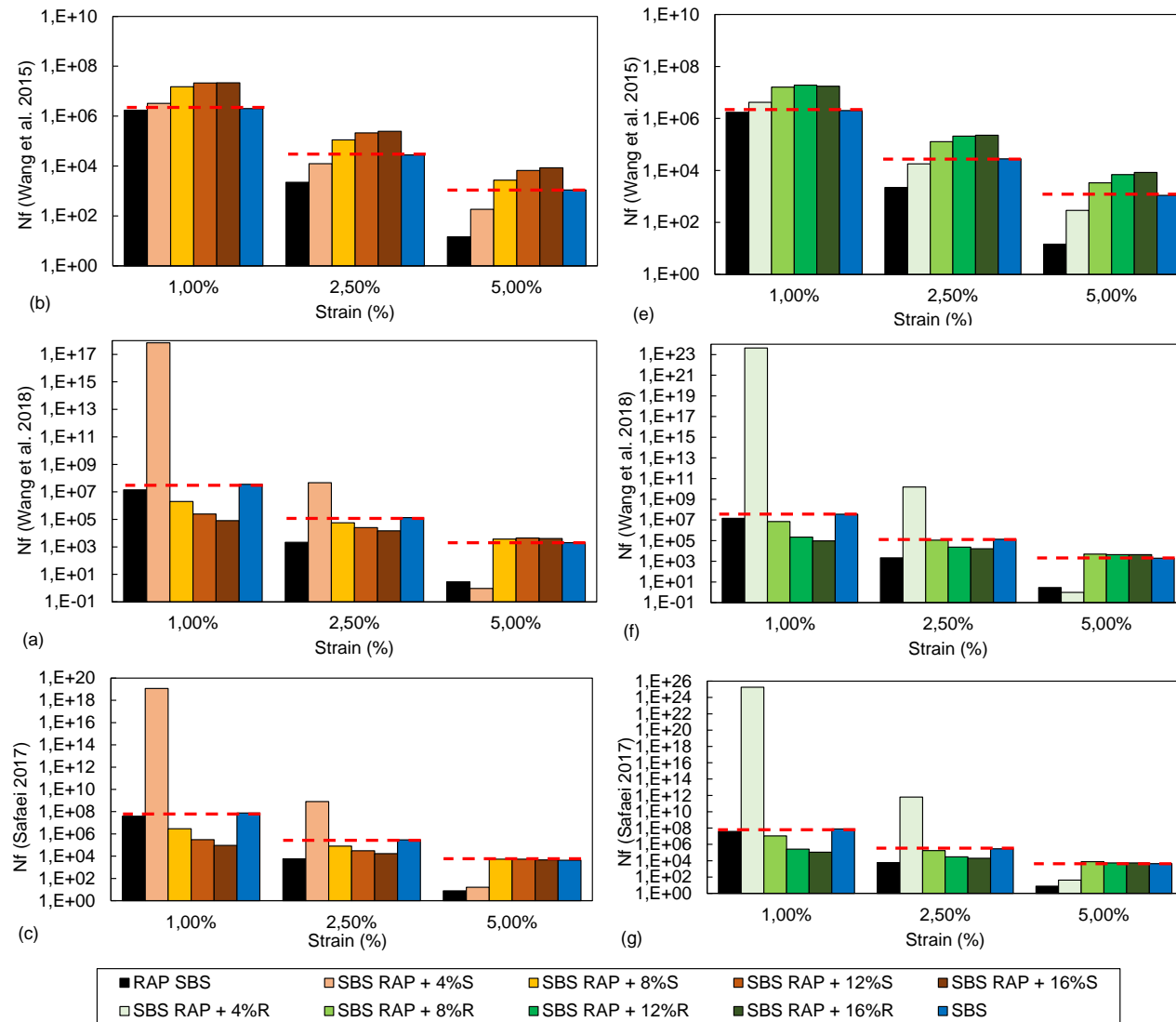


Figura 243 – Gráfico de mistura de Nf (@5%) determinado diferentes leis para previsão de desempenho vs diferentes concentrações de AR S e R com o ligante Neat RAP (a, b, c) e SBS RAP (d, e, f) com base na definição de falha de pico de C.N

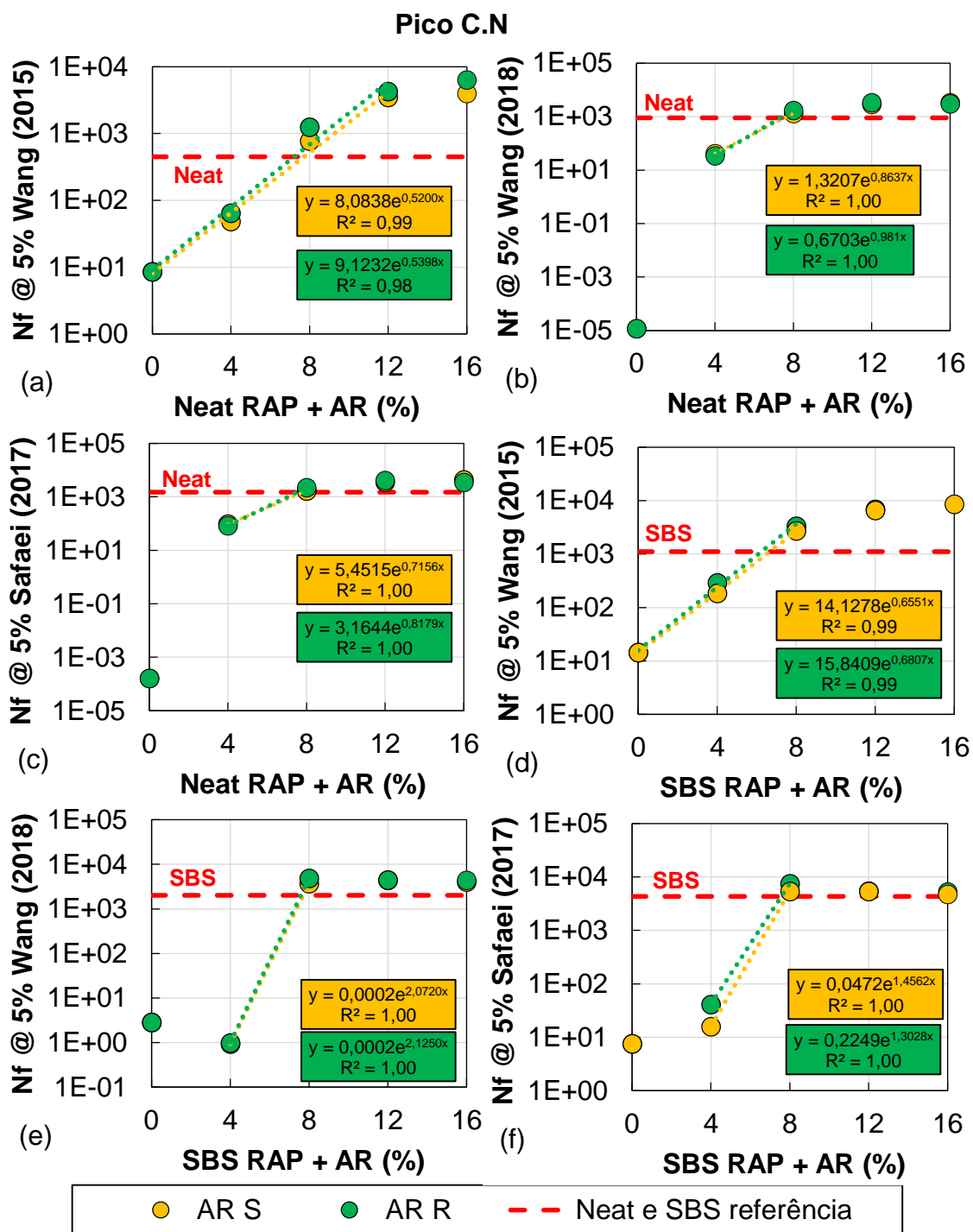


Figura 245 – Vida de fadiga dos ligantes SBS RAP com diferentes concentrações de AR S (a, b, c) e R (d, e, f) determinados com base na definição de falha pico de W_S^R e diferentes leis de fadiga

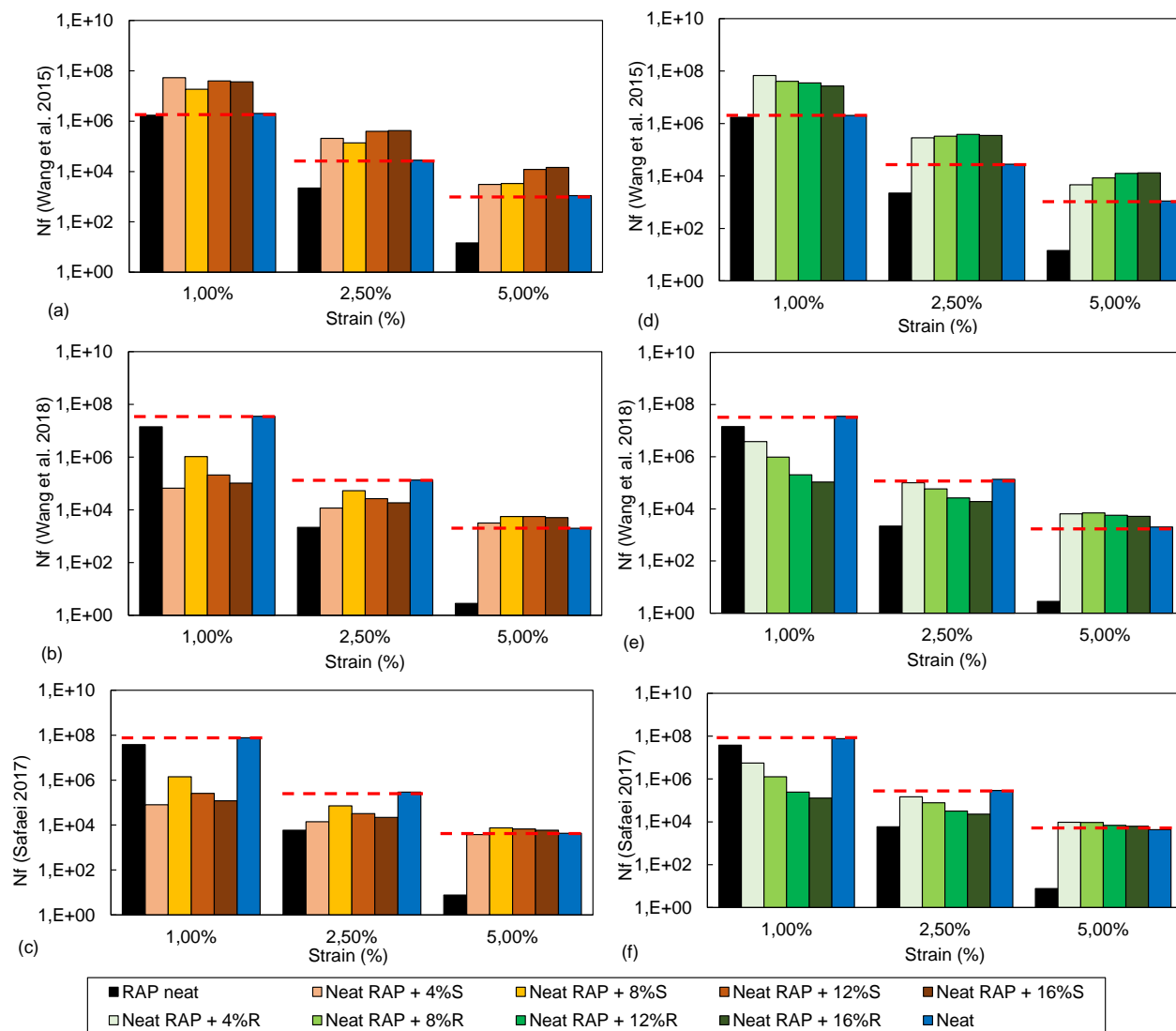


Figura 246 – Gráfico de mistura de Nf (@5%) determinado diferentes leis para previsão de desempenho vs diferentes concentrações de AR S e R com o ligante Neat RAP (a, b, c) e SBS RAP (d, e, f) com base na definição de falha pico de W_S^R

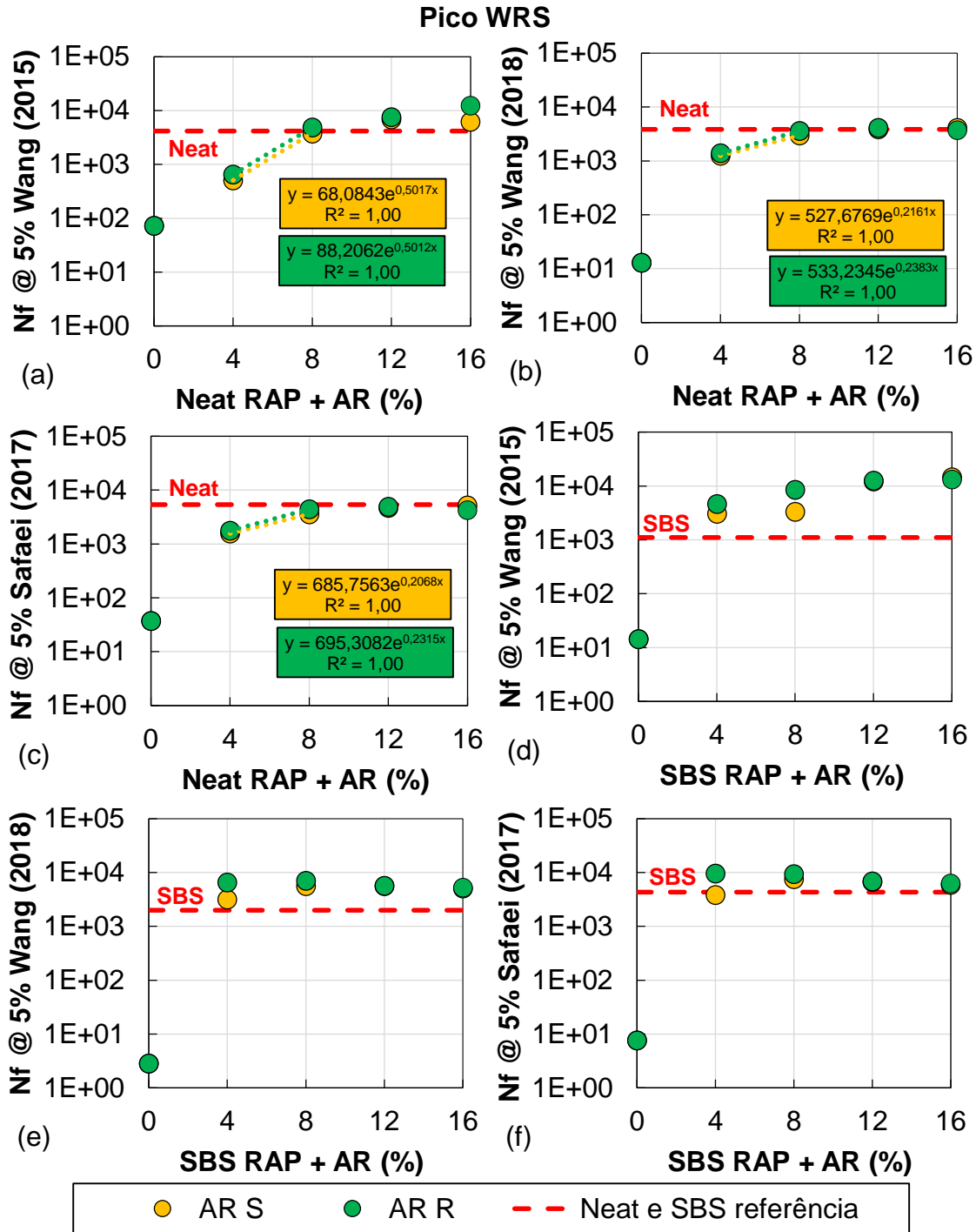


Figura 247 – Vida de fadiga dos ligantes Neat RAP com diferentes concentrações de AR S (a, b, c) e R (d, e, f) determinados com base na definição de falha do pico do δ e diferentes leis de fadiga

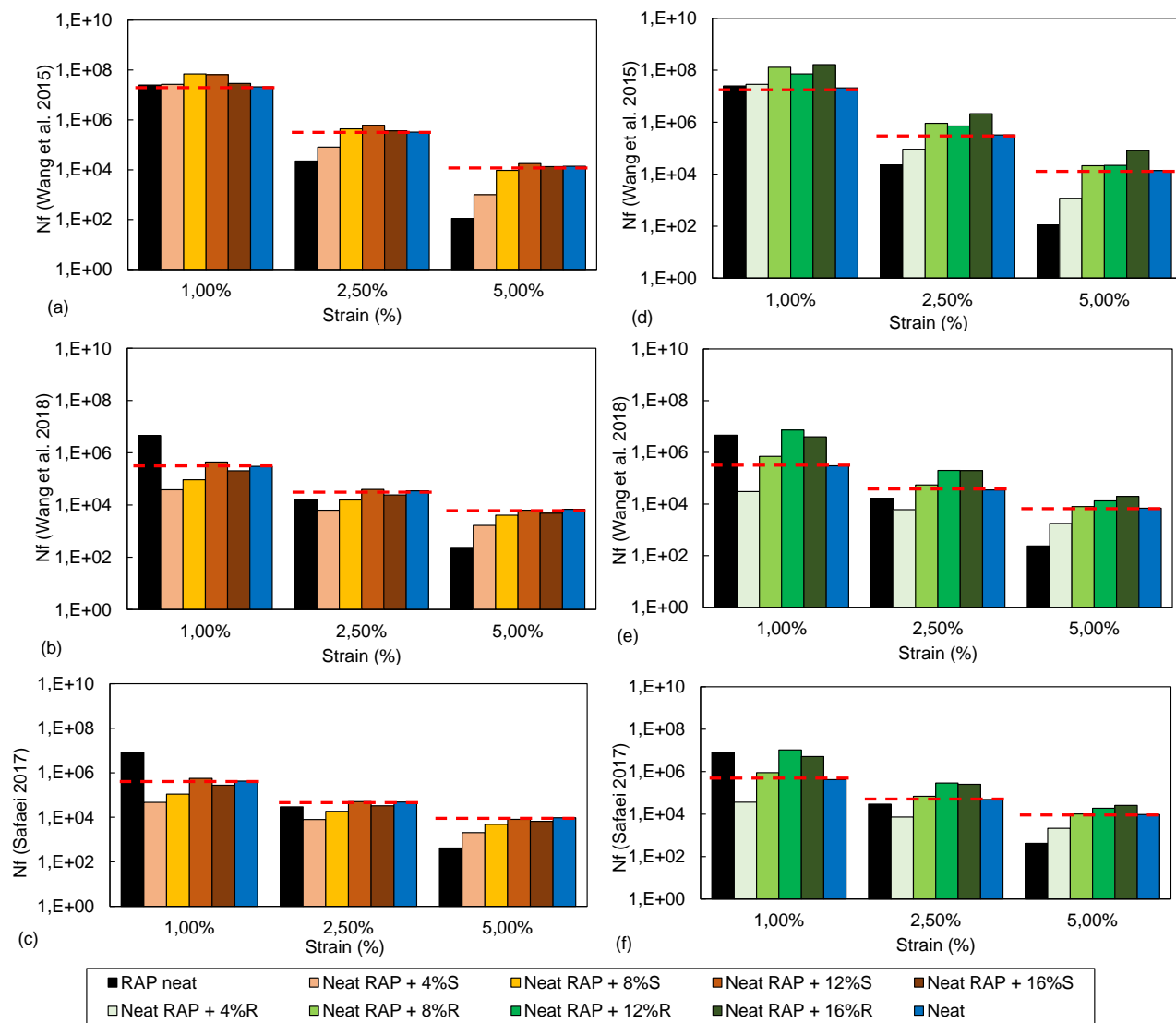


Figura 248 – Vida de fadiga dos ligantes SBS RAP com diferentes concentrações de AR S (a, b, c) e R (d, e, f) determinados com base na definição de falha do pico do δ e diferentes leis de fadiga

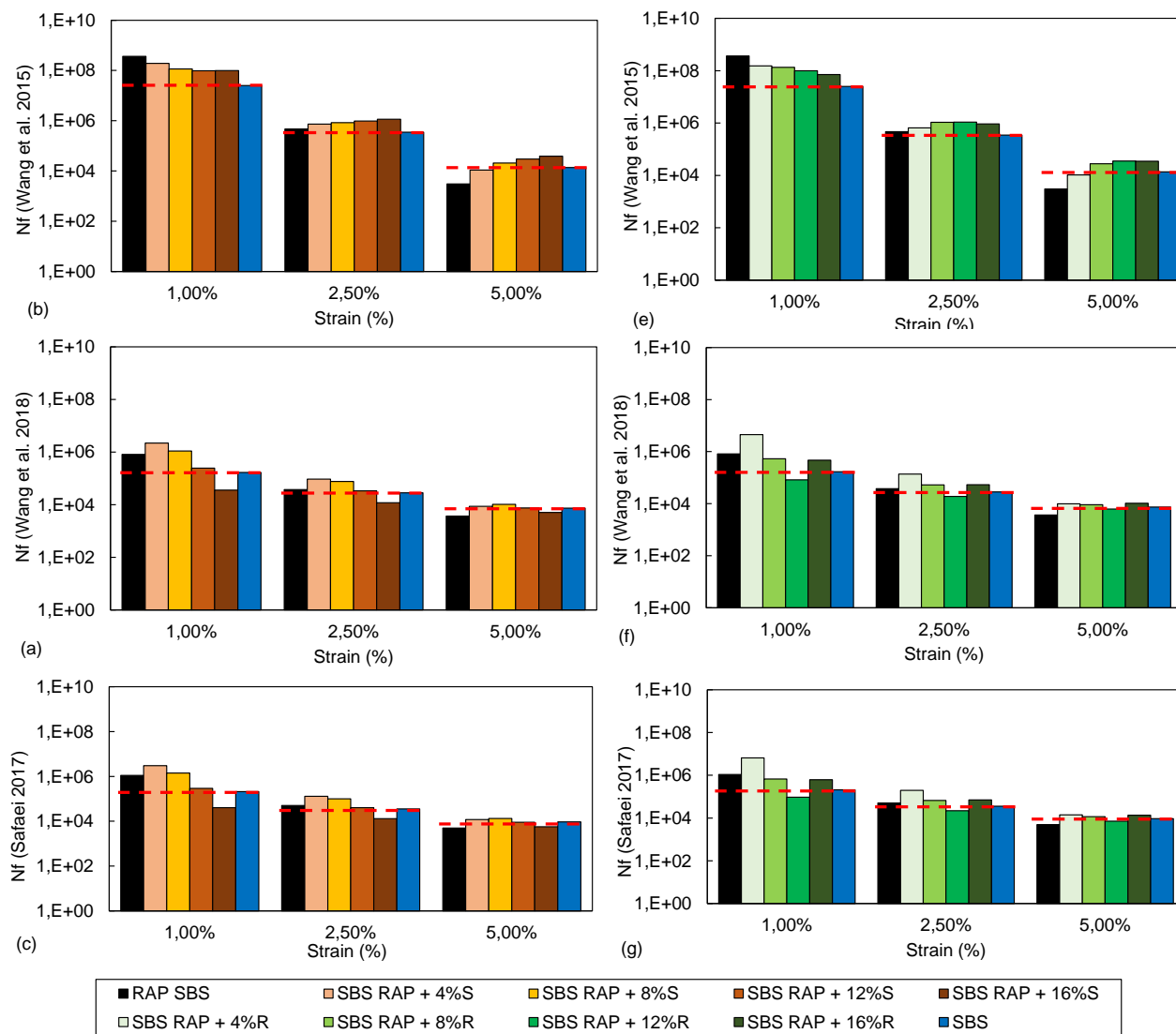


Figura 249 – Gráfico de mistura de Nf (@5%) determinado diferentes leis para previsão de desempenho vs diferentes concentrações de AR S e R com o ligante Neat RAP (a, b, c) e SBS RAP (d, e, f) com base na definição de falha do pico do δ

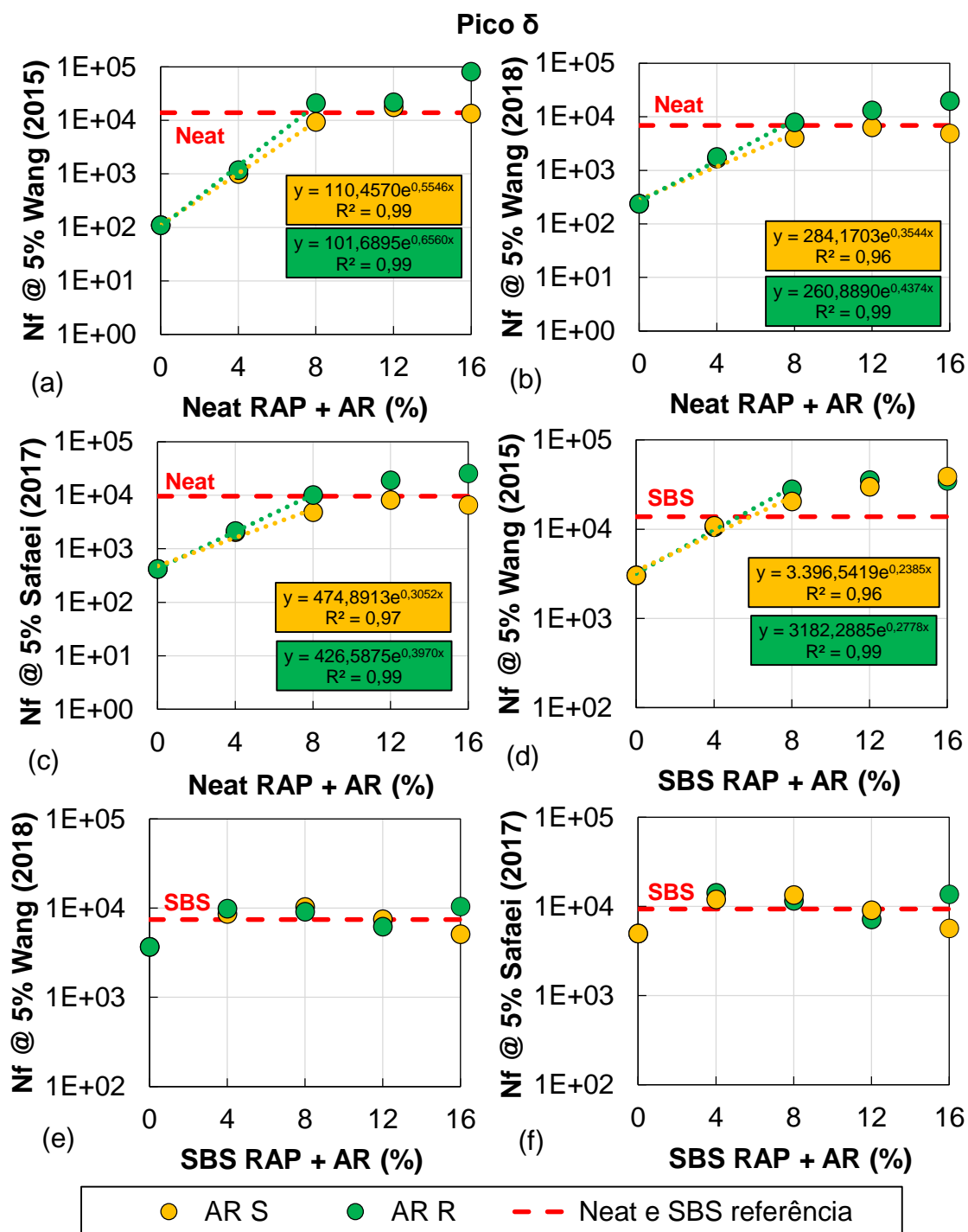


Figura 250 – Vida de fadiga dos ligantes Neat RAP com diferentes concentrações de AR S (a, b, c) e R (d, e, f) determinados com base na definição de falha do $C^2.N.(1-C)$ e diferentes leis de fadiga

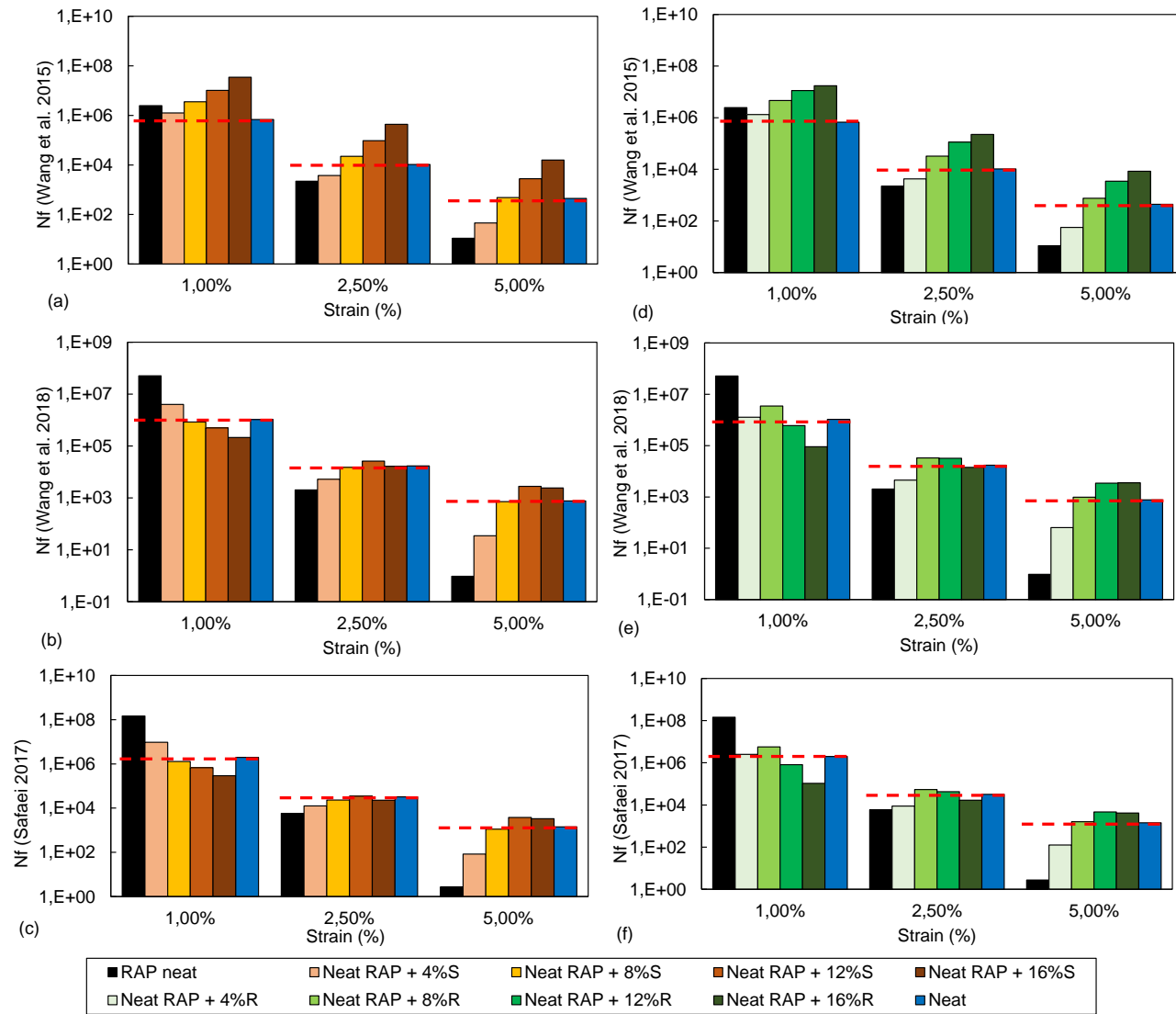


Figura 251 – Vida de fadiga dos ligantes SBS RAP com diferentes concentrações de AR S (a, b, c) e R (d, e, f) determinados com base na definição de falha do $C^2.N.(1-C)$ e diferentes leis de fadiga

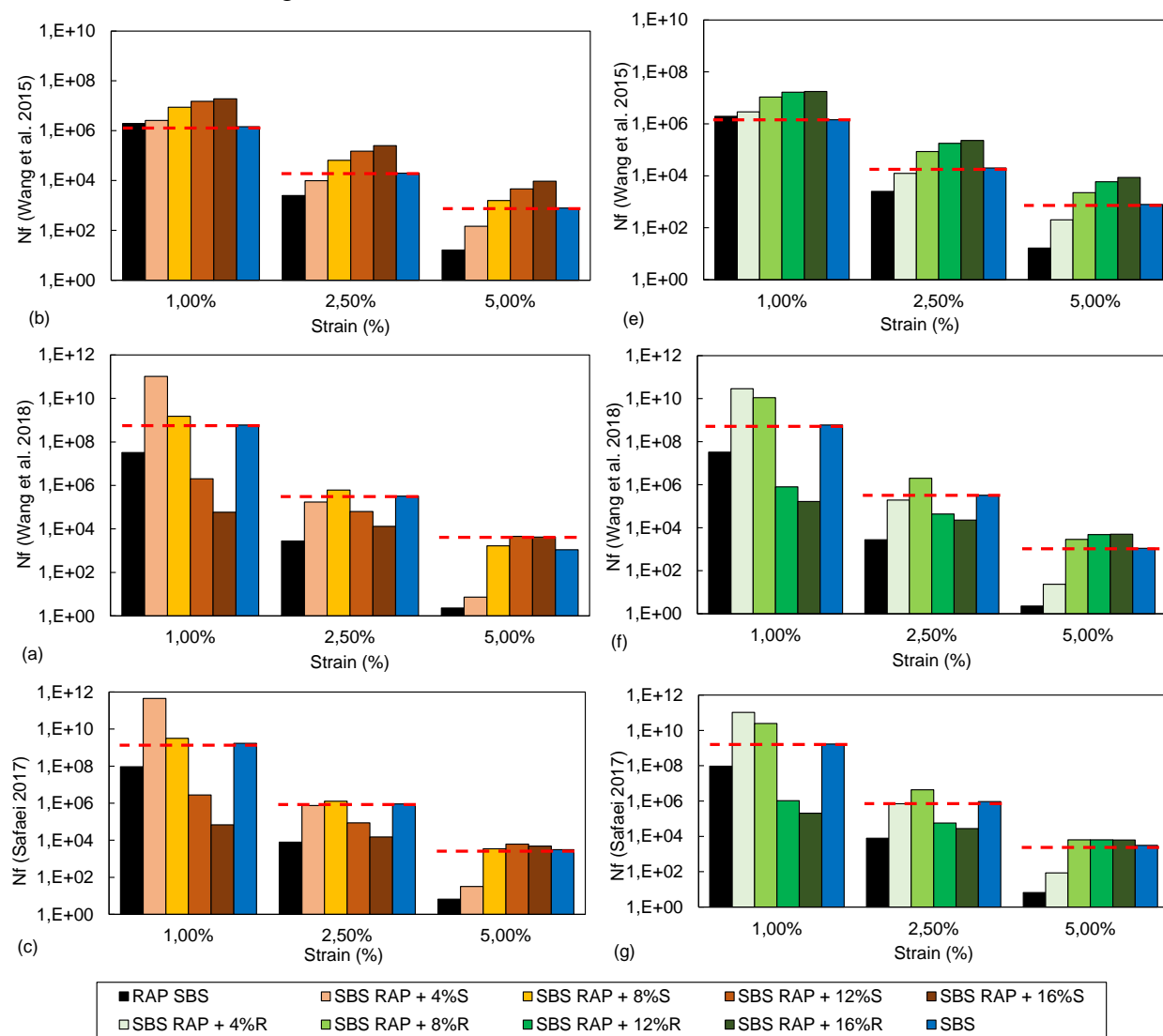
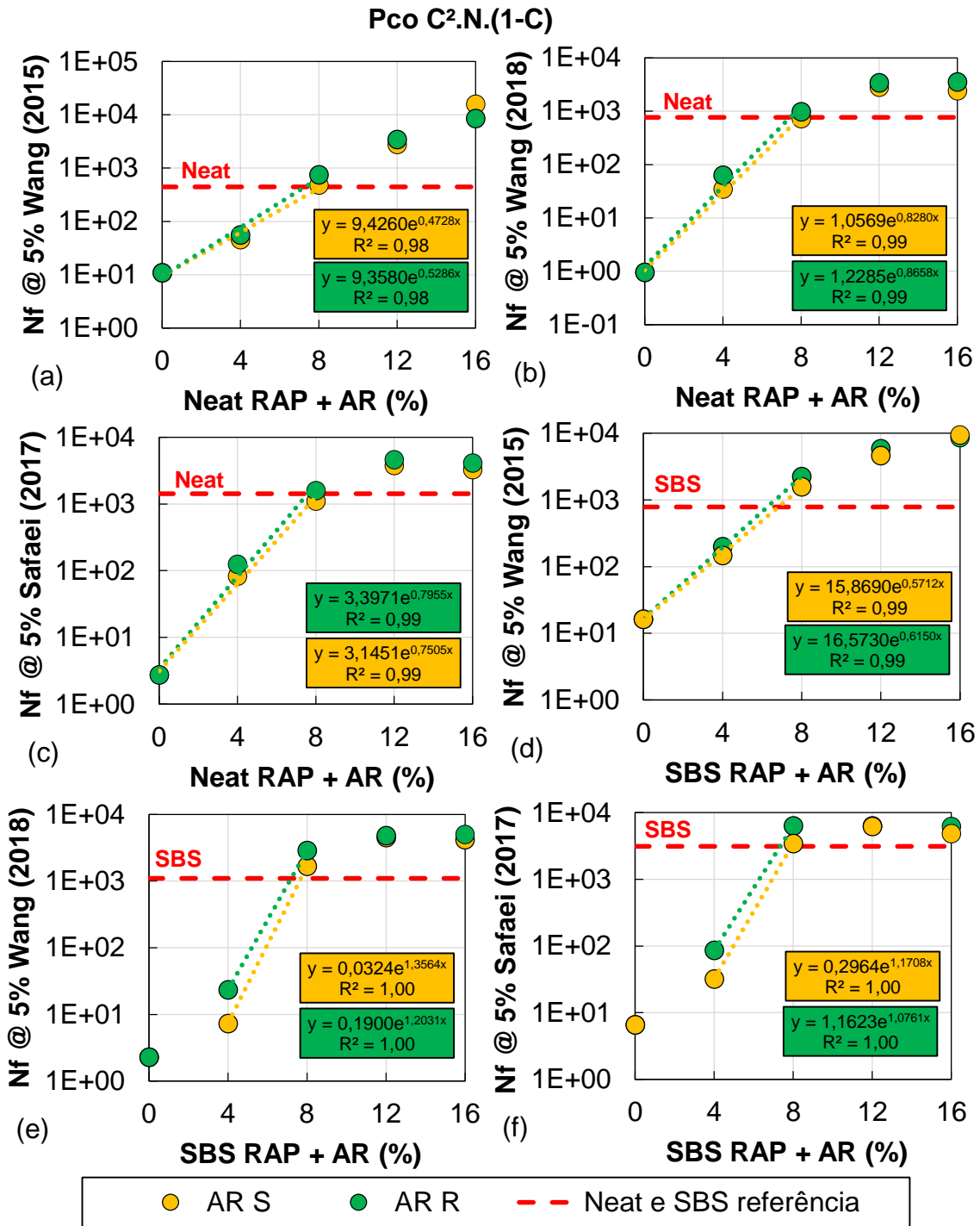


Figura 252 – Gráfico de mistura de Nf (@5%) determinado diferentes leis para previsão de desempenho vs diferentes concentrações de AR S e R com o ligante Neat RAP (a, b, c) e SBS RAP (d, e, f) com base na definição de falha C².N.(1-C)



Apêndice G – Gráficos de contorno aos 1, 6, 24, 90, 180 e 300 meses para as misturas com base no G^R e D^R .

Figura 253 – Gráficos de contorno aos 1, 6, 24, 90, 180 e 300 meses da mistura Neat RAP determinados com base no G^R

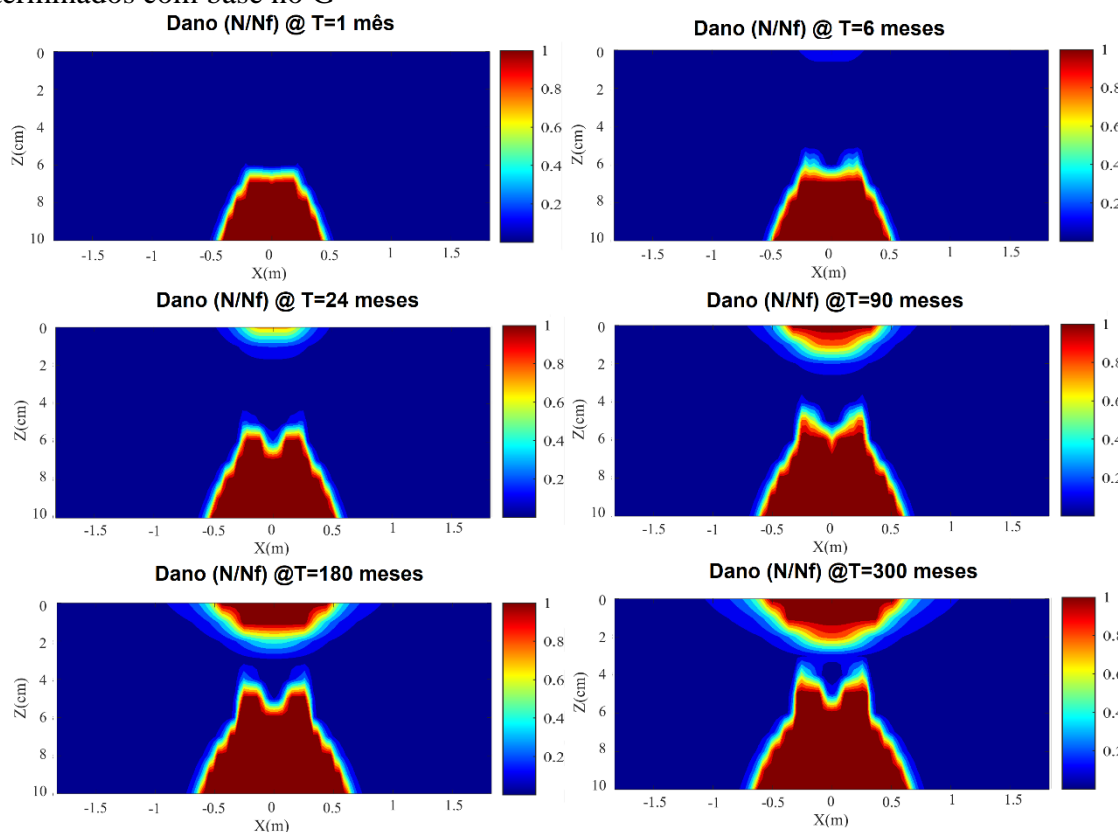


Figura 254 – Gráficos de contorno aos 1, 6, 24, 90, 180 e 300 meses da mistura Neat RAP +8%R determinados com base no G^R

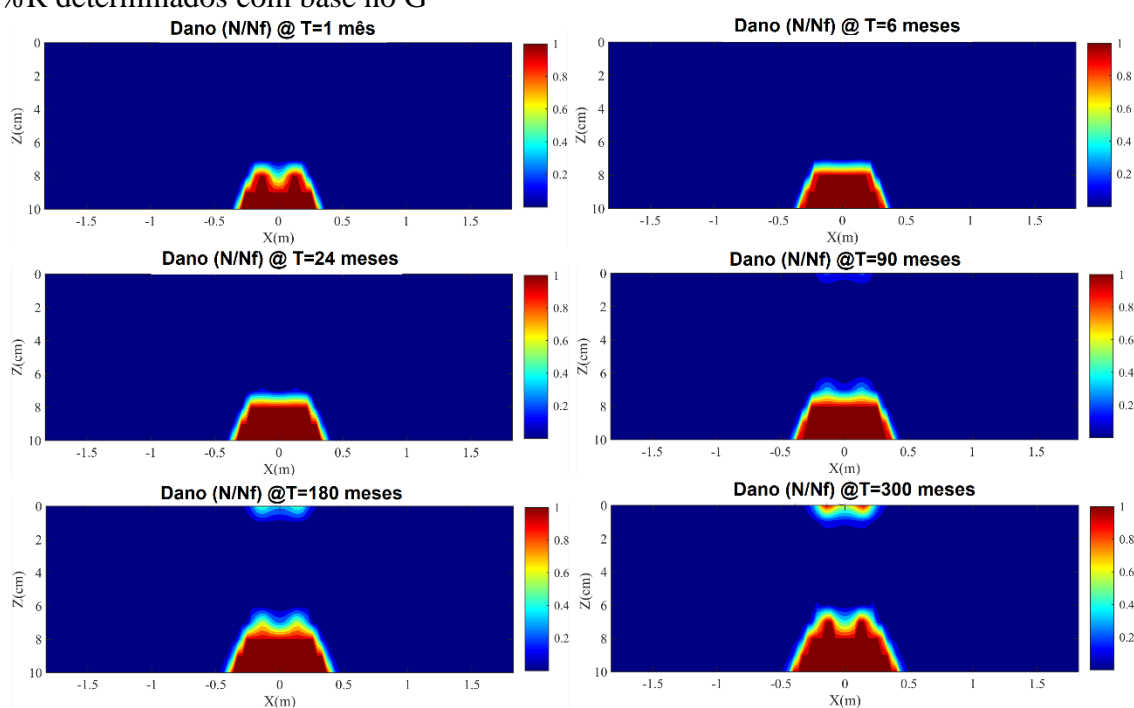


Figura 255 – Gráficos de contorno aos 1, 6, 24, 90, 180 e 300 meses da mistura Neat RAP +12%R determinados com base no G^R

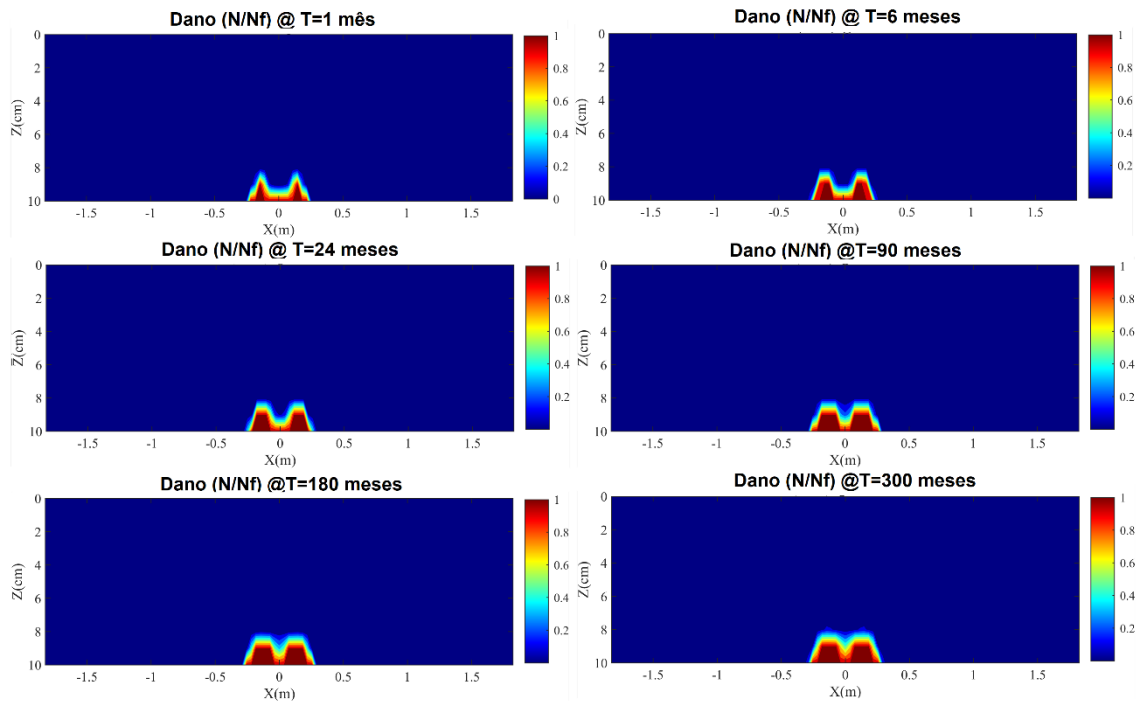


Figura 256 – Gráficos de contorno aos 1, 6, 24, 90, 180 e 300 meses da mistura Neat RAP +16%R determinados com base no G^R

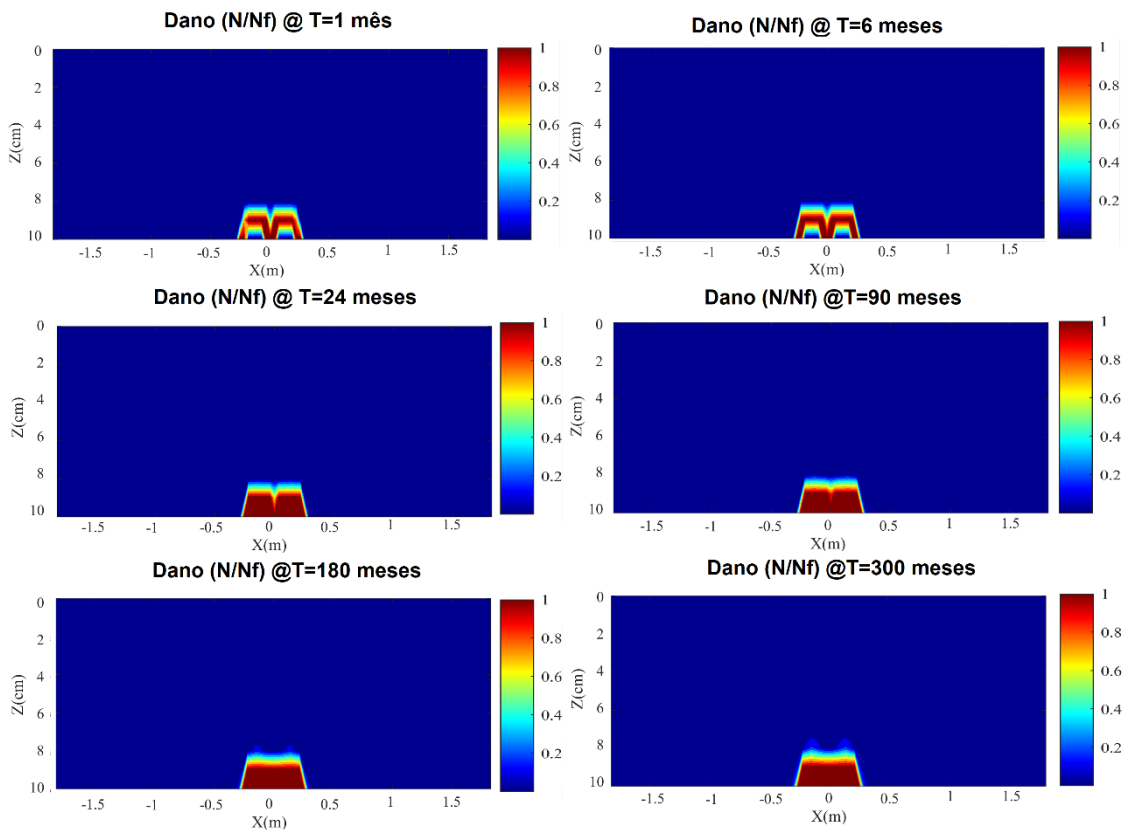


Figura 257 – Gráficos de contorno aos 1, 6, 24, 90, 180 e 300 meses da mistura Neat RAP + 8%R + 1%HiMA determinados com base no G^R

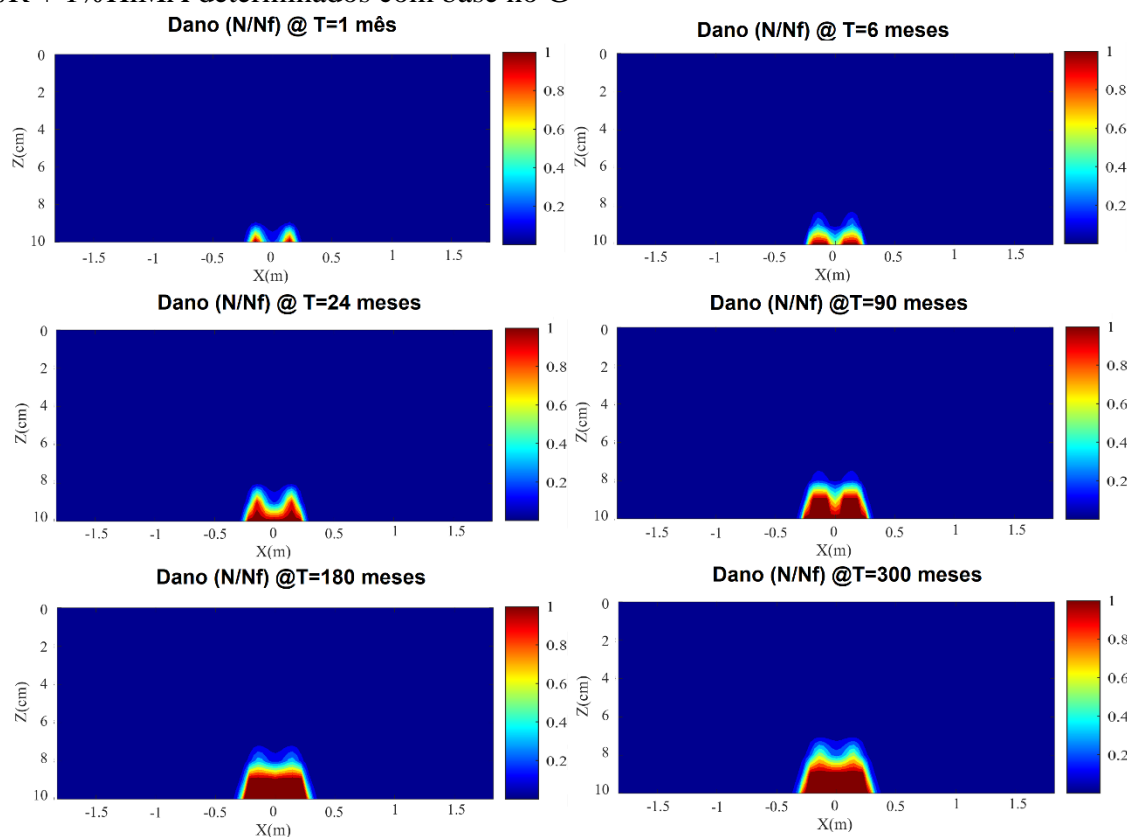


Figura 258 – Gráficos de contorno aos 1, 6, 24, 90, 180 e 300 meses da mistura Neat REF determinados com base no G^R

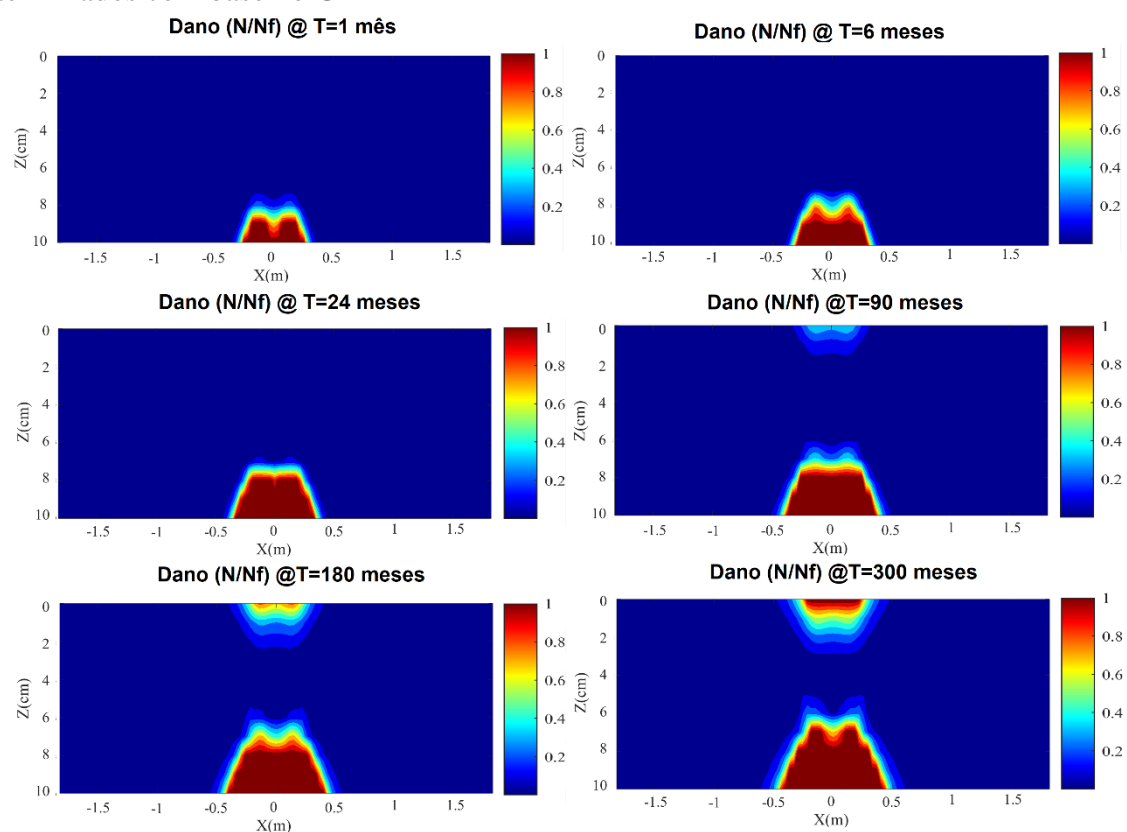


Figura 259 – Gráficos de contorno aos 1, 6, 24, 90, 180 e 300 meses da mistura SBS RAP determinados com base no G^R

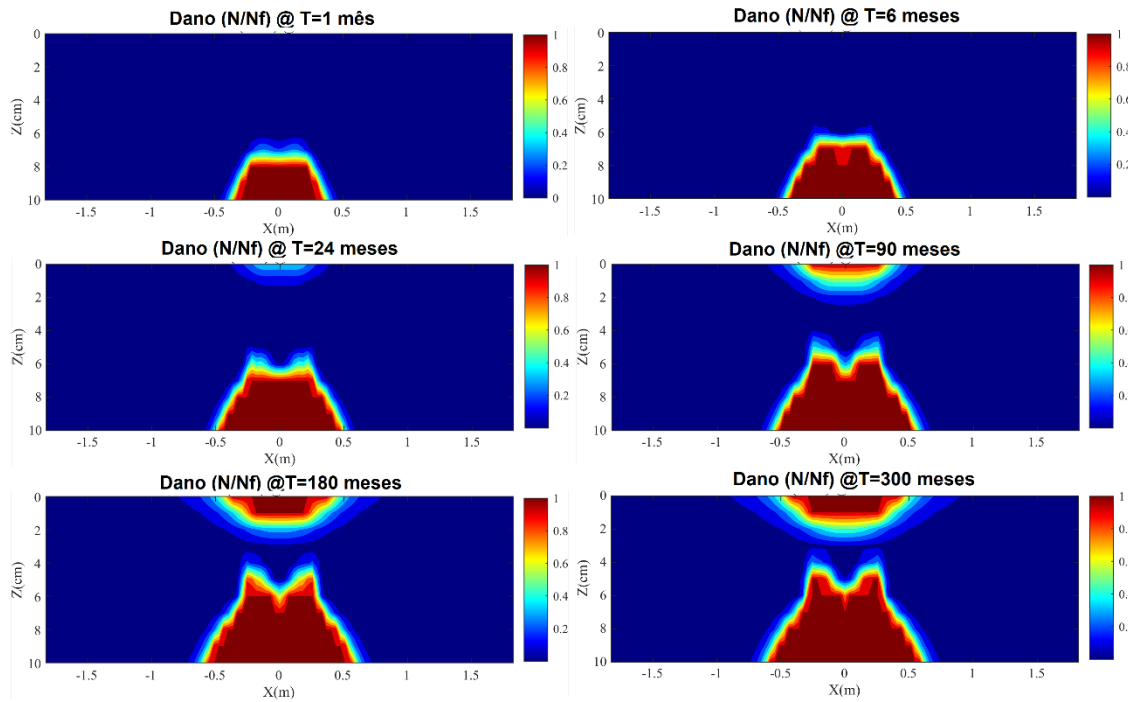


Figura 260 – Gráficos de contorno aos 1, 6, 24, 90, 180 e 300 meses da mistura SBS RAP + 8%R determinados com base no G^R

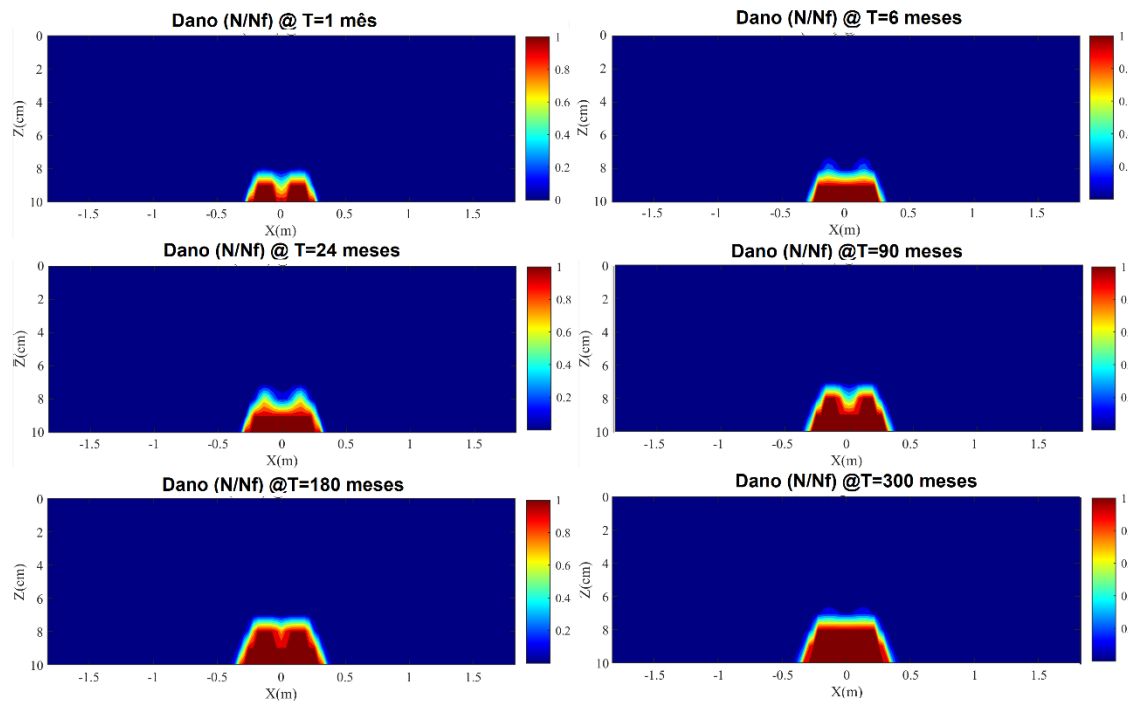


Figura 261 – Gráficos de contorno aos 1, 6, 24, 90, 180 e 300 meses da mistura SBS RAP + 12%R determinados com base no G^R

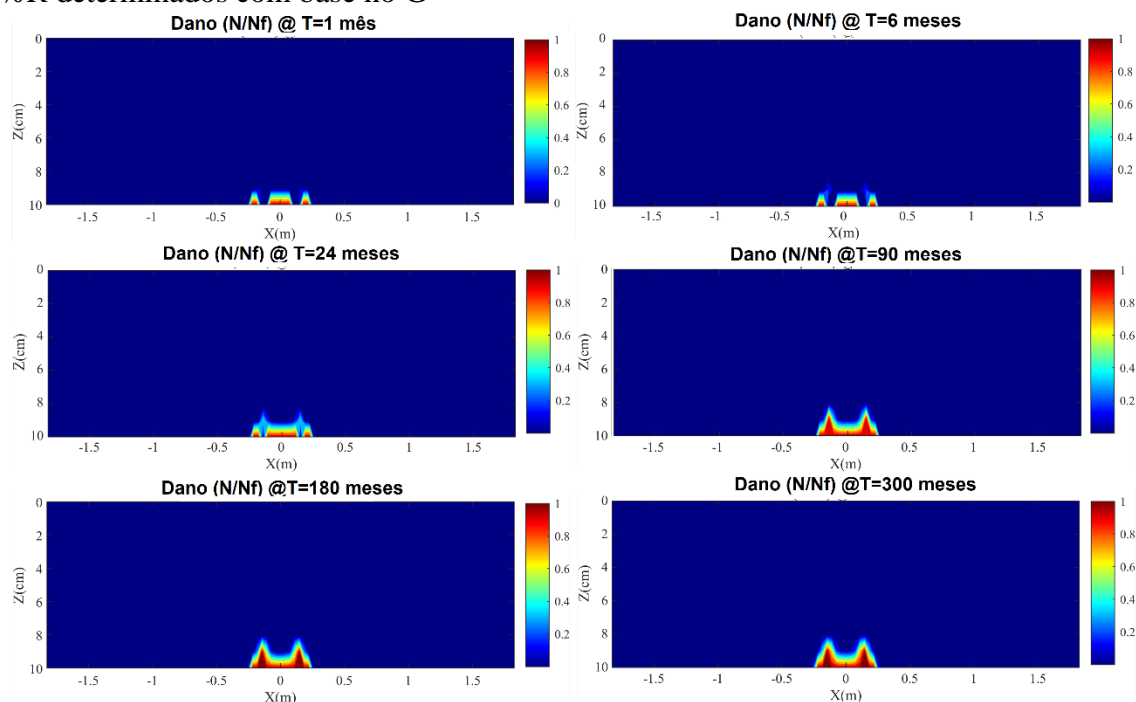


Figura 262 – Gráficos de contorno aos 1, 6, 24, 90, 180 e 300 meses da mistura SBS RAP + 16%R determinados com base no G^R

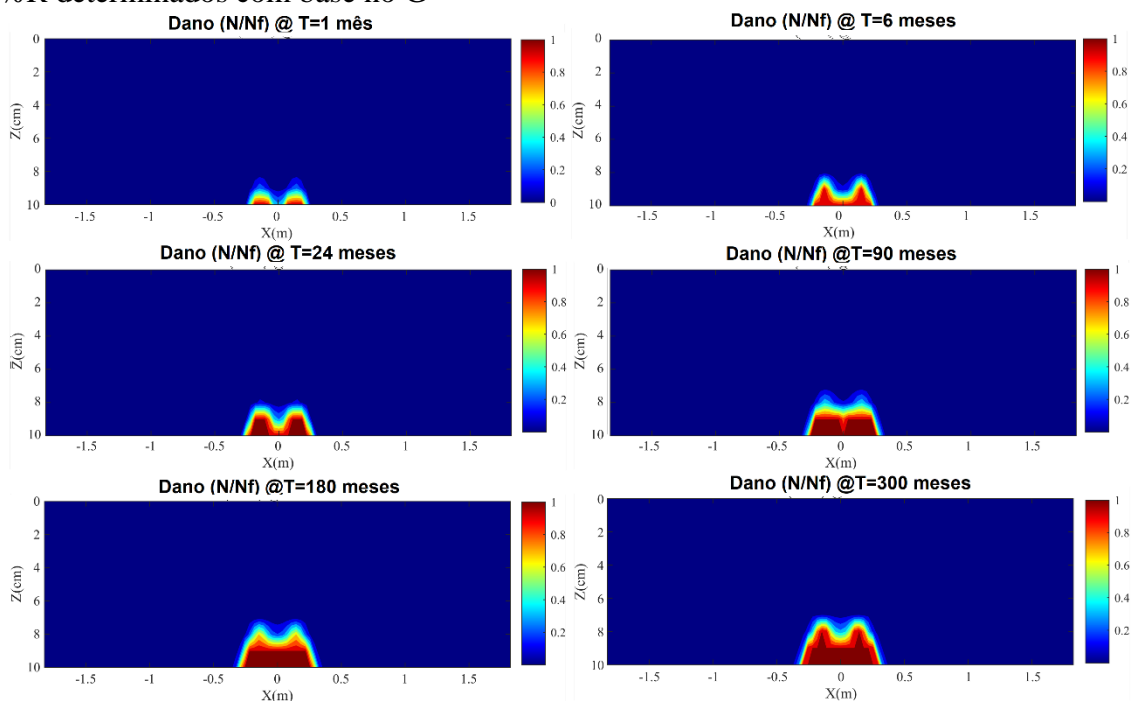


Figura 263 – Gráficos de contorno aos 1, 6, 24, 90, 180 e 300 meses da mistura SBS RAP + 8%R + 1%HiMA determinados com base no G^R

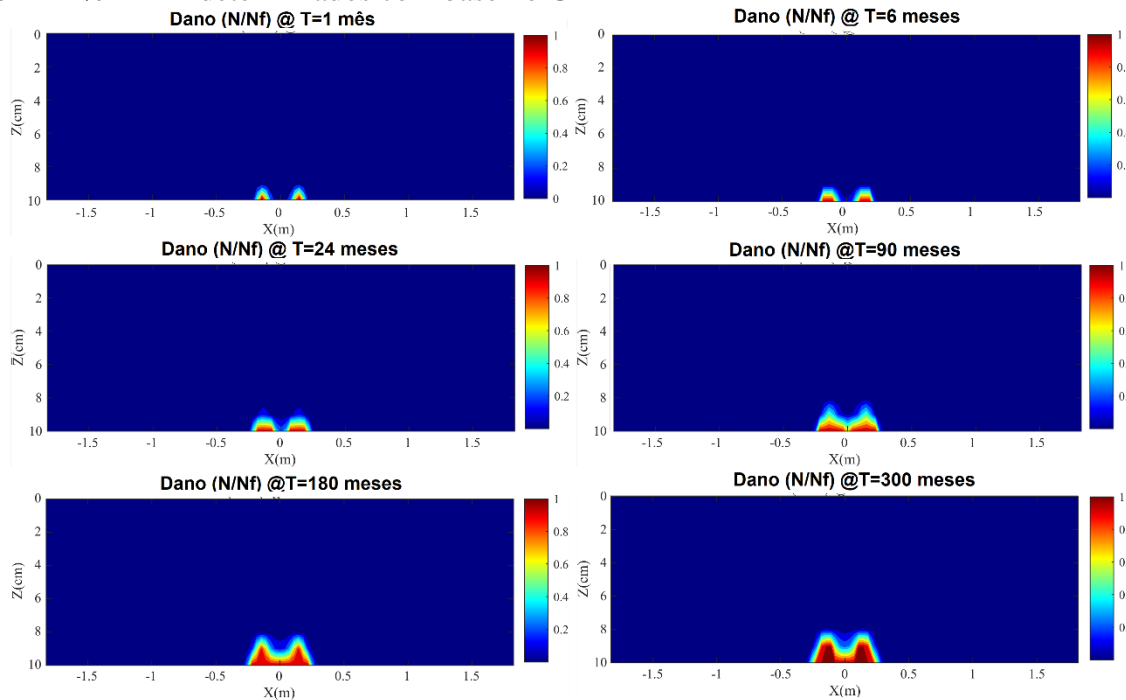


Figura 264 – Gráficos de contorno aos 1, 6, 24, 90, 180 e 300 meses da mistura SBS REF determinados com base no G^R

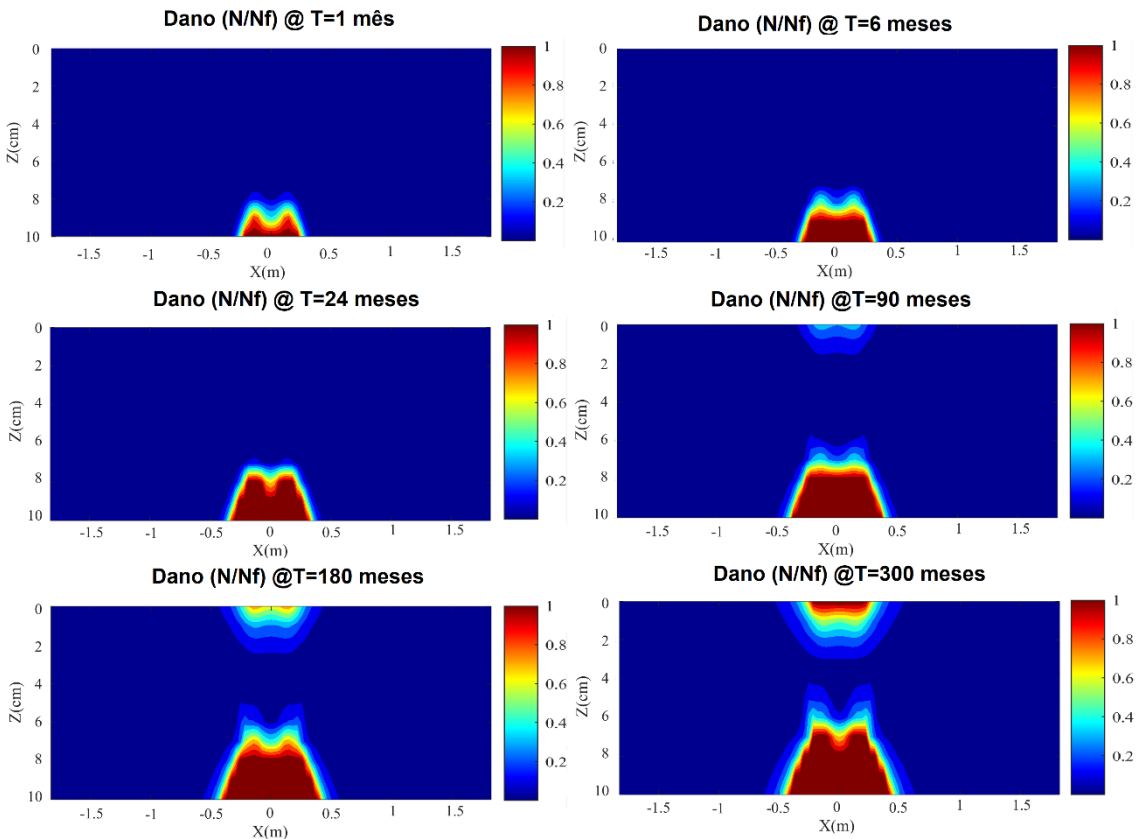


Figura 265 – Gráficos de contorno aos 1, 6, 24, 90, 180 e 300 meses da mistura Neat RAP determinados com base no D^R

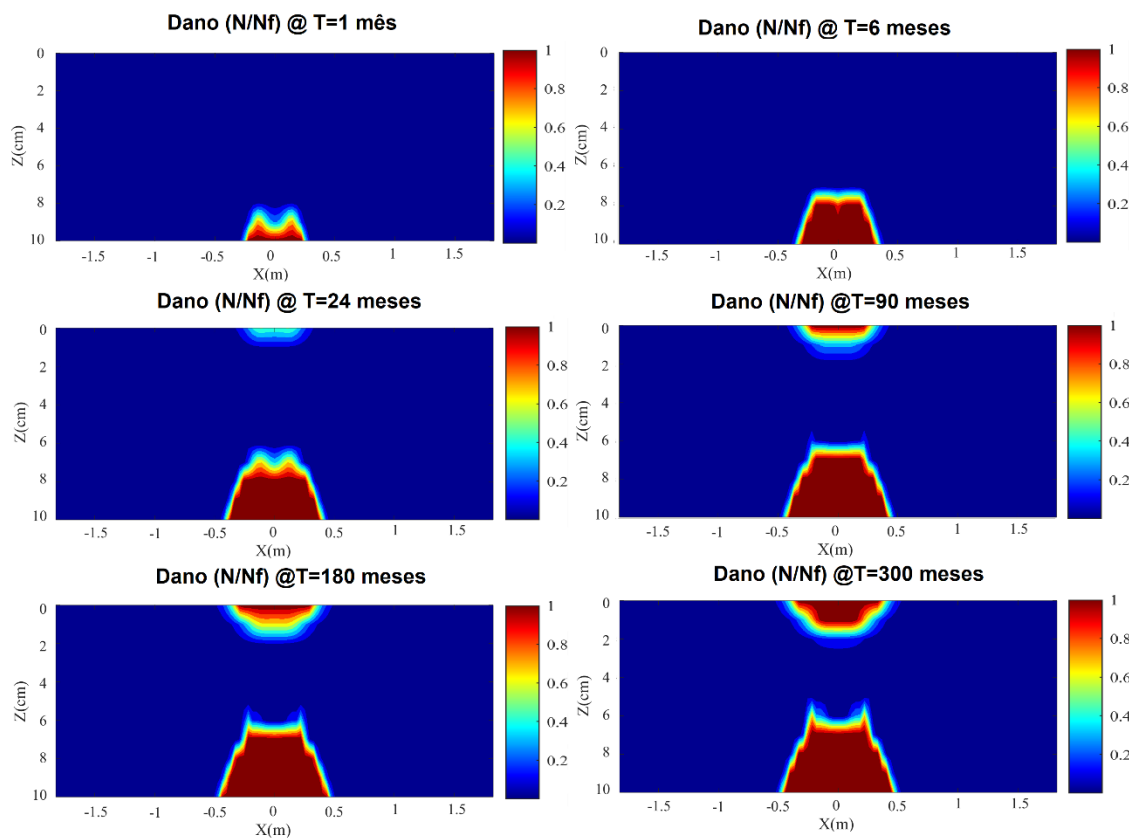


Figura 266 – Gráficos de contorno aos 1, 6, 24, 90, 180 e 300 meses da mistura Neat RAP + 8%R determinados com base no D^R

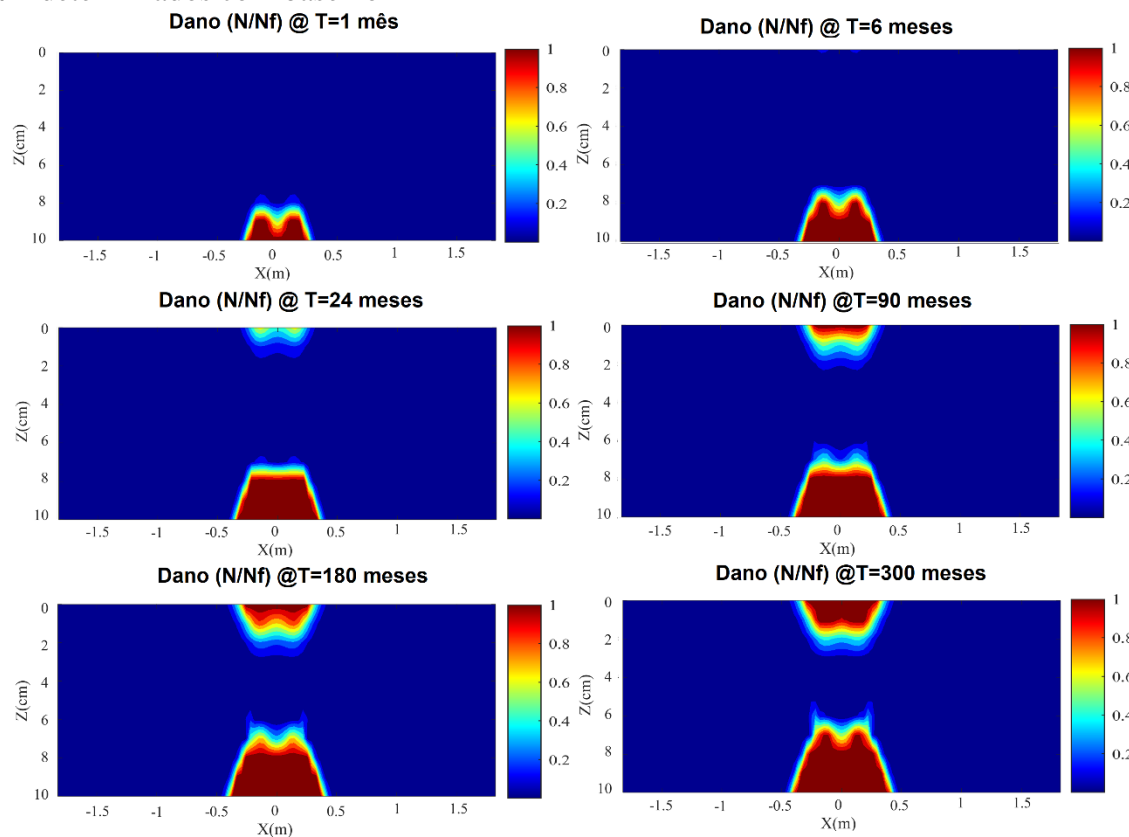


Figura 267 – Gráficos de contorno aos 1, 6, 24, 90, 180 e 300 meses da mistura Neat RAP + 12%R determinados com base no D^R

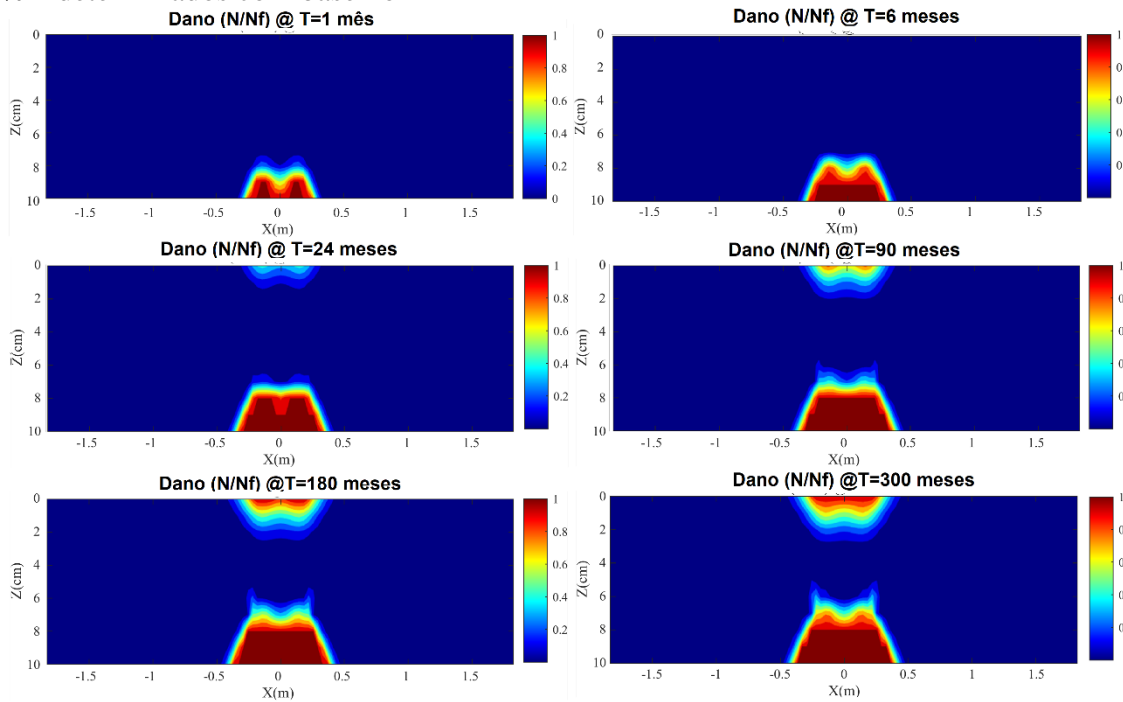


Figura 268 – Gráficos de contorno aos 1, 6, 24, 90, 180 e 300 meses da mistura Neat RAP + 16%R determinados com base no D^R

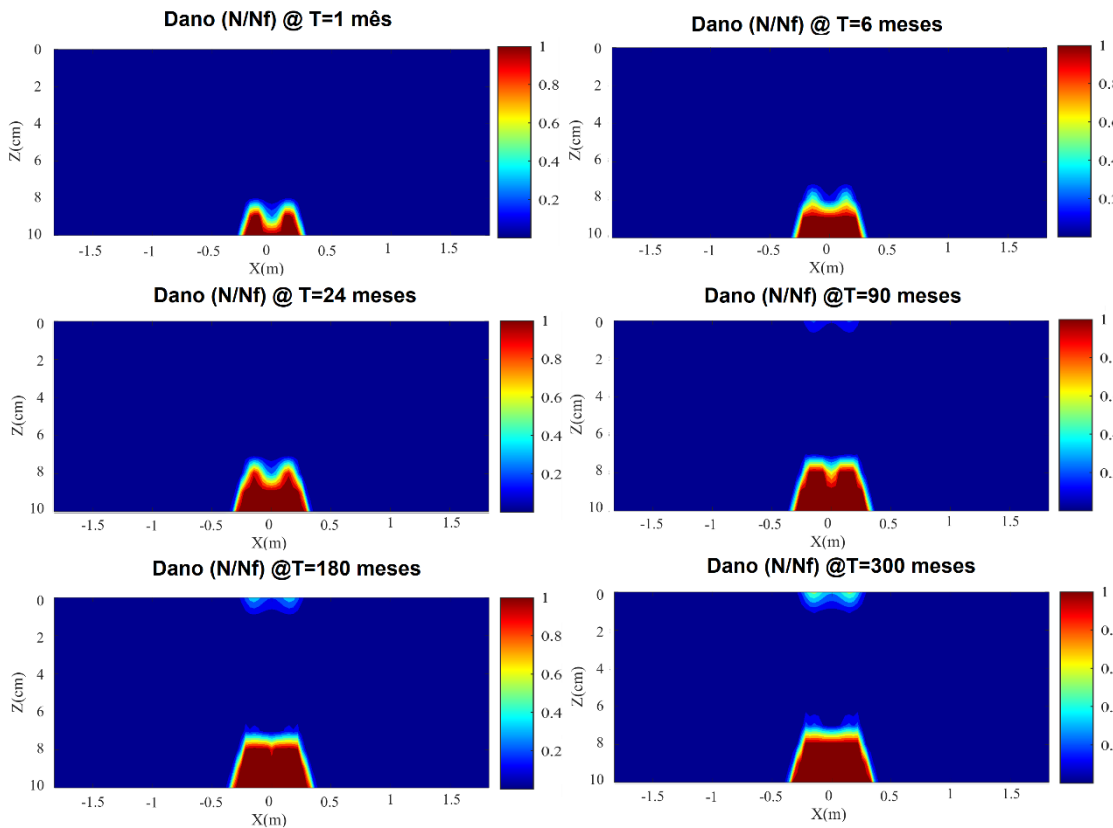


Figura 269 – Gráficos de contorno aos 1, 6, 24, 90, 180 e 300 meses da mistura Neat RAP + 8%R + 1%HiMA determinados com base no D^R

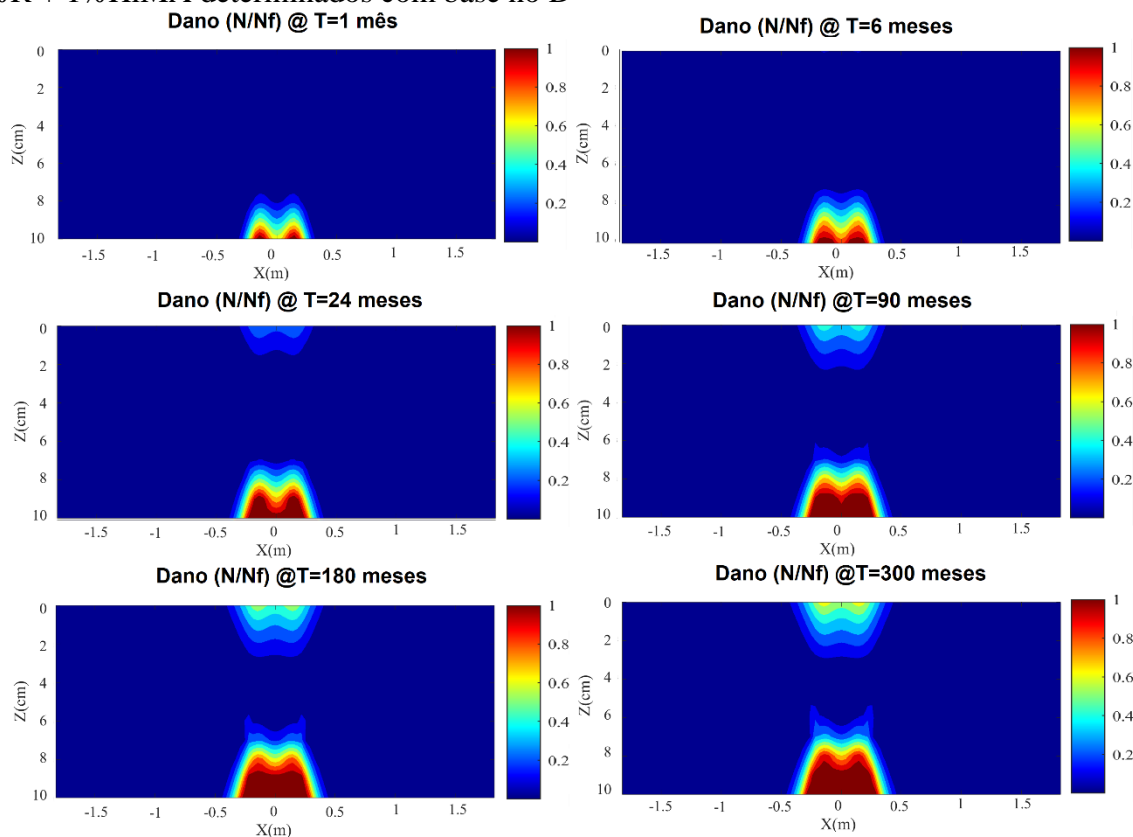


Figura 270 – Gráficos de contorno aos 1, 6, 24, 90, 180 e 300 meses da mistura Neat REF determinados com base no D^R

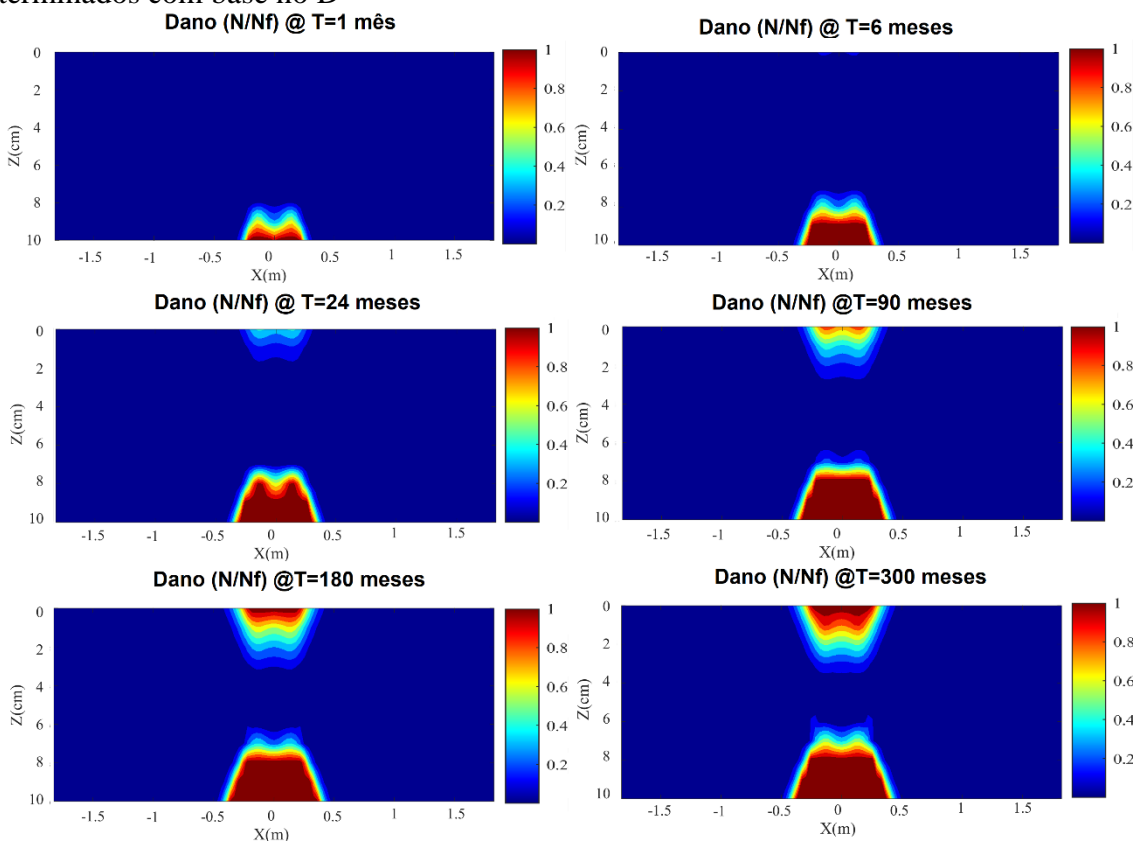


Figura 271 – Gráficos de contorno aos 1, 6, 24, 90, 180 e 300 meses da mistura SBS RAP determinados com base no D^R

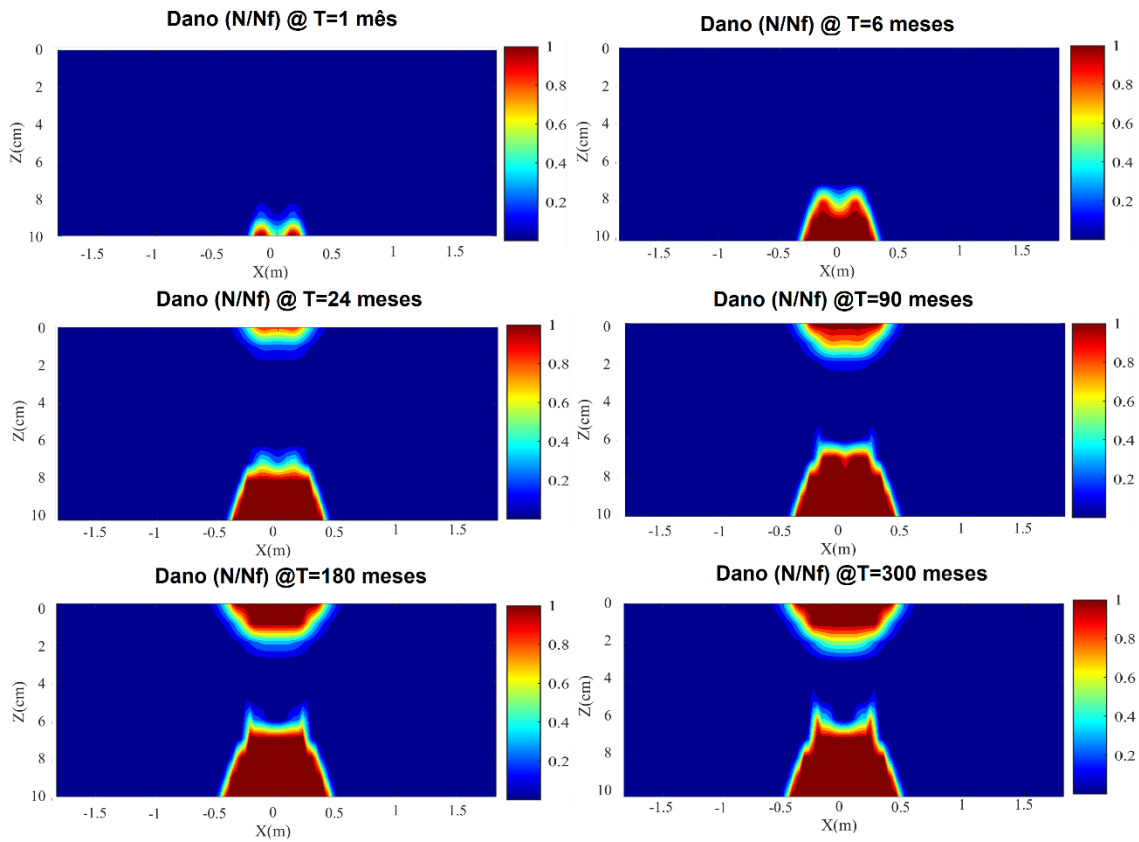


Figura 272 – Gráficos de contorno aos 1, 6, 24, 90, 180 e 300 meses da mistura SBS RAP + 8%R determinados com base no D^R

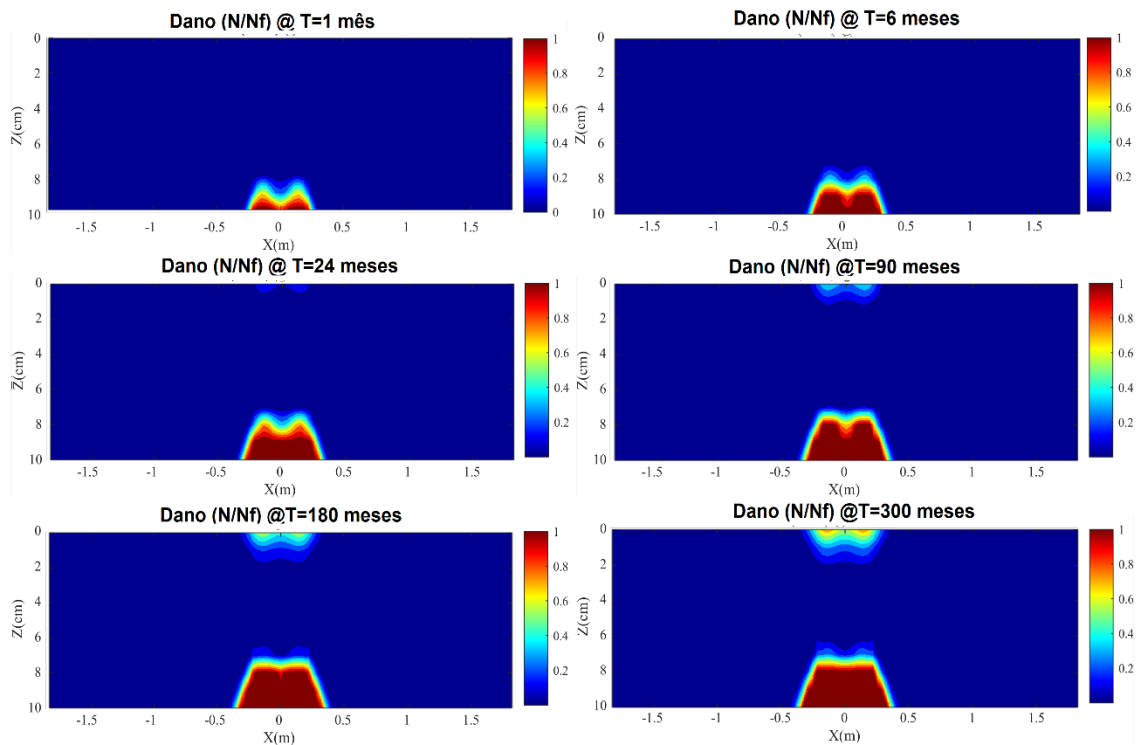


Figura 273 – Gráficos de contorno aos 1, 6, 24, 90, 180 e 300 meses da mistura SBS RAP + 12%R determinados com base no D^R

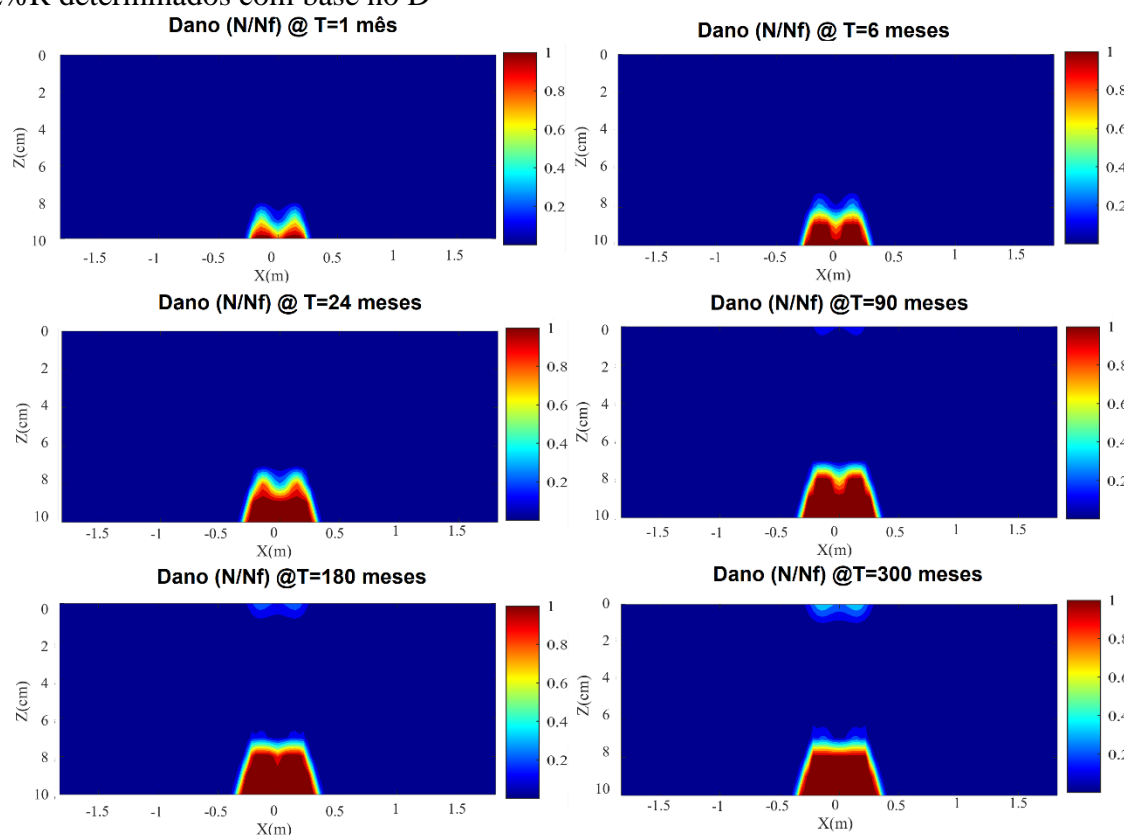


Figura 274 – Gráficos de contorno aos 1, 6, 24, 90, 180 e 300 meses da mistura SBS RAP + 16%R determinados com base no D^R

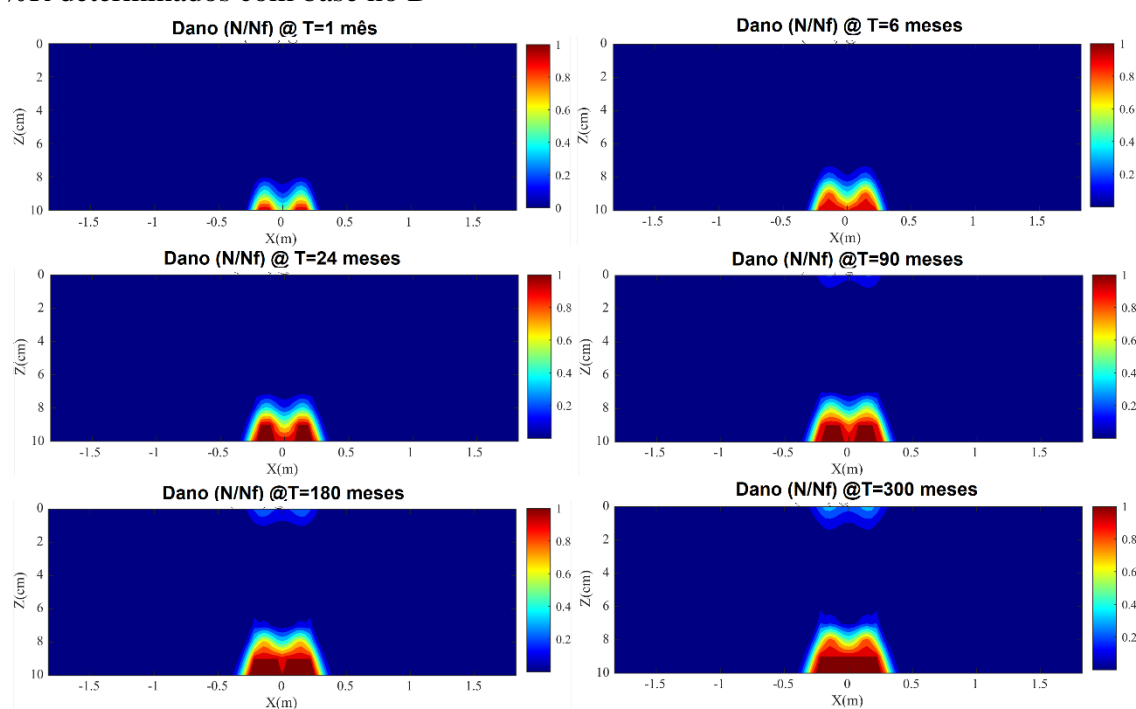


Figura 275 – Gráficos de contorno aos 1, 6, 24, 90, 180 e 300 meses da mistura SBS RAP + 8%R + 1%HiMA determinados com base no D^R

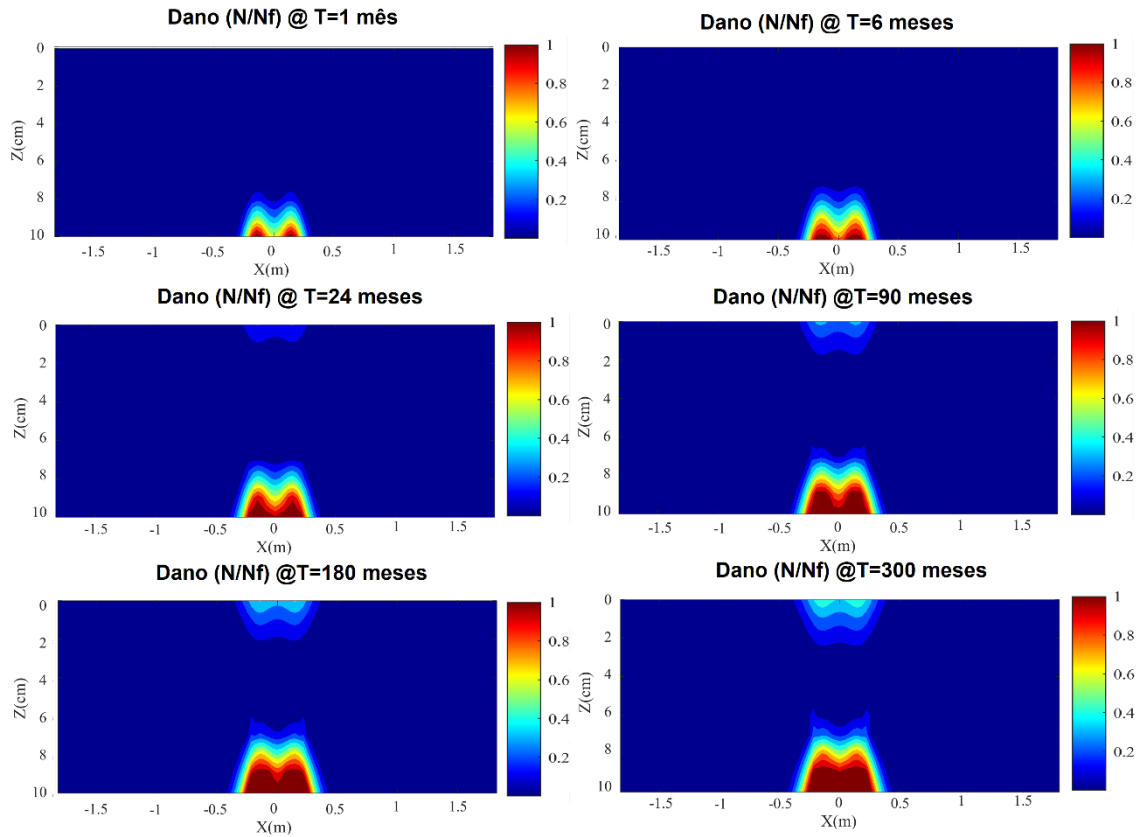


Figura 276 – Gráficos de contorno aos 1, 6, 24, 90, 180 e 300 meses da mistura SBS REF determinados com base no D^R

