TRANSPORTES
revistatransportes.org.br
anpet
associação nacional de pesquisa e ensino em transportes
anpet.org.br

Avaliação da resistência à fadiga e à deformação permanente de ligantes com rap e biorejuvenescedor oriundo do óleo de soja

Evaluation of resistance to fatigue and rutting of binders with rap and biorejuvenator from soybean oil

Andressa Cristina Borges Chaves[1], **Jorge Luiz Oliveira Lucas Junior**[1], **Jorge Barbosa Soares**[1]

[1]Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará, Brasil

Contato: andressachaves@det.ufc.br, (ACBC); jorgelucas@det.ufc.br, (JLOLJ); jsoares@det.ufc.br, (JBS)

Recebido:
21 de março de 2023
Revisado:
8 de maio de 2024
Aceito para publicação:
6 de julho de 2024
Publicado:
1 de outubro de 2024
Editor de Área:
Kamilla Vasconcelos, Universidade de São Paulo, Brasil

Palavras-chave:
Ligante.
RAP.
Fadiga.
Deformação permanente.

Keywords:
Binder.
RAP.
Fatigue.
Rutting.

DOI: 10.58922/transportes.v32i3.2903

OPEN ACCESS
CC BY

RESUMO

O uso elevado de RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) em misturas asfálticas pode prejudicar a resistência a defeitos. Para melhorar as propriedades dos ligantes, usam-se agentes rejuvenescedores, que precisam ser bem dosados para atender às especificações. O objetivo desse trabalho foi investigar o comportamento de resistência ao dano por fadiga e deformação permanente de ligantes com RAP e biorejuvenescedor oriundo do oleo de soja. Foram avaliados 16 ligantes, obtidos da mistura entre o ligante CAP 50/70, ligante extraído do RAP e biorejuvenescedor. O ligante do RAP foi adicionado à mistura com ligante puro nas porcentagens de 15 e 30%, e biorejuvenescedor nas porcentagens de 5 e 10%, ambos em relação a massa total da amostra. Também foi avaliada uma amostra 100% ligante do RAP. Foram realizados os testes Linear Amplitude Sweep (LAS) e Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) para avaliar fadiga e resistência à deformação permanente. Em paralelo, foram determinados: penetração, ponto de amolecimento, viscosidade e índice de instabilidade coloidal (pelo fracionamento SARA). Os resultados indicam que o aumento do teor de ligante do RAP compromete a resistência à fadiga, devido ao aumento da quantidade de ligante envelhecido, enquanto que a resistência à deformação permanente é afetada pelo aumento do teor de rejuvenescedor. O biorejuvenescedor epoxidado do óleo de soja se mostrou mais adequado na resistência para os dois defeitos. Foi encontrada uma boa correlação dos parâmetros de fadiga e deformação com as propriedades físicas, ao contrário do índice de instabilidade coloidal, que apresentou baixa relação com os parâmetros mecânicos.

ABSTRACT

The high use of RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) in asphalt mixtures can affect resistance to defects. To improve the properties of binders, rejuvenating agents are used, which need to be properly dosed to meet specifications. The aim of this study was to investigate the resistance to fatigue damage and rutting of binders containing RAP and a biorejuvenator from soybean oil. Sixteen binders were evaluated, obtained from a mixture of CAP 50/70 binder, binder extracted from RAP and biorejuvenator. The RAP binder was added to the mixture with pure binder in percentages of 15 and 30%, and biorejuvenator in percentages of 5 and 10%, both in relation to the total mass of the sample. A 100% RAP binder sample was also evaluated. Linear Amplitude Sweep (LAS) and Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) tests were carried out to assess fatigue and rutting. In parallel, penetration, softening point, viscosity and colloidal instability index (by SARA fractionation) were determined. The results indicate that increasing content of RAP binder compromises fatigue resistance, due to the increase in the amount of aged binder, while resistance to rutting is affected by increasing the rejuvenator content. The biorejuvenator epoxidized from soybean oil proved to be more suitable in terms of resistance to both defects. A good correlation was found between the fatigue and rutting parameters and the physical properties, unlike the colloidal instability index, which showed low relationship with the mechanical parameters.

1. INTRODUÇÃO

A utilização do RAP em misturas asfálticas é uma alternativa para economia de custo e sustentabilidade (Huang et al., 2011; Silva, 2011). Devido ao envelhecimento do ligante do RAP, propriedades como penetração, ponto de amolecimento, viscosidade e módulo de cisalhamento complexo, bem como a estrutura química (frações saturadas, aromáticas, resinas e asfaltenos -SARA) são alteradas ao longo do tempo (Abed et al., 2018). O desafio ao se utilizar o RAP está em controlar os efeitos que o envelhecimento desse material pode causar no desempenho do pavimento (Giustozzi et al., 2015).

Em geral, os rejuvenescedores são aditivos que contêm quantidades consideráveis de maltenos, os quais podem recuperar a composição química do RAP (Zargar et al., 2012). Recentemente, agentes rejuvenescedores têm sido amplamente empregados em pesquisas para restaurar as propriedades reológicas e componentes químicos de ligantes envelhecidos (Zaumanis et al., 2014). Produtos biorejuvenescedores, como óleo de algodão, óleo de soja e produtos à base de pinho, já foram utilizados para melhorar a resistência à fadiga do aglutinante envelhecido (Ameri et al., 2018).

Estes produtos tendem a melhorar a performance do pavimento asfáltico contra a fadiga (Moghaddam e Baaj, 2016; Almeida Jr., 2022), que surge devido às repetições de carga do tráfego. Ameri et al. (2018) apontaram que melhorar as propriedades do ligante asfáltico tem um efeito significativo no aumento da resistência à fadiga da mistura asfáltica correspondente. Os autores mostraram que os resultados do teste de fadiga de ligantes asfálticos podem ser usados para estimar a vida de fadiga do pavimento, já que as trincas se iniciam no ligante ou no mástique das misturas.

Assim como a fadiga, a deformação permanente é um dos maiores defeitos que ocorre em um pavimento asfáltico (Zhang et al., 2016). You et al. (2011) determinaram que o uso do RAP é favorável contra a deformação permanente, devido às mudanças nas propriedades reológicas do ligante asfáltico envelhecido. No entanto, essa mudança afeta negativamente a rigidez e pode reduzir a resistência do material ao dano por fadiga e trincamento térmico. A resistência à deformação permanente pode ser comprometida e não atender às especificações de projeto caso o material esteja misturado a agentes ou ligantes menos rígidos. E esse problema é especialmente complicado em regiões de altas temperaturas (Liu et al., 2021).

O presente artigo tem por objetivo avaliar a influência de diferentes teores de ligante extraído do RAP e biorejuvenescedor (óleo de soja natural e epoxidado – AESO), nas propriedades de resistência à fadiga e deformação permanente da mistura de ligantes. Além disso, buscou-se estimar correlações entre os parâmetros obtidos com outras características dos ligantes, como penetração, ponto de amolecimento, viscosidade rotacional e índice de instabilidade coloidal.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Materiais

Foram empregados dois tipos de ligantes asfálticos e óleo de soja como biorejuvenescedor. O ligante virgem utilizado foi um CAP 50/70 obtido da refinaria Lubnor, e o ligante proveniente do RAP coletado na empresa Insttale Engenharia, ambas localizadas no estado do Ceará. O RAP passou por um processo de extração e recuperação de ligante. A combinação entre os ligantes resultou em 16 amostras diversificadas em termos de teor de ligante do RAP, bem como em relação ao teor de biorejuvenescedor à base do óleo vegetal.

2.2. Preparação das amostras para ensaios

O ligante do RAP foi extraído pelo método de Refluxo (Método B - D2172-11) com o solvente tricloroetileno, utilizando de um sistema em que o solvente evaporado (temperatura de ebulição de 84 °C) passa por uma amostra de mistura asfáltica contidas em papel filtro, após isso a solução solvente+ligante é condensada no fundo do aparelho.

Foi utilizado o método Abson como processo de recuperação (ASTM, 2011), em que a solução solvente+ligante é aquecida em temperatura controlada (pouco acima do ponto de ebulição do solvente), o solvente evaporado é condensado e recuperado. A Figura 1 demonstra os processos descritos anteriormente. O estudo conduzido por Almeida Jr. (2022) demonstra que a influência do solvente nos ligantes recuperados pode impactar nos resultados dos testes de fadiga e deformação permanente. Assim, garantir uma recuperação bem-sucedida dos ligantes é crucial para alcançar resultados mais confiáveis, especialmente considerando que esta pesquisa se concentra especificamente na análise desses dois aspectos. A cada extração e recuperação, os ligantes foram submetidos a analise infravermelho (FTIR) para verificar e garantir que o solvente foi extraído da amostra.

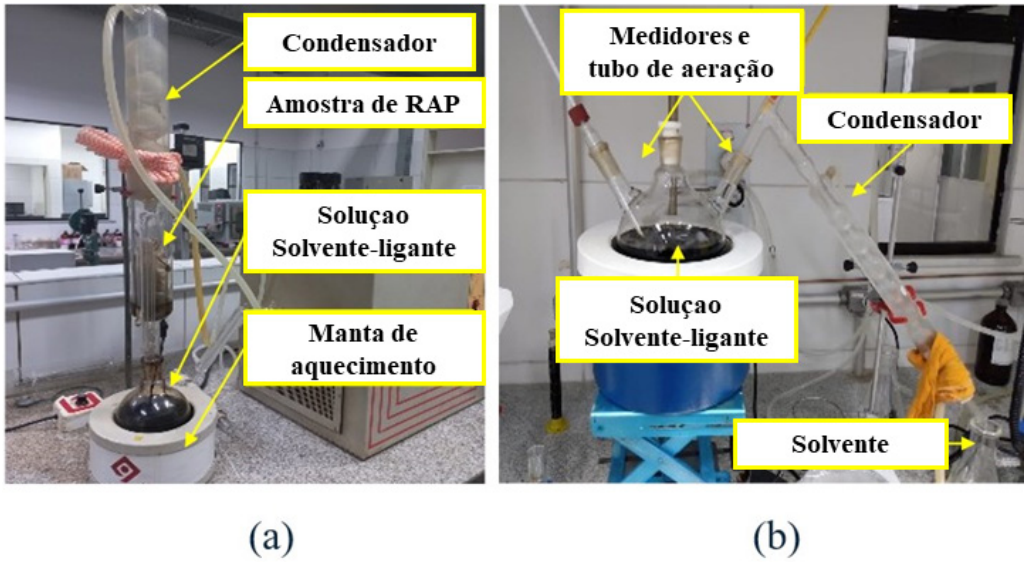

Figura 1. (a) Extração pelo método de refluxo – Soxhlet e; (b) Recuperação pelo método Abson.

As amostras foram preparadas em um misturador mecânico de cisalhamento (inclusive a amostra com ligante puro para garantir a mesma condição de cisalhamento das demais), como mostra a Figura 2, na temperatura de 150ºC, durante 1 hora, com taxa de cisalhamento de 1000rpm. Os critérios para produção de ligante não são normatizados e nesta pesquisa foram adotados seguindo um padrão que se encontra na literatura (Uchoa et al., 2021).

Foi estabelecido a preparação de 200 g de cada amostra de ligante para realização de todos os ensaios. As amostras foram preparadas a partir da mistura de 15 e 30% do ligante do RAP em relação a massa total da amostra (AASHTO, 2022) e 5 e 10% dos biorejuvenescedores seguindo o mesmo padrão. As proporções de mistura entre ligante puro, ligante extraído do RAP e rejuvenescedores estão mostradas na Tabela 1.

Figura 2. Misturador de cisalhamento utilizado na preparação das amostras.

Tabela 1: Separação das amostras para ensaios.

Amostra de Ligantes e suas proporções	Nomenclatura
CAP 50/70 Puro	NB
100%Ligante RAP	100%RAP
85%CAP 50/70 + 15%Ligante RAP	NB+15%RAP
70%CAP 50/70 + 30%Ligante RAP	NB+30%RAP
80%CAP 50/70 + 15%Ligante RAP + 5% Óleo	NB+15%RAP+5%O
75%CAP 50/70 + 15%Ligante RAP + 10% Óleo	NB+15%RAP+10%O
65%CAP 50/70 + 30%Ligante RAP + 5% Óleo	NB+30%RAP+5%O
60%CAP 50/70 + 30%Ligante RAP + 10%A Óleo	NB+30%RAP+10%O
95%Ligante RAP + 5% Óleo	100%RAP+5%O
90%Ligante RAP + 10% Óleo	100%RAP+10%O
80%CAP 50/70 + 15%Ligante RAP + 5% AESO	NB+15%RAP+5%AESO
75%CAP 50/70 + 15%Ligante RAP + 10% AESO	NB+15%RAP+10%AESO
65%CAP 50/70 + 30%Ligante RAP + 5% AESO	NB+30%RAP+5%AESO
60%CAP 50/70 + 30%Ligante RAP + 10%AESO	NB+30%RAP+10%AESO
95% Ligante RAP + 5% AESO	100%RAP+5%AESO
90%Ligante RAP + 10% AESO	100%RAP+10%AESO

Os percentuais de ligante do RAP foram determinados com base nos valores empregados na produção de misturas recicladas com RAP (Huang et al., 2011), ainda que em uma mistura reciclada nem todo o ligante presente no RAP é ativado e misturado completamente com o ligante virgem (Ferreira, 2021). Misturas com RAP podem apresentar teores de até 15% em peso da mistura total, sem que sejam necessárias modificações na operação da usina (AASHTO, 2022). Até este teor, o ligante envelhecido do RAP produz efeitos menos nocivos no ligante virgem a ser acrescido na nova mistura. Teores mais

elevados de RAP requerem um cuidado maior sobre a combinação do ligante envelhecido e do ligante novo, possivelmente com a necessidade de ligantes novos menos viscosos ou biorejuvenescedores.

Quanto ao óleo de soja como biorejuvenescedor, a escolha seguiu a literatura, que geralmente preconiza o uso de porcentagens de biorejuvenescedores inferiores a 10% em massa do ligante, como indicado por Shen et al. (2007) e Kuang et al. (2019). No entanto, a utilização de porcentagens maiores também pode ser apropriada (Zaumanis et al., 2014).

Como biorejuvenescedor, foram utilizados o óleo de soja puro e o óleo obtido da epoxidação do óleo de soja, denominado na pesquisa como AESO (óleo de soja acrilado-epoxidado). O AESO foi produzido em duas etapas: a primeira etapa consistiu na epoxidação do óleo de soja pelo método descrito em Olivieri et al. (2020), em seguida, esse epóxi intermediário foi colocado para reagir com ácido acrílico na presença de um catalisador. A reação é descrita a seguir: em um balão de fundo redondo de 250 mL, foi adicionado óleo de soja epoxidado (50 g), com agitação e sob refluxo, elevou-se a temperatura até 90 °C. Em seguida, adicionou-se lentamente ácido láctico (2,5 g) ao óleo epoxidado. A mistura permaneceu sob agitação constante a 90 °C em banho de água por 6h. A purificação do óleo de soja acrilado foi realizada dissolvendo o óleo em diclorometano e depois lavando a fase orgânica com água. A fase orgânica foi coletada, e utilizado sulfato de sódio (Na_2SO_4) para remoção da água. Após filtração o produto foi concentrado usando evaporação rotativa para separar o óleo de soja acrilado-epoxidado (AESO).

2.3. Ensaios físicos e químicos

O CAP 50/70, o ligante do RAP e as demais amostras com biorejuvenescedor foram caracterizadas pelos ensaios físicos de DNIT (ABNT NBR 6576/2007), ponto de amolecimento (DNIT 131/2010) e viscosidade Rotacional Brookfield (NBR 15184) nas temperaturas de 135, 150 e 177 °C. Serão mostrados os resultados de viscosidade dos ligantes à 135 °C, por ser aquela em que as variações de viscosidade são mais perceptíveis entre as amostras.

Para determinar o índice de instabilidade coloidal CII, foi realizado o fracionamento SARA (Saturados, Aromáticos, Resinas e Asfaltenos), calculado pela Equação 1.

$$\mathrm{CII} = \frac{\mathrm{Asfaltenos}\,(\%) + \mathrm{Saturados}\,(\%)}{\mathrm{Resinas}\,(\%) + \mathrm{Aromáticos}\,(\%)} \tag{1}$$

2.4. *Multiple Stress Creep Recovery* (MSCR)

O ensaio MSCR, descrito pela norma DNIT 423 (DNIT, 2020), foi realizado através da aplicação de ciclos de fluência e recuperação sobre as amostras de ligante asfáltico. No ensaio, cada ciclo envolve a aplicação de uma tensão constante de fluência pelo tempo de 1s, após a qual a carga é removida, deixando o material se recuperar durante um período de 9s. São aplicados inicialmente 10 ciclos de condicionamento com tensão de 0,1kPa. Em seguida, mais 10 ciclos registrando a deformação sofrida pela amostra e, ao fim, mais 10 ciclos na tensão de 3,2kPa. O teste caracteriza as propriedades de recuperação e não-recuperação do ligante sob as cargas de fluência por cisalhamento.

Por meio do ensaio, são obtidos os parâmetros de compliância não-recuperável (J_{nr}), que indica a susceptibilidade do ligante à deformação permanente sob cargas cíclicas, e percentual de recuperação ($R\%$), parâmetro que indica a capacidade de o ligante recuperar a deformação sofrida a cada ciclo. Na presente pesquisa, todas as amostras foram submetidas ao teste de deformação, nas temperaturas variando de 52 a 82 °C, porém são apresentados os resultados até 70 °C já que dificilmente os pavimentos brasileiros ultrapassarão esta temperatura.

A norma estipula que os ligantes devem passar pelo processo de envelhecimento em RTFO para a realização dos ensaios. No entanto, dado que o ligante é proveniente do RAP, ele já possui um nível considerável de envelhecimento. Portanto, as amostras foram testadas sem serem submetidas a esse processo adicional de envelhecimento.

2.5. *Linear Amplitude Sweep* (LAS)

Para investigação do comportamento dos ligantes ao dano por fadiga, foi usado o ensaio de Varredura Linear de Amplitude de Deformação (*Linear Amplitude Sweep - LAS*). O ensaio é descrito pela norma do DNIT 439 (2022-ME) e foi realizado no DSR, com geometria de 8 mm e distância entre as placas (GAP) paralelas de 2 mm na temperatura de 19 °C (DNIT, 2022). O ensaio se dá em duas etapas, sendo que na primeira o ligante passa por uma varredura de frequência de 1 a 30Hz, com amplitude de deformação de 0,1% para obtenção do comportamento do ligante antes de sofrer o dano. A segunda etapa consiste na aplicação de carregamento oscilatório com uma varredura de amplitude de deformação variando de 1% a 30%, desta vez com frequência constante de 10Hz. Os dados do ensaio são analisados através da aplicação do princípio do Dano Contínuo Viscoelástico (VECD), que verifica a propagação do dano em relação a variação de energia. A partir deste se traça a curva que relaciona os parâmetros de integridade (C) e o dano acumulado (S), obtendo-se o número de ciclos (N_f) e a deformação.

3. RESULTADOS

3.1. Caracterização física e química dos ligantes

Os resultados obtidos nos ensaios de penetração, ponto de amolecimento (PA), viscosidade rotacional e índice de instabilidade coloidal são apresentados na Tabela 2. Percebe-se uma redução no valor de penetração ao adicionar o ligante do RAP, em valores que podem chegar até 53%. O inverso acontece ao se adicionar os biorejuvenescedores. O óleo de soja natural aumentou drasticamente a penetração, principalmente o teor de 10% de óleo. O AESO proporcionou o aumento da penetração, não na mesma magnitude do efeito do óleo de soja. O PA não sofreu variação considerável, sendo a maior aconteceu ao se comparar a amostra 100%RAP e NB, com aumento de 40% do ligante puro CAP 50/70 para o ligante envelhecido extraído do RAP. Já a viscosidade, ao se analisar a temperatura de 135 °C, o aumento de 15 e 30% de ligante do RAP na amostra de ligante puro, provocou um aumento de 27 e 88% na viscosidade. O óleo de soja e AESO proporcionaram a redução da viscosidade em todas as amostras com ligante do RAP, indicando que os rejuvenescedores foram eficazes na recuperação da viscosidade. Observando os resultados de todos os ligantes, aqueles com viscosidade mais semelhante à do ligante puro NB, foram NB+15%RAP+5%O, NB+30%RAP+10%O e NB+30%RAP+10%AESO.

Os resultados obtidos pelo fracionamento SARA foram analisados a partir do índice de instabilidade coloidal. Considera-se que quanto mais elevado é este índice, maior o comportamento de gel desse ligante (Silva, 2005). De acordo com o sistema de estabilidade coloidal (Lesueur, 2009), quanto menor o valor de CII, maior a estabilidade dos asfaltenos no ligante asfáltico. Se CII ≥ 0,9, a fração de asfaltenos tende a ser instável dentro do ligante; 0,7 ≤ CII ≤ 0,9, a estabilidade do asfalteno é incerta; CII ≤ 0,7, a fração dos asfaltenos é estável (Mangiafico et al., 2016).

À medida que aumenta o teor de ligante do RAP na amostra, o CII também aumenta, especialmente nas amostras iniciais sem óleo rejuvenescedor. A influência dos rejuvenescedores no índice varia

dependendo do tipo de óleo utilizado. O AESO é mais viscoso/consistente do que o óleo de soja puro, resultando em um índice de instabilidade menor nas amostras com óleo de soja. Ambos os óleos afetam o equilíbrio da fração de asfaltenos, aumentando as frações de baixo peso molecular. As alterações causadas pelo AESO são menos significativas, mas ainda contribuem para a estabilidade da estrutura, exceto nas amostras NB+15%RAP+5%AESO e 100%RAP+5%AESO, onde o índice foi maior do que no ligante 100%RAP. Talvez 5% de AESO não seja suficiente para dispersar as moléculas de asfaltenos, e um aumento para 10% tornaria a diferença perceptível.

Se considerar apenas o CII, o óleo de soja parece ser o mais eficaz na estabilização da estrutura, sendo assim, o melhor rejuvenescedor. No entanto, confiar exclusivamente no fracionamento SARA para avaliar a ação de rejuvenescimento nos ligantes pode não ser totalmente preciso. Ao considerar os resultados físicos (penetração, amolecimento e viscosidade) e utilizar o ligante virgem NB como ponto de referência, observa-se que as amostras com óleo de soja não se aproximaram tanto dos valores de referência quanto as amostras com AESO.

Tabela 2: Resultados dos ensaios físicos e químicos dos ligantes.

Amostras	Caracterização Física			Indice de instabilidade coloidal
	Penetração (0,1 mm)	Ponto de amolecimento (°C)	Viscosidade a 135 °C	
NB	63	52	381	0,37
NB+15%RAP	33	54	485	0,44
NB+30%RAP	30	57	718	0,60
100%RAP	12	73	3125	0,74
NB+15%RAP+5%O	124	45	340	0,37
NB+15%RAP+10%O	228	40	235	0,36
NB+30%RAP+5%O	58	54	538	0,68
NB+30%RAP+10%O	174	51	285	0,46
100%RAP+5%O	25	67	991	0,46
100%RAP+10%O	33	60	928	0,43
NB+15%RAP+5%AESO	40	52	513	0,80
NB+15%RAP+10%AESO	65	49	535	0,36
NB+30%RAP+5%AESO	39	56	633	0,50
NB+30%RAP+10%AESO	49	54	686	0,45
100%RAP+5%AESO	29	67	1782	0,82
100%RAP+10%AESO	19	67	931	0,50

3.2. Avaliação da Deformação permanente pelo MSCR

Os dois principais parâmetros obtidos no ensaio MSCR, $J_{nr_{(3,2kPa)}}$ e $R_{(3,2kPa)}$ para todas as amostras constam nas Figuras 3 e 4, respectivamente. A ASTM D 7405-15 aponta o $J_{nr_{(3,2kPa)}}$ como o parâmetro que define a resistência do ligante à deformação permanente. Um valor alto de $J_{nr_{(3,2kPa)}}$ representa uma resistência mais baixa a deformação permanente (ASTM, 2015).

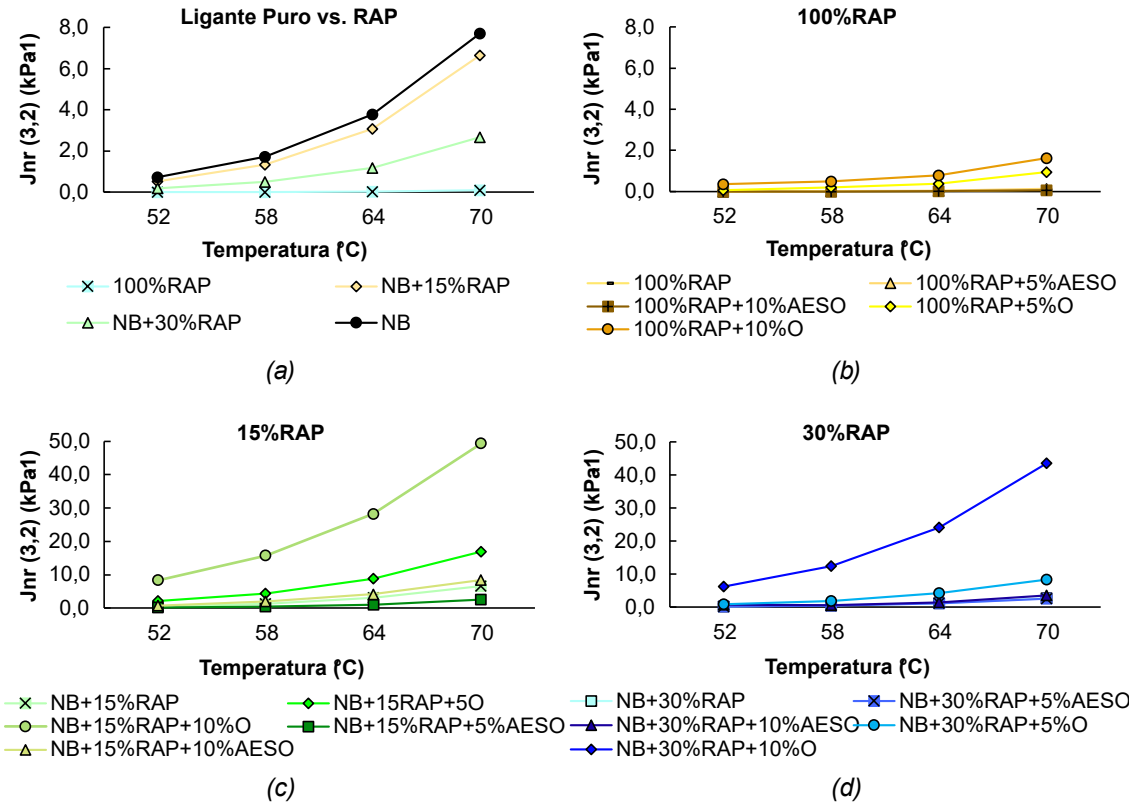

Figura 3. Compliância não-recuperável - $J_{nr_{(3,2kPa)}}$.

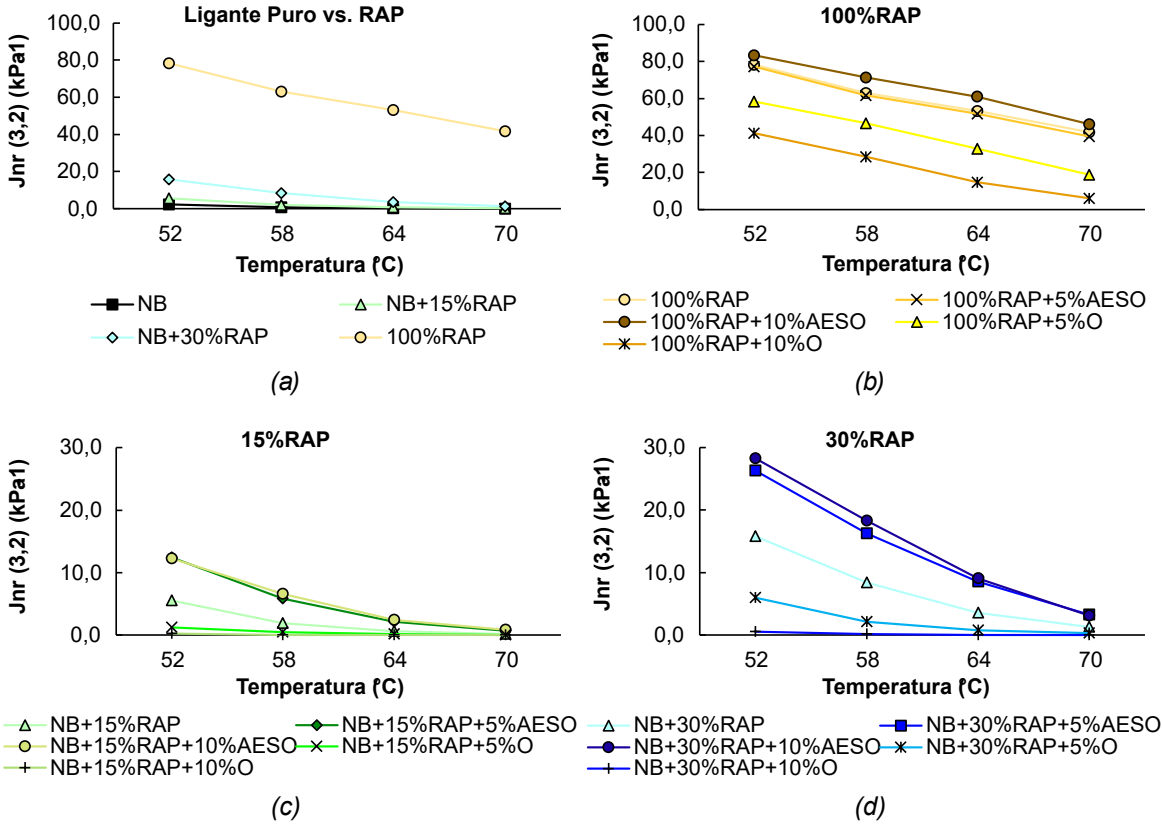

Figura 4. Recuperação – $R_{(3,2kPa)}$.

O aumento do ligante do RAP nas amostras causou um aumento da resistência do ligante à deformação permanente, devido à redução do parâmetro J_{nr}. As amostras de ligantes com óleo, como NB+15%RAP+10%O e NB+30%RAP+10%, comparadas às demais, apresentaram os menores valores de recuperação e os maiores valores de compliância não-recuperável, indicando que o óleo, principalmente no teor de 10%, afetou negativamente a resistência à deformação. Este resultado está alinhado ao encontrado por Zaumanis et al. (2014). Os níveis de recuperação decresceram a medida em que se aumentou a temperatura. As amostras mais semelhantes ao ligante virgem NB, foram NB+15%RAP+5%AESO e NB+30%RAP+10%AESO. Vale destacar que a compliância não recuperável foi menor e a recuperação maior em todas as temperaturas, comparado ao ligante NB. Indicando que tais ligantes apresentaram um potencial desempenho até melhor do que um ligante puro CAP 50/70.

Percentuais de recuperação maiores, como nos ligantes100%RAP, podem ser traduzidos em uma capacidade maior de o ligante recuperar a deformação sofrida, após a aplicação da carga, que na prática indica níveis de deformação permanente mais baixas (menor acúmulo de deformação plástica). O valor de recuperação encontrado próximo a 80% pode ser explicado pela característica de rigidez do ligante do RAP a temperatura mais baixa entre as avaliadas. A tensão aplicada não foi suficiente para gerar uma deformação considerável e por isso a recuperação apresentou valor maior. Ainda que os parâmetros para os ligantes com 100% RAP sejam bons para a resistência à deformação permanente, isto não significa que este seja o ideal para misturas asfálticas, até porque estas amostras não necessariamente atendem às outras especificações de projeto, como resistência à fadiga, ou até mesmo à propriedades físicas, como penetração. O mesmo comportamento foi visto em trabalho de Zhou et al. (2019), que demonstrou que adiçao de 4% de rejuvenescedor em ligantes de RAP com SBS, podem melhorar o comportamento quanto a fadiga, porém resultou em um efeito indesejavel para resistencia a deformaçao permanente.

A Figura 5 apresenta os valores de $J_{nr-diff}$ na temperatura de 64 °C. Este parâmetro vai caracterizar a sensibilidade do ligante ao dano, e segundo a ASTM D 7405-15, o $J_{nr-diff}$ deve ser inferior a 75% (ASTM, 2015). Todos os ligantes se adequaram a este requisito. Os valores de $J_{nr-diff}$ para as amostras com ligante do RAP parecem não ser tão sensíveis com a variação do teor de ligante do RAP. Enquanto que a adição do rejuvenescedor, tanto óleo de soja quanto AESO, ocasionou uma forte variação desse parâmetro. Como determinado nos gráficos anteriores, amostras com 10% de biorejuvenescedor tenderam a ser mais sensíveis ao dano.

3.3. Avaliação da fadiga pelo teste LAS *(Linear Amplitude Sweep)*

As Figuras 5 e 6 apresentam as curvas características de dano e vida de fadiga (N_f) das amostras utilizando a abordagem VECD (Dano Contínuo Viscoelástico) baseada na pseudo-energia de deformação (PSE), nos três níveis de deformações aplicados, de 1,25; 2,5 e 5%.

Na curva característica de dano C *vs.* S (Figura 6), a integridade de todos ligantes foi prejudicada com o aumento da intensidade do dano. O ponto de ruptura define até onde a curva é traçada, sendo assim o ponto de tensão máxima aplicada no material. O ligante NB e as amostras que contém óleo de soja resistiram mais ao dano. Já a amostra de ligante 100%RAP tem baixíssima resistência à fadiga, que pode ser explicada pela alta rigidez ou viscosidade (resultado do envelhecimento em campo) desse material, tornando-o mais suscetível às trincas.

Quanto à vida de fadiga, as amostras com biorejuvenescedor tanto para o óleo de soja quanto para o AESO, os ligantes tiveram o mesmo comportamento. Na amostra NB+30%RAP+10%O é possível perceber uma alteração na inclinação da curva, Figura 7c, mostrando que a adição do óleo

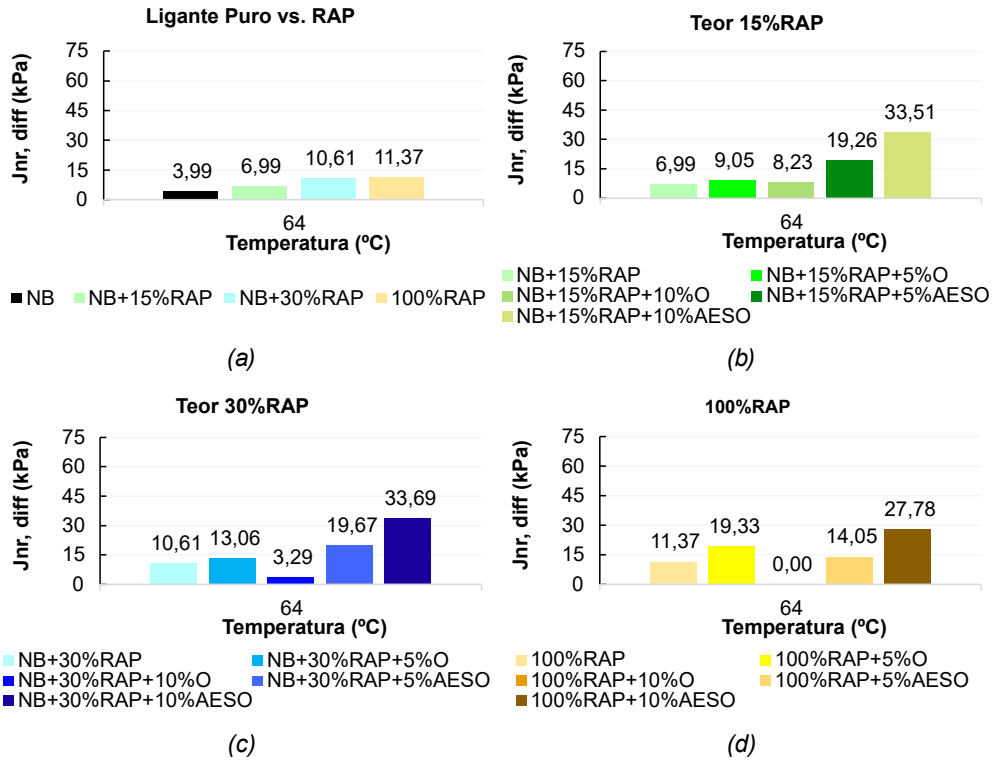

Figura 5. Parâmetro $J_{nr\ \ diff}$.

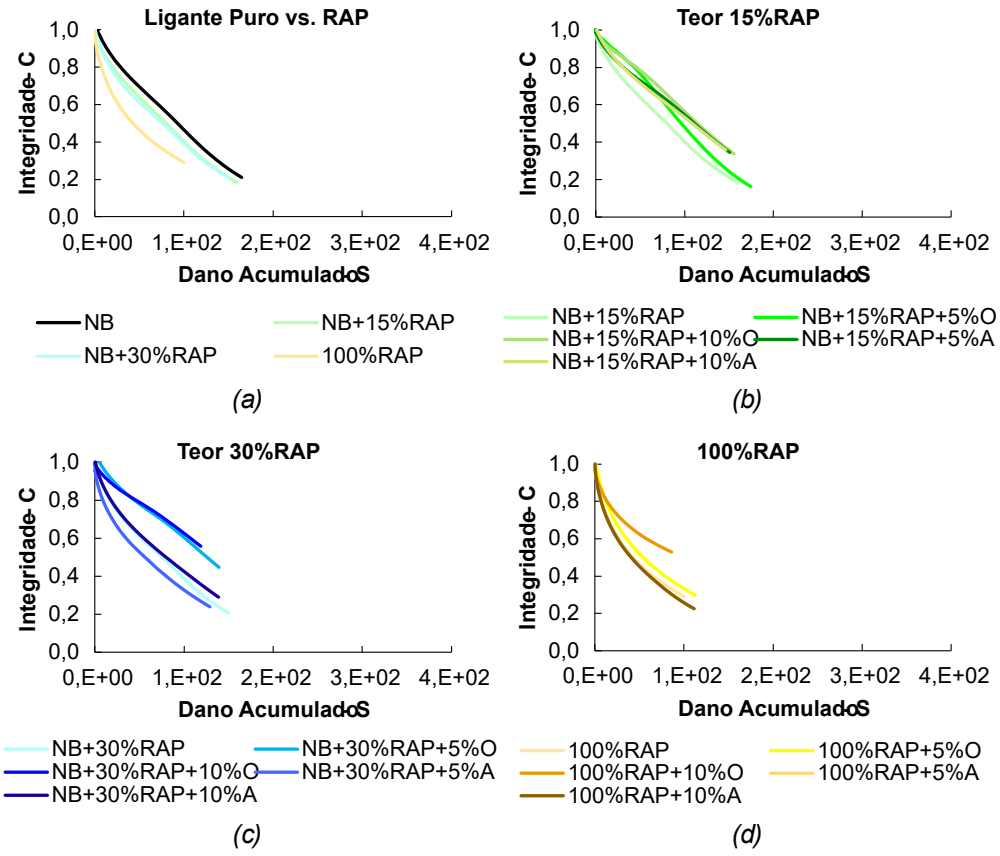

Figura 6. Curva característica de dano $C vs. S$.

permitiu a amostra resistir a um maior número de solicitações em altas deformações. O ligante NB+15%RAP+5%AESO, mesmo em baixas deformações, não apresentou bom comportamento quanto à vida de fadiga.

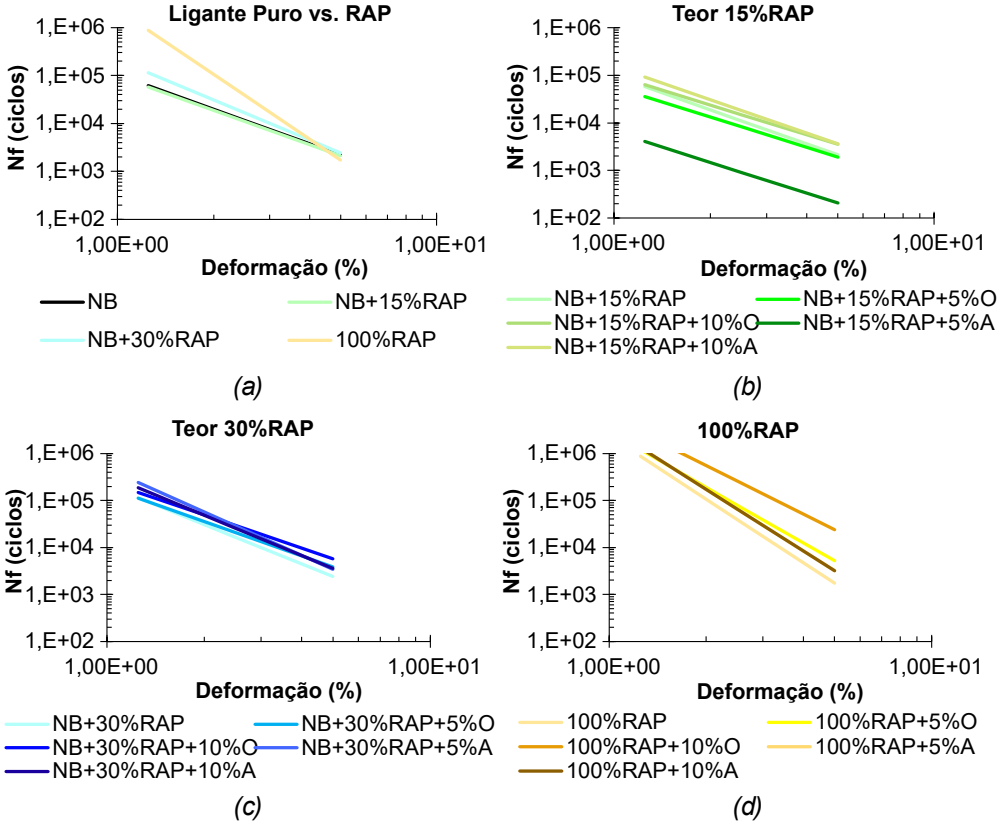

Figura 7. Curva Deformação *vs.* N_f dos ligantes.

Os ligantes 100% RAP, claramente aumentaram sua vida de fadiga, porém quando se aumentou a deformação, a resistência à fadiga foi prejudicada. Percebe-se que a adiçao do ligante do RAP causa uma reduçao mais critica na integridade dos ligantes, da mesma forma como observado em pesquisa de Raul (2019). A queda da integridade se torna mais suave a medida em que se adiciona o biorejuvenescedor (Takahashi, 2020).

Tabela 3 apresenta os valores do fator de fadiga do ligante (FFL), facilitando a comparação da resistência à fadiga entre diferentes ligantes e permitindo a classificação das amostras testadas. Nascimento (2016) estabeleceu uma correlação entre o FFL e a rigidez dos ligantes, propondo quatro classes de fadiga (de 1 a 4), sendo a menor indicativa de menor resistência. Resultados de FFL mais elevados indicam uma maior resistência do ligante à fadiga. Observa-se que os ligantes contendo AESO geralmente apresentam os valores mais altos, sugerindo que o AESO tem um efeito positivo na resistência ao dano por fadiga.

3.4. Correlações com os parâmetros físicos e químicos dos ligantes

Após análise dos resultados de deformação permanente e fadiga, foi possível buscar uma correlação entre os principais parâmetros desses ensaios com as propriedades físicas dos ligantes. Além disso, uma correlação com o índice de instabilidade coloidal, determinado no teste químico de fracionamento SARA também foi realizada.

Tabela 3: Fator de Fadiga dos Ligantes (FFL).

Amostras	FFL	Classificação
NB	1,333	13°
100%RAP	1,586	7°
NB+15%RAP	1,326	14°
NB+30%RAP	1,396	10°
NB+15%RAP+5%O	1,276	16°
NB+15%RAP+10%O	1,351	12°
NB+30%RAP+5%O	1,410	9°
NB+30%RAP+10%O	1,451	8°
100%RAP+5%O	1,652	2°
100%RAP+10%O	1,783	1°
NB+15%RAP+5%AESO	1,324	15°
NB+15%RAP+10%AESO	1,388	11°
NB+30%RAP+5%AESO	1,482	6°
NB+30%RAP+10%AESO	1,457	7°
100%RAP+5%AESO	1,646	4°
100%RAP+10%AESO	1,646	3°

A primeira correlação é mostrada na Figura 8. O parâmetro $J_{nr_{(3,2kPa)}}$, do teste de deformação permanente e o N_f, do teste de Fadiga são correlacionados com a penetração de cada ligante. A correlação com o N_f foi realizada com os resultados considerando a maior taxa de deformação. Há baixa correlação dos dados de J_{nr} e N_f com a penetração quando se considera no conjunto de

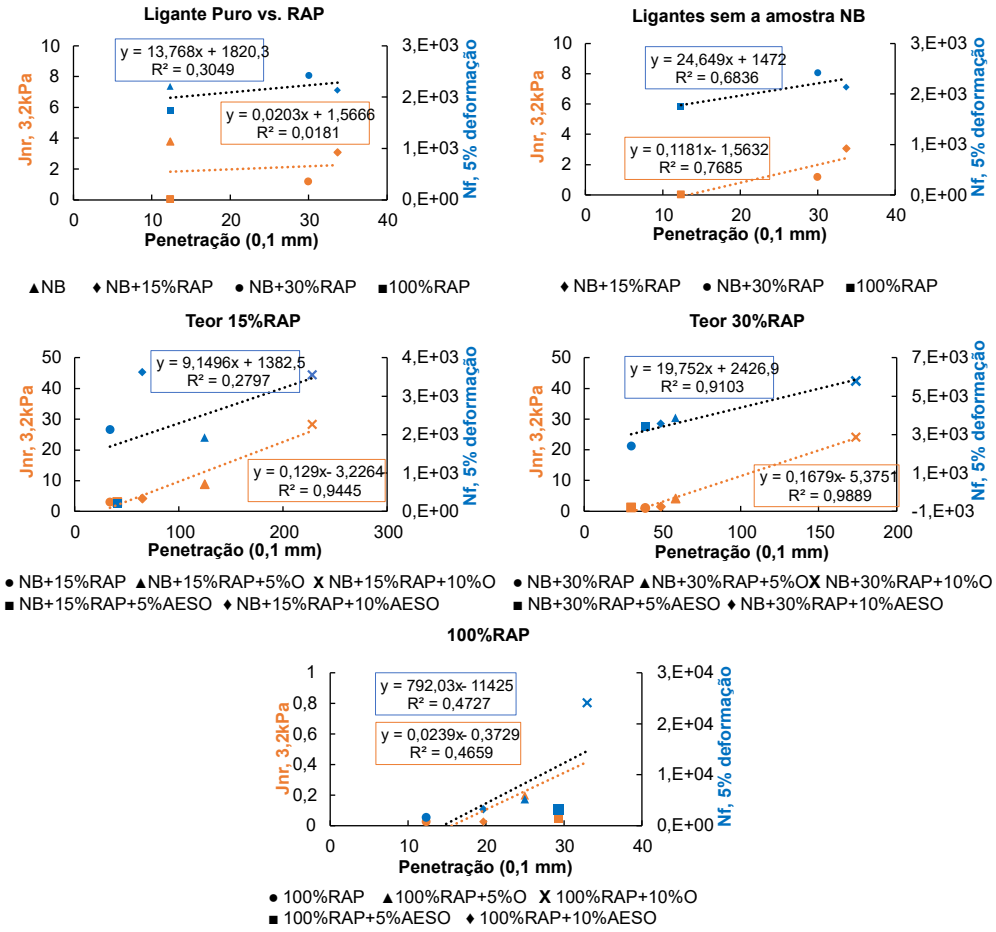

Figura 8. Correlação de $J_{nr_{(3,2kPa)}}$ e N_f (5% de deformação) com penetração dos ligantes.

dados os resultados do ligante puro e os ligantes com RAP. Com o ligante virgem, o R^2 foi menor que 30% para todos os parâmetros. Por outro lado, ao se considerar apenas as amostras com RAP, essa correlação aumentou para aproximadamente 68% para a fadiga e 76% para a deformação permanente. O fato de o ligante virgem não possuir o nível de envelhecimento dos demais e ser diferente do ligante do RAP pode justificar essa diferença.

Avaliando apenas os ligantes com 15% de RAP e com 5 e 10% do óleo de soja e AESO, a correlação da penetração com o parâmetro de fadiga foi baixa, em torno de 28%, já com o J_{nr} foi de 94%. Esse resultado mostrou uma relação entre os ensaios de penetração e de deformação permanente, mas o mesmo não é visto entre a penetração e fadiga. Nos ligantes com 30% de RAP, a relação da penetração, por meio do R^2, foi de 91% com relação ao N_f e 98% com J_{nr}. Para 100%RAP, as correlações ficaram em torno de 46% para ambos os parâmetros. Os resultados mostraram que o parâmetro $J_{nr_{(3,2kPa)}}$ possui relação com a penetração, sendo que ligantes com penetração menor tendem a ter valores maiores de $J_{nr_{(3,2kPa)}}$. Se esperaria que ligantes com penetração mais baixas tenderiam a resistir menos à deformação permanente, o que é evidenciado pelo resultado. Mesmo que a penetração não seja propriamente um ensaio de deformação permanente de ligantes, ela se mostrou um indicativo interessante para uma primeira estimativa da susceptibilidade a deformação permanente de amostras com ligante extraído de misturas recicladas, algo que já se esperaria.

Quanto ao PA, as correlações com o parâmetro $J_{nr_{(3,2kPa)}}$ de deformação permanente, mostradas na Figura 9, foram relativamente boas, com $R^2 > 75\%$. Apenas as amostras de 15% do ligante do

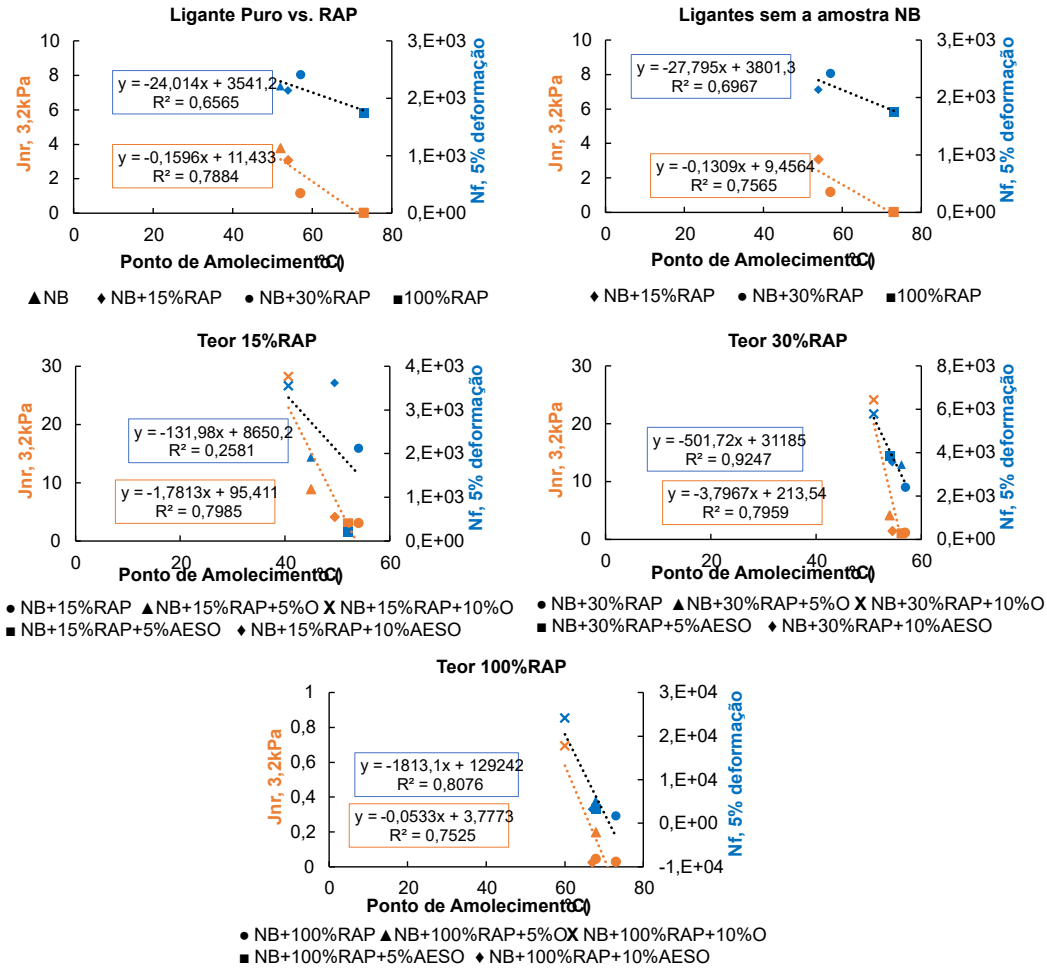

Figura 9. Correlação entre $J_{nr_{(3,2kPa)}}$ e N_f (5% de deformação) com o PA dos ligantes.

RAP apresentaram baixa correlação entre o N_f e o PA. Resultado semelhante já havia ocorrido com as correlações entre o N_f e penetração. Uma hipótese é que o teor de 15% de RAP adicionado ao ligante, devido ao seu baixo valor, pode não se misturar homogeneamente ao ligante virgem, mesmo com 1h de homogeneização no misturador de cisalhamento. As amostras com 30% de ligante do RAP, comparada às outras, possuiu correlações mais altas, ou seja, R^2 de 92% com N_f e 80% com J_{nr}. Em contraponto ao teor de 15%, é possível que a maior quantidade de ligante do RAP, seja homogeneizada de maneira mais satisfatória ao ligante virgem, traduzindo-se em propriedades mais constantes ao longo do volume do ligante misturado e, ao se retirar uma pequena amostra do ensaio, esta acabe por representar adequadamente a totalidade do ligante.

Ao analisar as amostras sem o biorejuvenescedor o coeficiente de corrrelação foi mais elevado entre a viscosidade e a vida de fadiga se comparado com a corelação entre a viscosidade e a deformação permanente. As amostras com 30% do ligante do RAP seguem apresentando as melhores correlações, sendo R^2 acima de 92% para os parâmetros de deformação permanente e vida de fadiga. Já para os ligantes 100% RAP, o R^2 foi o mais baixo, sendo inferiores à 30%, conforme Figura 10. Esse menor R^2 do pode ser explicado pela própria variabilidade do material em que se extrai o ligante e possivelmente os mecanismos de dano podem ser mais complexos no ligante do RAP. Como as amostras coletadas possuem grande variabilidade e as extrações e recuperações são feitas em várias etapas é possível que as diferentes amostras de ligante com 100% RAP possuam variabilidade em suas propriedades. Ao se analisar somente amostras com

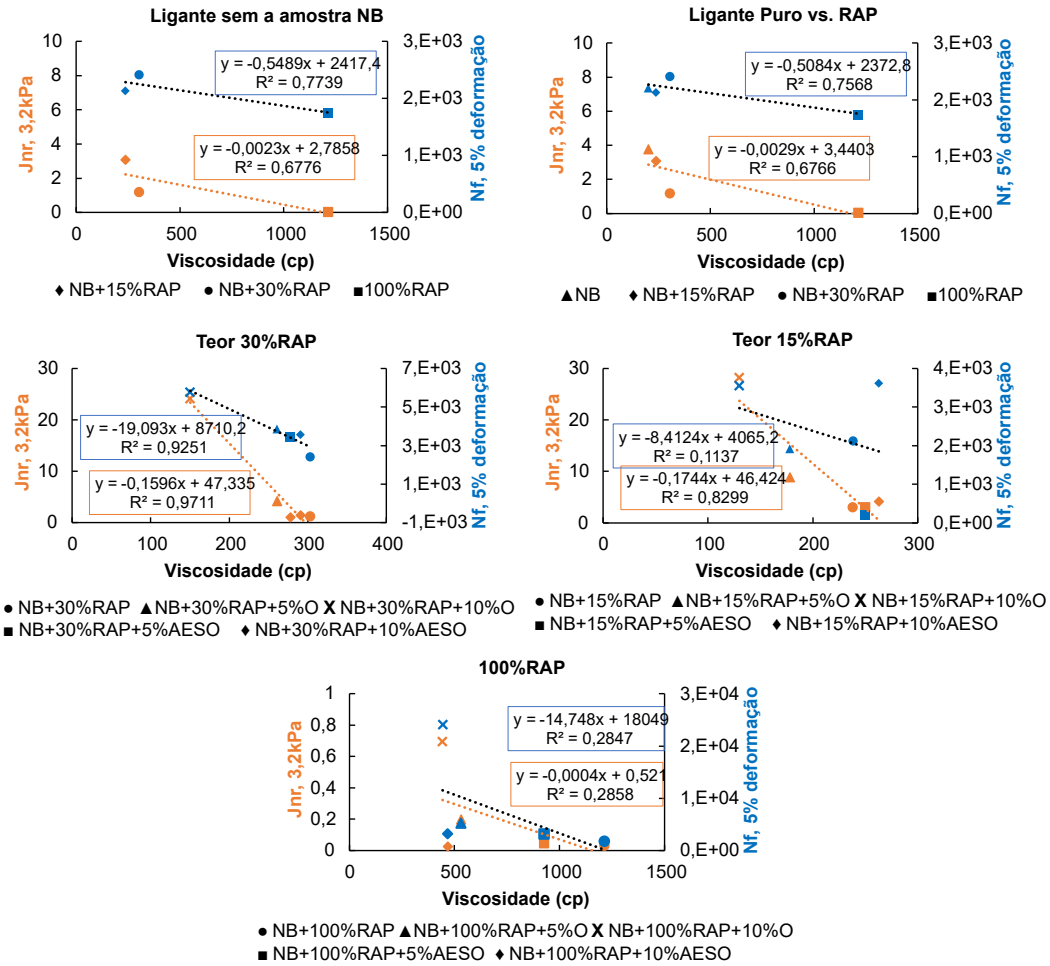

Figura 10. Correlação de $J_{nr_{(3,2kPa)}}$ e N_f (5% de deformação) com a viscosidade dos ligantes.

100% RAP, essas podem ser alteradas levemente, enquanto que ao se adicionar 15 ou 30% de RAP essas variações se diluem no maior volume de ligante virgem das amostras.

Ao relacionar o índice de instabilidade coloidal com os parâmetros de vida de fadiga e resistência à deformação permanente, demonstrados na Figura 11, encontrou-se um R^2 baixo, indicando que o índice CII não é o mais adequado para estimar o possível comportamento do ligante. Pode ser que correlacionar as frações SARA separadamente leve à um melhor R^2, e assim verificar qual delas tem maior relação com os parâmetros de fadiga e deformação permanente (Wang e Wang, 2019).

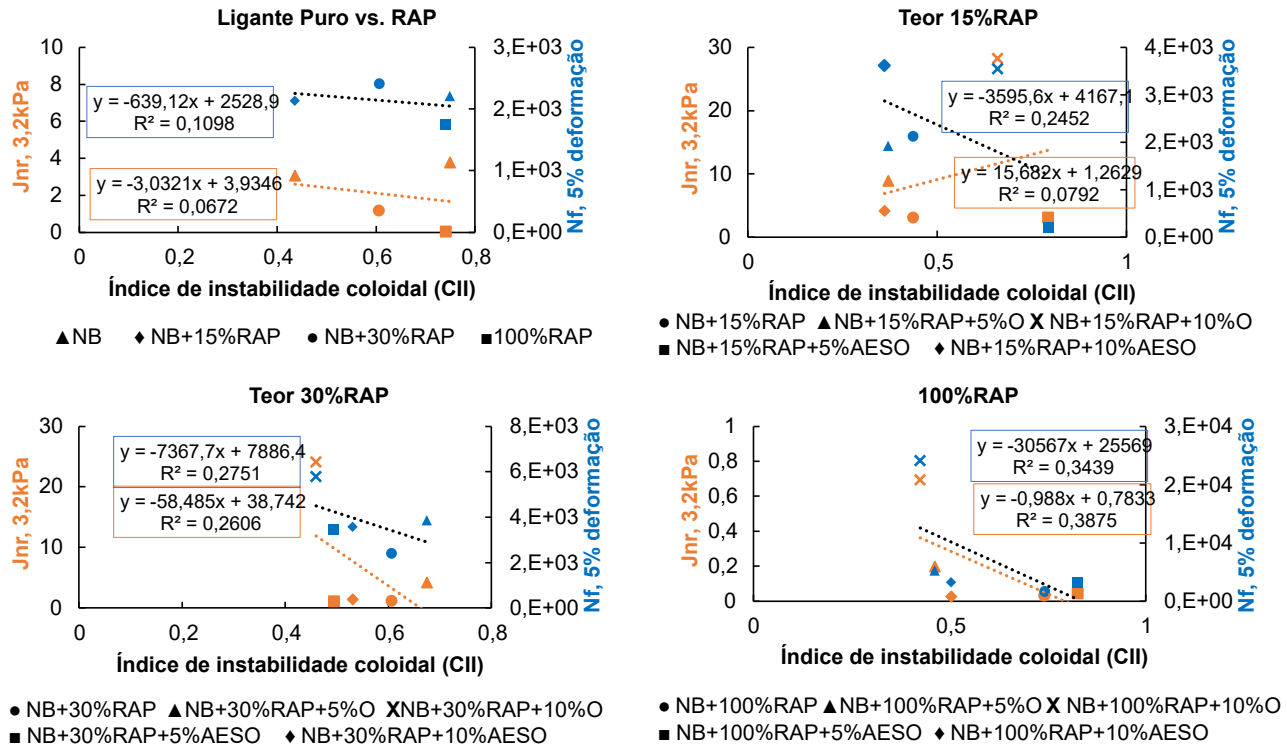

Figura 11. Correlação entre $J_{nr_{(3,2kPa)}}$ e N_f (5% de deformação) com o Índice de Instabilidade Coloidal dos ligantes.

4. Conclusões

O objetivo desta pesquisa foi analisar o comportamento quanto à resistência ao dano por fadiga e à deformação permanente de ligantes com RAP, alguns contendo biorejuvenescedores à base de óleo de soja. A presente pesquisa contribuiu no entendimento de quais parâmetros físicos e químicos podem contribuir na previsão da resistência à fadiga e deformação permanente, com os parâmetros de ensaios mais modernos para ligantes, como *LAS* e *MSCR*, de ligantes com RAP e rejuvenescedor à base do óleo de soja. O estudo mostrou que o aumento do teor de RAP compromete a resistência à fadiga, enquanto o aumento do teor de rejuvenescedor afeta a resistência à deformação permanente, e que o biorejuvenescedor epoxidado do óleo de soja é mais adequado para ambos os defeitos.

À luz dos métodos e materiais usados foi possível concluir o seguinte:

- Amostras com adição de 10% de óleo de soja resultaram em ligantes com maiores valores de compliância não recuperável. Isto porque, estas possuem viscosidade muito abaixo se comparadas a um ligante virgem (CAP 50/70). A viscosidade apresentou boa correlação com o parâmetro J_{nr} (que indica a resistência à deformação permanente), sendo assim, um indicador razoável de resistência à deformação permanente de ligantes asfálticos com RAP e com biorejuvenescedores a base de óleo de soja;

- Diferentemente da deformação permanente, as amostras com teores mais elevados de rejuvenescedor, tenderam a resistir mais ao dano por fadiga;
- J_{nr} e N_f apresentaram uma boa correlação com a penetração em todas as amostras. Apenas as amostras de ligantes com 15% do ligante do RAP não apresentaram boa correlação com a penetração e nem mesmo com o ponto de amolecimento;
- O índice de instabilidade coloidal não pareceu ser um bom indicador para estimar a vida de fadiga e a deformação permanente de ligantes asfálticos com RAP e biorejuvenescedor a base de óleo de soja.

A partir deste estudo, observou-se que a inclusão de teores muito elevados de biorejuvenescedor (óleo de soja puro) podem prejudicar a resistência à deformação permanente, porém, abre a possibilidade de sua aplicação em misturas asfálticas. A adoção de porcentagens de óleo relativamente baixas, próximas a 5%, provavelmente fará com que os valores de J_{nr} (resistência à deformação) e N_f (resistência à fadiga) se aproximem mais dos padrões convencionais.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (PRH-ANP) (PRH 31.1) – apoiado por recursos oriundos de investimentos realizados por petroleiras qualificadas na Cláusula de P,D&I da Resolução ANP nº 50/2015 – e pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), ao DNIT (TED 679/2020) e à Funcap (Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico), no âmbito do Programa Cientista Chefe (Ciência e Inovação na Infraestrutura Viária no Ceará), pelas bolsas de pesquisas concedidas a alguns dos autores.

REFERÊNCIAS

AASHTO (2022) *AASHTO M323-22: Performance-Graded Asphalt Binder*. Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials.

Abed, A.; N. Thom e D. Lo Presti (2018) Design considerations of high RAP-content asphalt produced at reduced temperatures. *Materials and Structures*, v. 51, n. 4, p. 91. DOI: 10.1617/s11527-018-1220-1.

Almeida Jr., P. O. B. (2022) *Reciclagem de Misturas 100% RAP: Investigação de Parâmetros para Avaliação e Dosagem de Agentes Rejuvenescedores com Foco na Fadiga*. Tese (doutorado). Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria.

Ameri, M.; A. Mansourkhaki e D. Daryaee (2018) Evaluation of fatigue behavior of high reclaimed asphalt binder mixes modified with rejuvenator and softer bitumen. *Construction & Building Materials*, v. 191, p. 702-712. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.09.182.

ASTM (2011) *ASTM D2172-11: Standard Test Methods for Quantitative Extraction of Bitumen From Bituminous Paving Mixtures*. West Conshohocken: ASTM.

ASTM (2015) *ASTM D 7405-15: Standard Test Method for Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR) of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer*. West Conshohocken: ASTM.

DNIT (2020) *DNIT 423: Pavimentação – Ligante Asfáltico – Fluência e Recuperação de Ligante Asfáltico Determinados Sob Tensões Múltiplas (MSCR) – Método de Ensaio*. Rio de Janeiro: DNIT.

DNIT (2022) *DNIT 439: Pavimentação – Ligante Asfáltico – Avaliação da Resistência à Fadiga de Ligantes Asfálticos Usando Varredura de Amplitude Linear (LAS – Linear Amplitude Sweep – Método de Ensaio*. Rio de Janeiro: DNIT.

Ferreira, W. (2021) *Degree of rap binder activation and its impact on recycled asphalt mixture design*. Tese (doutorado). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE. Disponível em: <http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/60108>. (acesso em 21/03/2023).

Giustozzi, F.; M. Crispino; E. Toraldo et al. (2015) Mix design of polymer-modified and fiber-reinforced warm-mix asphalts with high amount of reclaimed asphalt pavement. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 2523, n. 1, p. 3-10. DOI: 10.3141/2523-01.

Huang, B.; X. Shu e D. Vukosavljevic (2011) Laboratory investigation of cracking resistance of hot-mix asphalt field mixtures containing screened reclaimed asphalt pavement. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 23, n. 11, p. 1535-1543. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000223.

Kuang, D.; W. Liu; Y. Xiao et al. (2019) Study on the rejuvenating mechanism in aged asphalt binder with mono-component modified rejuvenators. *Construction & Building Materials*, v. 223, p. 986-993. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.330.

Lesueur, D. (2009) The colloidal structure of bitumen: Consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification, *Advances in Colloid and Interface Science*, v. 145, n. 1-2, p. 42-82. http://doi.org/10.1016/j.cis.2008.08.011 PMid:19012871.

Liu, H.; W. Zeiada; G.G. Al-Khateeb et al. (2021) Use of the multiple stress creep recovery (MSCR) test to characterize the rutting potential of asphalt binders: a literature review. *Construction & Building Materials*, v. 269, p. 121320. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121320.

Mangiafico, S.; H. Di Benedetto; C. Sauzéat et al. (2016) Effect of colloidal structure of bituminous binder blends on linear viscoelastic behaviour of mixtures containing Reclaimed Asphalt Pavement, *Materials & Design*, v. 111, p. 126-39. http://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.07.124.

Moghaddam, T. e H. Baaj. (2016) The use of rejuvenating agents in production of recycled hot mix asphalt: a systematic review. *Construction & Building Materials*, v. 114, p. 805-816. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.04.015.

Nascimento, L.A.H. (2016) P*revisão da Vida de Fadiga a Partir do Modelo S-VECD*. Fortaleza: Departamento de Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará. Apresentação.

Olivieri, G.V.; J.V. De Quadros Jr. e R. Giudici (2020) Epoxidation reaction of soybean oil: experimental study and comprehensive kinetic modeling. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, v. 59, n. 42, p. 18808-18823. DOI: 10.1021/acs.iecr.0c03847.

Raul, C.M. (2019) *Avaliação a Nível de Ligantes da Aplicabilidade de Material Fresado na Execução de Misturas Asfalticas Antirreflexão de Trincas.* Dissertação (mestrado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo. DOI: 10.11606/D.3.2020.tde-07012020-153048.

Shen, J.; S. Amirkhanian e B. Tang (2007) Effects of rejuvenator on performance-based properties of rejuvenated asphalt binder and mixtures. *Construction & Building Materials*, v. 121, n. 5, p. 236-245. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2006.03.006.

Silva, J. P. S. (2011) *Avaliação dos Efeitos de Produtos Rejuvenescedores em Misturas Asfálticas*. Tese (doutorado). Universidade de Brasília. Brasília. Disponível em: <http://repositorio2.unb.br/jspui/handle/10482/8705>. (acesso em 21/03/2023).

Silva, S. (2005). *Contribuição ao Estudo do Envelhecimento de Ligantes Asfálticos: Influência da Adição de Polímeros e Comportamento Frente à Radiação UV*. Tese (doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. Disponível em: < http://hdl.handle.net/10183/7349>. (acesso em 21/03/2023)

Takahashi, M. (2020) *Avaliação do Envelhecimento e Rejuvenescimento de Ligantes Asfalticos*. Dissertação (mestrado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo. DOI: 10.11606/D.3.2020.tde-25012021-101332.

Uchoa, A.; W. Rocha; J. Feitosa et al. (2021) Bio-based palm oil as na additive for asphalt binder: chemical characterization and rheological properties, *Construction & Building Materials*, v. 285, p. 122883.

Wang, C. e Y. Wang (2019) Physico-chemo-rheological characterization of neat and polymer-modified asphalt binders, *Construction & Building Materials*, v. 199, p. 471-482. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.12.064

You, Z.; J. Mills-Beale; J. Foley et al. (2011) Nanoclay-modified asphalt materials: Preparation and characterization, *Construction & Building Materials*, v. 25, n. 2, p. 1072-8. http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.070.

Zargar, M.; E. Ahmadinia; H. Asli et al. (2012) Investigation of the possibility of using waste cooking oil as a rejuvenating agent for aged bitumen, *Journal of Hazardous Materials*, v. 233-234, p. 254-258. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2012.06.021. PMid:22818590.

Zaumanis, M.; R.B. Mallick e R. Frank (2014) 100% Recycled hot mix asphalt: a review and analysis. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 92, p. 230-245. DOI: 10.1016/j.resconrec.2014.07.007.

Zhang, J.; A.N.M. Faruk; P. Karki et al. (2016) Relating asphalt binder elastic recovery properties to HMA cracking and fracture properties. *Construction & Building Materials*, v. 21, p. 958-964. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.05.157.

Zhou, Z.; X. Gu; Q. Dong et al. (2019) Rutting and fatigue cracking performance of SBS-RAP blended binders with a rejuvenator, *Construction & Building Materials*, v. 203, p. 294-303. http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.119.