

UTILIZAÇÃO DE RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT E PLÁSTICO RECICLADO EM MISTURAS ASFÁLTICAS SUSTENTÁVEIS

RESUMO

A utilização de materiais reciclados nas rodovias brasileiras ainda é escassa. O próprio Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) proveniente da rodovia e que é um material nobre, ainda é pouco explorado. O objetivo deste trabalho é demonstrar o benefício da utilização de materiais reciclados tanto o RAP, como outros materiais reciclados, como é o caso do plástico pós consumo, na elaboração de misturas sustentáveis e resistentes quanto aos dois principais defeitos do pavimento, a deformação permanente e ao dano por fadiga. Para isto foram realizados ensaios laboratoriais em três misturas asfálticas, duas misturas com o cimento asfáltico de petróleo (CAP) 30/45 e outra com CAP modificado pela adição de plástico. A primeira mistura com CAP 30/45 foi utilizada como referência, dosada com agregados virgens (CA 1). A segunda mistura foi dosada com CAP 30/45 e foi adicionado 30% de RAP (CA 2), e a terceira mistura foi dosada com CAP modificado por plástico e foi adicionado 30% de RAP (CA 3). Para análise das misturas foram realizados ensaios de Módulo Dinâmico (MD), Stress Sweep Rutting (SSR), Fadiga Tração Compressão (FTC) e os resultados destes ensaios foram utilizados para alimentar o software FlexPaveTM. A incorporação do RAP nas misturas melhorou o desempenho tanto da mistura com CAP 30/45 quanto da mistura com CAP modificado. No caso da mistura CA 3 foi observado um grande benefício no desempenho a deformação permanente e na análise ao dano por fadiga, provando que misturas sustentáveis podem ser resistentes e eficientes.

PALAVRAS CHAVES: Sustentabilidade; RAP; Plástico reciclado; Misturas asfálticas.

ABSTRACT

The use of recycled materials on Brazilian highways is still scarce. Reclaimed Asphalt Pavement (RAP), which comes from the highway and is a noble material, is still little explored. The objective of this work is to demonstrate the benefit of using recycled materials, both RAP and other recycled materials, such as post-consumer plastic, in the development of sustainable and resistant mixtures in relation to the two main pavement defects, permanent deformation and fatigue damage. For this, laboratory tests were carried out on three asphalt mixtures, two mixtures with petroleum asphalt cement (CAP) 30/45 and another with CAP modified by the addition of plastic. The first mixture with CAP 30/45 was used as a reference, dosed with virgin aggregates (CA 1). The second mixture was dosed with CAP 30/45 and 30% RAP (CA 2) was added, and the third mixture was dosed with plastic-modified CAP and 30% RAP (CA 3). To analyze the mixtures, Dynamic Modulus (MD), Stress Sweep Rutting (SSR), Tension-Compression Fatigue (FTC) tests were carried out and the results of these tests were used to feed the FlexPaveTM software. The incorporation of RAP into the mixtures improved the performance of both the mixture with CAP 30/45 and the mixture with modified CAP. In the case of the CA 3 mixture, a great benefit was observed in permanent deformation performance and in the analysis of fatigue damage, proving that sustainable mixtures can be resistant and efficient.

1. INTRODUÇÃO

Todos os anos a Confederação Nacional do Transporte (CNT) (1), divulga um relatório sobre as condições da malha rodoviária do pavimento nacional. A cada novo relatório são observadas

mais rodovias com problemas e defeitos que prejudicam a todos, desde os usuários até os administradores destas que precisam investir mais para manter as condições mínimas de trafegabilidade. Técnicas mais sustentáveis e que permitam que os pavimentos tenham uma vida útil maior é de grande necessidade nesse contexto atual.

O Brasil ainda carece de normativas e guias que exemplifiquem e contribuam para a execução de pavimentos mais sustentáveis. Em muitos casos ainda há dúvidas do que seria um pavimento sustentável. Segundo o Departamento de Transportes dos Estados Unidos (2), um pavimento é sustentável quando em uma escala ampla atende às necessidades básicas a que foi proposto, utiliza recursos de forma eficaz e preserva ou restaura os ecossistemas circundantes.

Em 2019, Muench and Adam (3) publicaram um guia prático com algumas medidas que podem ser adotadas para a construção de pavimentos mais sustentáveis. Neste guia há medidas simples desde a utilização de agregados que estejam mais próximos da obra, evitando longos transportes até a utilização de grandes porcentagens de RAP que requer toda uma preparação da usina e um custo mais elevado de adequação.

O grande desafio em construir pavimentos asfálticos sustentáveis é que a produção de asfalto consome muita energia e emite gases do efeito estufa, o que impacta negativamente no potencial de aquecimento global e no meio ambiente. Sendo essencial para melhorar a sustentabilidade dos pavimentos asfálticos, a redução dos níveis de energia e de emissões, reduzindo a utilização de materiais virgens e prolongando a vida útil das misturas asfálticas.

Uma das estratégias mais populares para diminuição do impacto ambiental é a utilização do RAP. Este material pode substituir tanto o agregado virgem quanto uma parcela do ligante asfáltico, que sabemos serem materiais não renováveis e finitos. Contudo, sempre tem que se ter em mente que qualquer proposta que for utilizada precisa ser bem estudada para que no final não acabe prejudicando o processo ou a qualidade do pavimento final.

Além do fresado que é proveniente das próprias rodovias, outros resíduos também podem ser utilizados, como da construção civil ou de outras indústrias como é o caso do plástico. Uma enorme quantidade de plástico é produzida no mundo (milhões de toneladas) todos os anos e recentemente a Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) publicou um relatório sobre a produção, utilização e eliminação de plásticos (4), destacando que menos de 10 % dos plásticos produzidos em todo o mundo são reciclados. Em 2019, o nível de resíduos gerados pelas 460 milhões de toneladas de plásticos produzidos em todo o mundo

foi de 353 milhões de toneladas (4), e muita parte deste resíduo acaba parando em locais inapropriados de descarte. Assim, soluções eficientes e ecológicas para o aproveitamento desses resíduos são essenciais.

A relação entre sustentabilidade e reciclagem traz benefícios não só para a sustentabilidade ambiental, mas também para o bem-estar social e o desenvolvimento. A reciclagem possibilita a destinação adequada dos resíduos, além de reduzir gastos com limpeza pública e urbana. Incentivar a coleta seletiva gera renda através da venda de materiais recicláveis, consequentemente gerando trabalho e renda através da logística reversa. O reaproveitamento de materiais pode ser uma ótima oportunidade para criar pavimentos sustentáveis e mais econômicos.

Vale lembrar que os pavimentos asfálticos são projetados para ter capacidade estrutural para suportar os esforços repetitivos do tráfego de veículos ao longo da vida útil. Contudo, é comum observar a deterioração precoce desses pavimentos, comprometendo o conforto, a segurança e a trafegabilidade dos usuários, como mencionado anteriormente.

Entre os principais problemas encontrados está o dano por fadiga e a deformação permanente. A deformação permanente é caracterizada pelo afundamento longitudinal do pavimento asfáltico, quando submetido a cargas de elevada tensão. A fadiga corresponde ao processo de alteração progressiva, localizada em um ou mais pontos, caracterizada por fissuras ou ruptura completa devido às amplitudes de tensões e deformações variáveis.

Com todos estes pontos em mente este estudo visa apresentar que é possível criar pavimentos sustentáveis e ainda em laboratório ter uma tomada de decisão mais assertiva evitando desperdícios e retrabalhos.

2. OBJETIVO E METODOLOGIA DO ESTUDO

Este estudo objetivou avaliar e comparar o desempenho de uma mistura referência dosada com CAP 30/45 e agregado virgem (CA 1). Uma mistura com CAP 30/45 e adição 30% de RAP (CA 2) e por fim uma mistura que alinha dois pontos de sustentabilidade, a utilização do material fresado (30%) e a modificação do CAP pela inserção de plástico reciclado (CA 3), a fim de demonstrar que é possível criar soluções sustentáveis e resilientes para melhorar a infraestrutura do pavimento.

Para atingir o objetivo proposto foram avaliados os desempenhos à fadiga e à deformação

permanente das misturas asfálticas, com ensaios que compreenderam tanto o comportamento do ligante quanto da mistura. Para demonstrar o benefício da utilização de ensaios e análises mais avançadas da engenharia foram realizadas previsões no software FlexPave™, para determinar a resposta ao dano à fadiga e à deformação permanente de cada mistura asfáltica.

3. MATERIAS UTILIZADOS

As misturas avaliadas foram produzidas seguindo o projeto de dosagem Marshall. Produzidas com a mesma curva granulométrica e mesmo agregado virgem, um basalto normalmente utilizado na construção de pavimentos localizados na região central do Brasil. Para as três misturas também foi utilizado o mesmo RAP, que foi fornecido por uma concessão o interior paulista.

Inicialmente foram realizados os ensaios de caracterização do RAP para compreender quais eram as propriedades do material. Para a dosagem foi utilizado somente o material passante da peneira #3/4. O teor de asfalto encontrado no fresado foi de 4,8% (5), a granulometria do material é apresentada na Figura 1, antes e após a extração, A Tabela 1 apresenta as características do ligante recuperado do RAP.

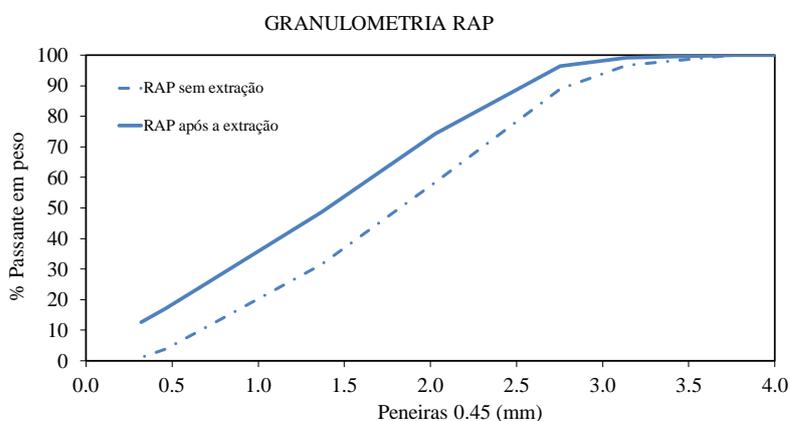


Figura 1: Granulometria RAP.

Tabela 1: Características do ligante asfáltico recuperado do RAP.

Amostra	Recuperação Elástica (%)	Ponto de Amolecimento (C)	Penetração (dmm)	PG	LAS	MSCR
Ligante Recuperado	31	75	20	82 -16	1.02	0.05

Para a dosagem das misturas o fresado foi colocado em estufa a 60°C por 24 horas para retirar

a umidade contida na amostra, e posteriormente foi misturado juntamente com os agregados que estavam na temperatura usual, ou seja 10 °C acima da temperatura do ligante, no misturador BBMAX 25 MLCPC por 2 min para homogeneização da massa. Após esse período era adicionada a porcentagem de CAP requerida.

Após a usinagem das misturas, e antes da fabricação dos corpos de prova, as misturas foram mantidas em estufa por duas horas na temperatura de compactação para simular o envelhecimento de curto prazo. As principais características de cada mistura são apresentadas na Tabela 2. A Faixa granulométrica utilizada é apresentada na Figura 2, foi utilizada a Faixa C do DNIT (6).

Tabela 2: Características das misturas asfálticas.

Mistura	% Ligante Adicionado	% Ligante Recuperado	% Ligante Total	Gmm (g/cm ³)	Gmb (g/cm ³)	Vv (%)	VAM (%)	RBV (%)	Estabilidade (Kgf)
CA 1	4.9	-	4.9	2.487	2.387	4.0	15.7	74.3	1025
CA 2	3.5	1.4	4.9	2.419	2.516	3.8	15.6	77	1164
CA 3	3.7	1.4	5.1	2.409	2.498	3.8	16.1	78	1102

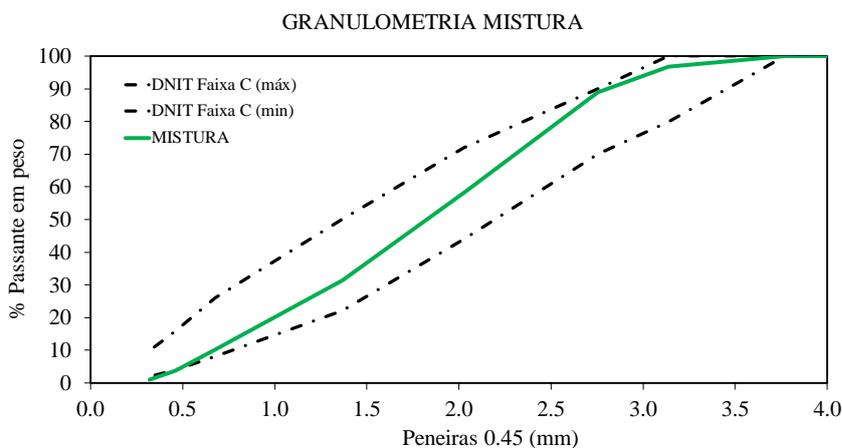


Figura 2: Granulometria das misturas.

Dos resultados apresentados na Tabela 2 é importante destacar que a utilização de 30% de RAP na mistura asfáltica diminui em 1,4% o teor de ligante adicionado para este estudo, vale lembrar que o RAP tende a ser heterogêneo e é preciso fazer acompanhamentos constantes para saber as características do material. O reaproveitamento do ligante do RAP, por exemplo, neste estudo se fosse considerado 1 km de rodovia construída em pista dupla e 5 cm de espessura em 10 toneladas aproximadas de produto virgem, além dessa economia a mistura se torna mais sustentável pelo reaproveitando de um material não renovável e reduzindo a produção do produto bruto que gera uma alta emissão de gases do efeito estufa.

4. PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental compreendeu seis etapas principais: (i) produção do ligante asfáltico modificado com resíduo plástico; (ii) determinação das propriedades reológicas dos ligantes asfálticos; (iii) determinação das propriedades viscoelásticas lineares das misturas; (iv) caracterização ao dano por fadiga das misturas asfálticas; (v) caracterização ao dano à deformação permanente das misturas e (vi) análises no software FlexPAVETM. Essas etapas são detalhadas abaixo.

4.1 Produção do ligante asfáltico modificado por resíduos plásticos

O plástico utilizado na pesquisa foi o Polietileno de Baixa Densidade (PEBD). Inicialmente esse material foi recolhido e separado por uma cooperativa de reciclagem. O material selecionado passa por um processo que transforma as embalagens em pequenas partículas chamadas de péletes, A Figura 3 apresenta a amostra original até a amostra final.



Figura 3. Amostra do resíduo plástico.

Para a incorporação dos resíduos plásticos no CAP, foi utilizada uma unidade piloto que é composta por dois tanques com capacidade de 10 litros, aquecidos com resistência elétrica (máximo 300°C) e linhas de circulação aquecidas com óleo térmico. Além disso, a unidade piloto é composta por uma bomba de engrenagens cuja velocidade é controlada por um inversor de frequência e um moinho tipo cônico para promover melhor cisalhamento e homogeneização da mistura. Durante todo o processo o agitador permaneceu ligado para promover a dissolução dos resíduos plásticos.

4.2. Caracterização dos Ligantes Asfálticos

Os ligantes asfálticos utilizados na pesquisa foram avaliados tanto pelos ensaios empíricos que são amplamente utilizadas no Brasil, e que ainda são utilizadas pela Agência Nacional de

Petróleo e Gás (ANP) (7), para classificar os ligantes quanto pela metodologia Superpave. Para compreender melhor o comportamento das misturas foi analisado o ligante produzido e o ligante extraído da mistura de ligante virgem mais a porcentagem do ligante pertencente ao material fresado.

4.2. Determinação das Propriedades Viscoelásticas Lineares das Misturas Asfálticas

Para determinação das propriedades viscoelásticas lineares das misturas asfálticas foi realizado o ensaio de módulo dinâmico (MD). O ensaio se baseia em uma varredura de temperatura e frequência e é usado para determinar o módulo complexo de misturas asfálticas. Neste ensaio, um corpo de prova de $5,5\% \pm 0,5\%$ de vazios, 100 mm de diâmetro de 150 mm de altura é submetida a um carregamento senoidal, por um determinado número de ciclos, com nível de carregamento, frequência e temperatura constantes. Nesta pesquisa, os ensaios de MD seguiram a especificação (8). Foram aplicadas seis frequências de 25 Hz, 10 Hz, 5 Hz, 1 Hz, 0,5 Hz e 0,1 Hz, da maior para a menor, e quatro temperaturas de 4 °C, 20 °C, 40 °C, e 54 °C, da menor para a maior. Para as análises uma amplitude de deformação alvo entre 50 e 70 $\mu\epsilon$ foi empregada, garantindo o comportamento viscoelástico linear do material. Para cada mistura avaliada foram ensaiadas três réplicas. Finalmente, as curvas mestras das misturas foram plotadas na temperatura de referência de 20 °C, usando o princípio de superposição tempo-temperatura.

4.3. Caracterização do Dano por Fadiga de Misturas Asfálticas

A teoria do dano contínuo viscoelástico simplificado (S-VECD) foi aplicada para definir a curva característica de dano das misturas asfálticas. A teoria é baseada em ensaios de carga de tração-compressão uniaxial com deformações controladas na amostra. Cinco corpos de prova de cada mistura contendo $5,5\% \pm 0,5\%$ de vazios de ar foram selecionados para caracterizar seu desempenho em termos ao dano por fadiga. A curva característica de dano de cada mistura relaciona a evolução do dano do material (S) ao seu respectivo módulo pseudo secante (C), também conhecido como integridade. O valor da pseudo rigidez é 1 quando o material está intacto e este valor diminui à medida que os danos se acumulam. Esta relação é independente do modo de carregamento, temperatura e amplitude de carregamento; portanto, é considerado uma propriedade fundamental do material.

Com base na teoria S-VECD, durante os ensaios de fadiga cíclica, assumiu-se que a falha ocorreu no ciclo (Nf) correspondente ao máximo valor do ângulo de fase. O critério de falha por fadiga proposto por Sabouri e Kim (9) foi adotado para determinar a taxa média de liberação

de energia de pseudo-deformação (GR) e avaliar o desempenho à fadiga das misturas. O critério de falha GR é baseado na observação experimental de que, quando o dano se acumula nos corpos de prova, o número de ciclos de carga tem uma relação de potência com a energia de pseudo-deformação dissipada acumulada (9). As configurações de teste e a análise S-VECD seguiram as recomendações da AASHTO T400 (10), (11; 12). Os resultados também foram utilizados para analisar o desempenho das misturas asfálticas no software FlexPAVE™.

4.4. Caracterização à Deformação Permanente de Misturas Asfálticas

O modelo viscoplástico Shift Model foi utilizado para avaliar a deformação permanente de misturas asfálticas. O modelo verifica o comportamento das misturas asfálticas em termos da deformação permanente. O Modelo Shift foi desenvolvido para capturar os efeitos da tensão desvio, tempo de carregamento e temperatura na deformação permanente de misturas asfálticas.

O protocolo de teste Stress Sweep Rutting (SSR) foi utilizado para avaliar o desempenho da deformação permanente seguindo as recomendações da AASHTO TP134 (13). Quatro corpos de prova de cada mistura contendo $7,0\% \pm 0,5\%$ de vazios de ar foram selecionados para caracterizar seu desempenho de deformação permanente, sendo dois corpos de prova ensaiados em alta temperatura (54°C) e outros dois corpos de prova ensaiados em baixa temperatura (20°C), com mesma tensão confiante de 69 kPa.

4.5. Análises das Misturas Asfálticas no software FlexPAVE™

Simulações para análise do desempenho das misturas asfálticas, a fim prever o comportamento das misturas, foram realizadas utilizando o software FlexPave™. O software FlexPAVE™ é uma ferramenta bem estabelecida que simula a resposta do pavimento considerando o comportamento viscoelástico linear do material com danos, incorporando dados do modelo S-VECD e do modelo Shift Model. O software considera cargas móveis, variação diária e sazonal de temperatura (14). O software foi gentilmente cedido pelo grupo de pesquisa da North Carolina State University (NCSU).

O objetivo da utilização do software é demonstrar que é possível criar misturas sustentáveis e resistentes quanto ao desempenho ao dano à fadiga e a deformação permanente. As análises foram feitas na camada asfáltica levando em consideração, o clima, o tráfego do local e a velocidade da via. O FlexPAVE™ vem ganhando destaque nos últimos anos, sendo utilizado em diversas pesquisas nacionais (11; 14; 15; 16; 17), apresentando boa capacidade de previsão do desempenho em campo.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção foi dividida em cinco tópicos: ligante asfáltico, propriedades viscoelásticas lineares, desempenho ao dano por fadiga e ao dano à deformação permanente e simulações no FlexPAVE™ das misturas asfálticas.

5.1. Caracterização dos Ligantes Asfálticos

A Tabela 3 apresenta a caracterização dos ligantes produzidos utilizados no estudo e a Tabela 4 apresenta a caracterização do ligante final encontrado em cada mistura.

Tabela 3: Características dos ligantes adicionados na mistura.

Amostra	Recuperação Elástica (%)	Ponto de Amolecimento (°C)	Penetração (dmm)	Grau PG	LAS	MSCR
CAP 30/45	8	58	34	64 -16	1.40	2.21
CAP Plástico	76	73	46	76 -16	1.64	0.12

Tabela 4: Características dos ligantes resultantes de cada mistura.

Amostra	Recuperação Elástica (%)	Ponto de Amolecimento (°C)	Penetração (dmm)	Grau PG	LAS (19 °C)	MSCR (64°C) Jnr3.2
CA 1 (CAP 30/45)	8	58	34	64 -16	1.40	2.21
CA 2 (CAP 30/45 + RAP)	29	59	28	70 -10	1.38	1.67
CA 3 (PLÁSTICO + RAP)	49	66	24	76 -16	1.60	0.10

Como era de se esperar e devido as características do ligante do fresado apresentadas na Tabela 1, quando o fresado e o material virgem são misturados as propriedades do ligante inicialmente adicionado da mistura se modificam. Ambos ligantes estudados tiveram uma diminuição na penetração tornando-os mais rígidos, a recuperação elástica do CAP modificado por plástico diminui 35% e no caso do CAP 30/45 houve um aumento, isso porque o CAP 30/45 não tem propriedades elastoméricas e muito provavelmente o ligante do material fresado era um ligante modificado por polímero. No caso ao dano à fadiga do ligante que é analisado pelo ensaio LAS ambos resultados ligantes tiveram uma leve piora de desempenho. No caso da deformação permanente houve um aumento de desempenho, resultado que pode estar ligado a oxidação e o envelhecimento do RAP, um dos fatores que leva ao baixo uso desse material, devido as preocupações ao dano por fadiga e ao enrijecimento da mistura. É importante ressaltar que a adição do plástico no CAP melhorou as propriedades do produto tanto nos parâmetros de fadiga quanto de deformação.

5.2. Caracterização Viscoelástica das Misturas Asfálticas

A Figura 5 apresenta os resultados das curvas mestras de módulo dinâmico das misturas avaliadas na temperatura de referência de 20 °C. A Figura 6 apresenta a curva mestra do ângulo de fase na temperatura de referência.

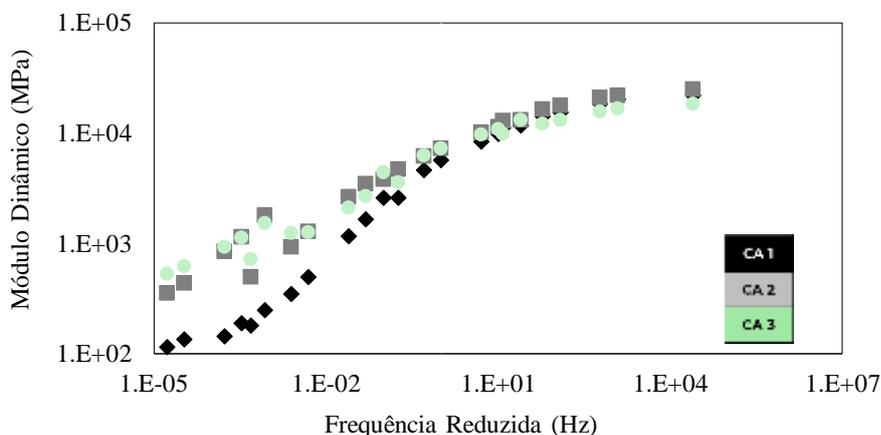


Figura 5: $|E^*|$ curvas mestre para as diferentes misturas (20 °C).

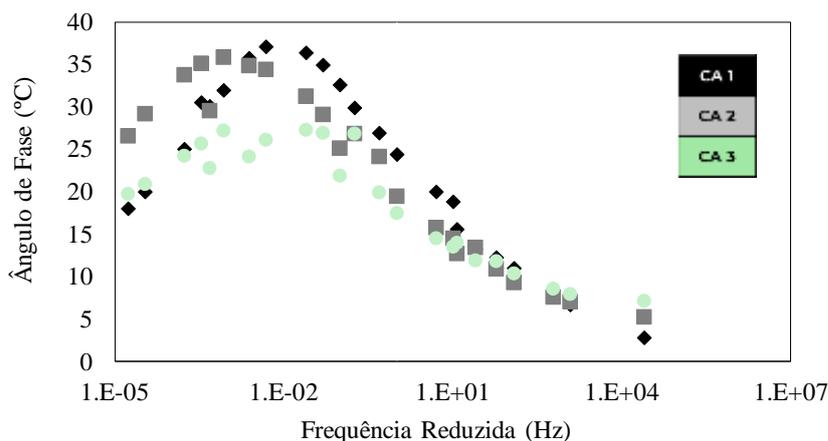


Figura 6: Curvas mestras de ângulo de fase para as diferentes misturas estudadas (20 °C).

A mistura CA 1 apresentou menores rigidezes para as frequências mais baixas, já as misturas que continham RAP apresentaram um aumento de rigidez principalmente nestas frequências. Sendo que a mistura CA 2 apresentou rigidez levemente superior a mistura CA 3. Nas altas frequências as três misturas apresentaram ângulos de fase semelhantes, mas nas frequências intermediárias é possível observar um acréscimo do ângulo de fase da mistura C1, ou seja, um comportamento mais viscoso, nas frequências mais baixas é observado um decréscimo no ângulo de fase da mistura CA 3, comportamento elástico. Estes resultados estão fortemente relacionados aos tipos de ligante utilizados em cada mistura.

5.3. Caracterização ao dano por fadiga

A Figura 7 apresenta as curvas características de Integridade *versus* Dano ($C \times S$) produzidas a partir da taxa de evolução do dano para as misturas analisadas. Para cada mistura, as curvas $C \times S$ realizadas em diferentes amplitudes de deformação foram semelhantes. Mas é possível reparar que a mistura CA 3 teve um melhor desempenho. A Figura 7 mostra a média de cinco réplicas em diferentes deformações para cada mistura na temperatura de 20°C.

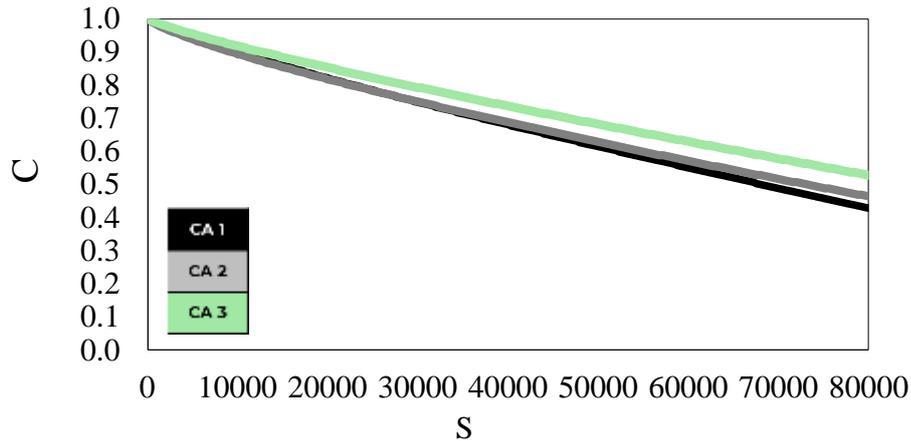


Figura 7. Curvas características de danos para as misturas estudadas.

A Tabela 5 apresenta os parâmetros do modelo S-VECD, para a expressão da taxa de liberação de energia de pseudo-deformação (G^R) e da curva característica do dano (C_{11} e C_{12}), e o expoente da função de evolução do dano (α) e a constante K_1 .

Os resultados para o critério de falha por fadiga G^R apresentaram fortes coeficientes de determinação ($R^2 > 0,994$), indicando que este critério de falha é uma ferramenta eficiente para representar o desempenho de misturas asfálticas em relação ao desempenho do dano por fadiga (Sabouri e Kim, 2014).

Tabela 5: Parâmetros S-VECD das misturas analisadas.

Mistura	C vs. S		G^R			α	k1
	C_{11}	C_{12}	γ	Δ	R^2		
CA 1	8.29E-05	7.77E-01	8.68E+06	-1.38E+00	0.994	3.507	0.294
CA 2	3.61E-05	8.40E-01	2.52E+06	-1.31E+00	0.998	3.937	0.273
CA 3	1.54E-04	7.23E-01	2.92E+06	-1.27E+00	1.000	4.569	0.262

Os parâmetros apresentados na Tabela 5 serão inseridos no software FlexPAVE™ para a previsão do comportamento das misturas e da evolução ao dano à fadiga.

5.4. Caracterização ao dano à deformação permanente

O ensaio Stress Sweep Ruttinf (SSR) foi executado em duas temperaturas, 54 °C temperatura alta (TL) e 20 °C temperatura baixa (TH). A Figura 8 e a Figura 9 mostram os resultados dos testes para essas diferentes temperaturas, respectivamente. Para cada mistura, duas réplicas foram testadas em TL e TH. Nas figuras são mostrados os resultados médios para cada mistura em cada temperatura.

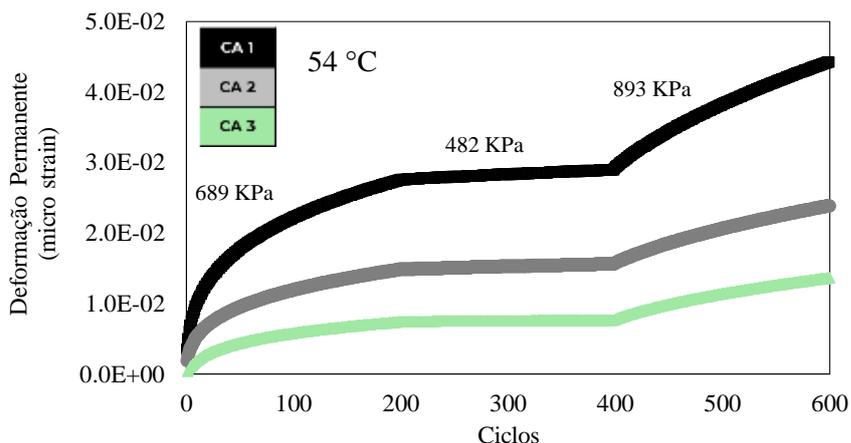


Figura 8. Resultados do teste SSR de alta temperatura (54 °C).

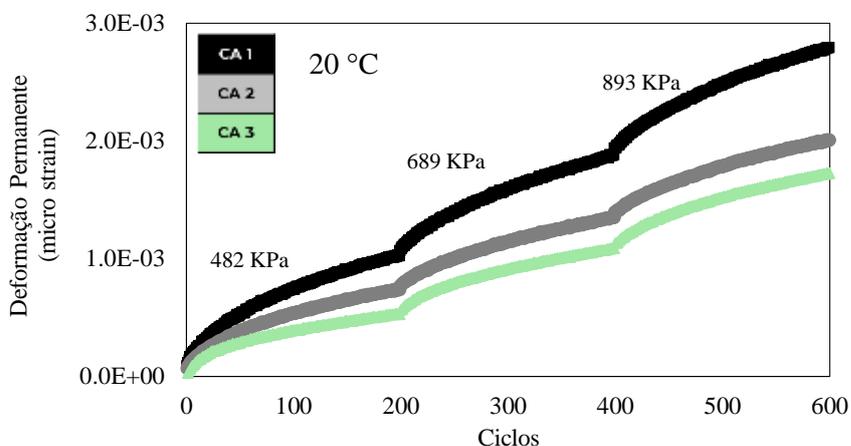


Figura 9. Resultados do teste SSR de baixa temperatura (20 °C).

A mistura CA 3 apresentou as menores deformações acumuladas na alta e baixa temperatura do ensaio SSR, estes resultados podem estar relacionados ao melhor desempenho do ligantes asfálticos modificados com resíduos plásticos. A Tabela 6 apresenta os parâmetros do Shift Model que foram utilizados nas simulações com o software FlexPaveTM para previsão da evolução da deformação permanente.

Tabela 6. Parâmetros do Shift Modell do ensaio SSR.

Mistura	ϵ_0	N1	β	p_1	p_2	d_1	d_2
CA 1	1.77E-03	2.04	0.59	0.65	0.26	0.11	-1.60
CA 2	2.84E-03	1.12	0.69	0.65	0.30	0.13	-2.00
CA 3	1.70E-03	4.82	0.64	0.51	0.20	0.12	-1.42

5.5 Avaliação do desempenho das misturas asfálticas no Software FlexPAVE™

Para avaliar o desempenho das misturas a longo prazo foi analisada somente a camada do revestimento asfáltico nas simulações realizadas no software FlexPAVE™. A estrutura considerada nas simulações é apresentada na Figura 10. A estrutura possui 50 mm de revestimento asfáltico, 200 mm de base, 200 mm de sub-base e o subleito. O pavimento foi avaliado para um tráfego anual de 1×10^7 ESAL, uma velocidade de 80 km/h para uma vida útil de projeto de 10 anos e para o clima de São Paulo.



Figura 10: Estrutura do pavimento utilizada nas simulações.

A Figura 11 apresenta os resultados da avaliação das misturas quanto ao dano à fadiga para a simulação no FlexPAVE™ e a Figura 12 mostra os gráficos de contornos. As simulações no FlexPAVE™ foram realizadas mantendo as camadas subjacentes ao revestimento e alterando somente os parâmetros da camada de revestimento.

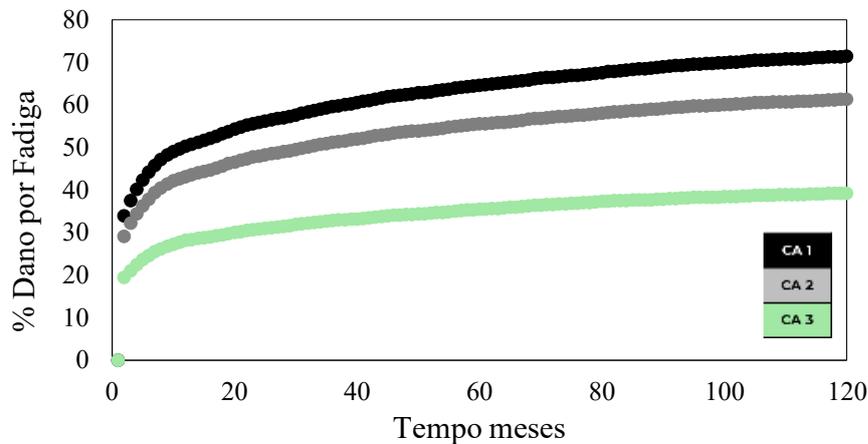


Figura 11: Evolução do dano por fadiga das misturas avaliadas.

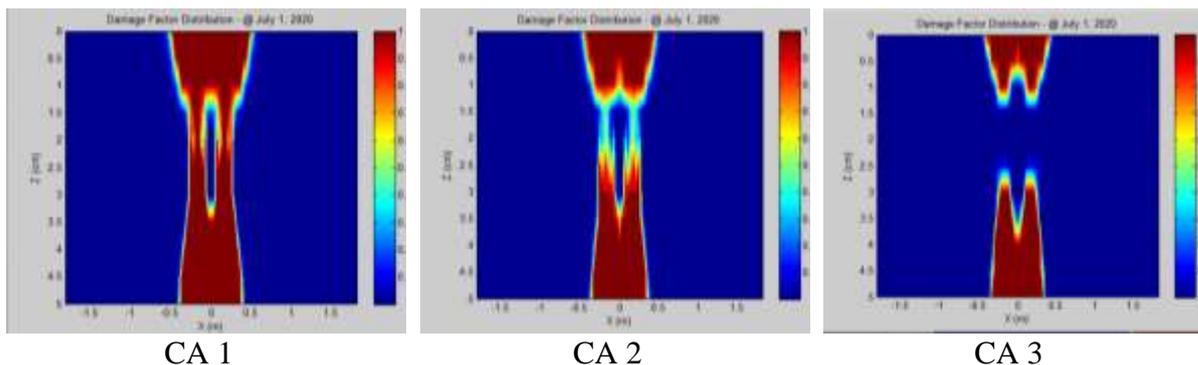


Figura 12: Contornos da evolução do dano por fadiga das misturas avaliadas.

A mistura CA 3 apresentou um desempenho superior as demais misturas, tendo em médio 30% a menos de área trincada ao final dos 120 meses de análise. Pela Figura 12 é possível observar que no caso da mistura CA 1 o dano à fadiga já atingiu um nível elevado interligando o dano da parte inferior e superior da camada. Quando adicionado o RAP na mistura houve uma melhora do desempenho da mistura CA 2. E como já comentado a mistura C3 teve o melhor desempenho e ao final da previsão o dano entre a parte inferior e superior da ainda não estavam unidos, demonstrando que a escolha correta da mistura pode fazer muita diferença no campo. A Figura 13 apresenta os resultados da avaliação das misturas quanto ao dano à deformação permanente para a simulação no FlexPAVE™.

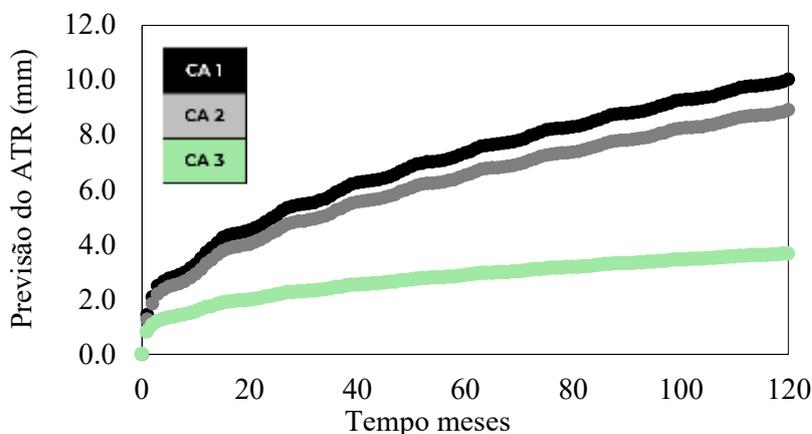


Figura 13: Previsão do Afundamento de trilha e roda no revestimento asfáltico.

Com base nos resultados da simulação para previsão do afundamento de trilha de roda, a mistura CA 3 com ligante modificado por resíduo-plástico apresentou o melhor desempenho, demonstrando que a incorporação de plástico endurece o ligante e melhora o desempenho das misturas para esta patologia. Neste estudo melhorou o desempenho quanto ao dano a fadiga também. Houve uma redução de mais de 50% na previsão do dano à deformação permanente quando utilizada a mistura produzida com 30% de RAP e CAP modificado por plástico

reciclado, o que demonstra que a utilização de materiais sustentáveis pode trazer grandes benefícios para a infraestrutura do pavimento.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo apresentou soluções sustentáveis e resistentes quanto as principais patologias do revestimento asfáltico. Por meio da aplicação de RAP e Plástico. Provando seu melhor desempenho em termos de engenharia e seu potencial ecológico.

Da análise dos dados obtidos no estudo, pode-se tirar as seguintes conclusões:

- As misturas que foram dosadas com adição de material fresado apresentaram um desempenho superior que a mistura de referência dosada somente com agregados virgens;
- A adição do RAP neste estudo demonstrou que pode ser reduzido em até 1,4% a adição do ligante virgem (aproximadamente 10 toneladas para 1 Km de rodovia), e ainda traz benefícios como a menor emissão de gases do efeito estufa, que é significativa na produção do CAP;
- O ligante asfáltico apresenta um papel significante no desempenho à fadiga e a deformação permanente das misturas asfálticas. O uso de diferentes ligantes resultou em variações de mais de 50% na previsão destes defeitos;
- O ligante modificado por plástico, assim como, a mistura com esse material apresentou desempenho superior, quanto ao dano à fadiga e à deformação permanente e a utilização desse material reciclado pode contribuir com muitos fatores, uma carga deste material (30 toneladas), utiliza cerca de 1200 kg de plástico o que equivale a mais de 50 mil embalagens de unidades plásticas, além de diminuir em 900 kg a emissão de gases de efeito estufa e uma redução de 1,2 toneladas de CAP virgem
- Para misturas asfálticas com diferentes misturas asfálticas e uma estrutura do pavimento foram modeladas utilizando FlexPAVE™ e o critério de falha GR para fissuração por fadiga e Shift Model para deformação permanente. As comparações entre os danos previstos pode ser uma forte ferramenta na tomada de decisão na escolha da melhor mistura a ser utilizada. Os resultados das simulações demonstram que é muito importante utilizar ensaios mais avançados que permitam compreender com maior propriedade o comportamento intrínseco do material.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao grupo de pesquisa da Carolina do North e ao Professor DR. Richard Kim por cederem o FlexPAVE™ para as simulações.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). Pesquisa CNT de rodovias 2023. – Brasília: CNT: SEST SENAT: ITL, 2023
2. U.S DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. Strategies for Improving the Sustainability Asphalt Pavements. Tech Brief, April. 2016.
3. STEPHEN T. Muench; ADAM J.T. Hand. Sustainable Asphalt Pavements: A Practical Guide Sustainability Specifics, 2019.
4. OECD, Global Plastics Outlook: Economic Drivers, Environmental Impacts and Policy Options, OECD Publishing, Paris, 2022. <https://doi.org/10.1787/de747aef-en>.
5. DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES DNIT 158 – ME. Misturas asfálticas - Determinação da porcentagem de betume em mistura asfáltica utilizando o extrator Soxhlet. Rio de Janeiro. 2011.
6. DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 031 - ES. Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de serviço. Rio de Janeiro. 2019.
7. AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. Resolução ANP Nº 897, de 18 de novembro de 2022 - DOU DE 24-11-2022. Dispõe sobre as especificações dos asfaltos e dos aditivos asfálticos de reciclagem para misturas à quente, e suas regras de comercialização em todo o território nacional.
8. DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 416 - ME. Pavimentação Asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação do módulo dinâmico – Método de ensaio. Rio de Janeiro. 2019.
9. SABOURI, M. KIM, Y. R. Development of a failure criterion for asphalt mixtures under different modes of fatigue loading. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. 2014. doi:10.3141/2447-13.
10. AASHTO T 400. Standard Method of Test for Determining the Damage Characteristic Curve and Failure Criterion Using the Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT) Cyclic Fatigue Test, Washigton, 2023.
11. NASCIMENTO, L. A. H. Implementation and Validation of the Viscoelastic Continuum Damage Theory for Asphalt Mixture and Pavement Analysis in Brazil. Tese de Doutorado, North Carolina State University, Raleigh, NC. 2015.
12. UNDERWOOD, B. S., 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. 2012.

13. AASHTO TP 134. Standard Method of Test for Stress Sweep Rutting (SSR) Test Using Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT), Washigton. 2022.
14. ESLAMINIA, M., THIRUNAVUKKARASU, S., GUDDATI, M. N., KIM, Y. R. Accelerated pavement performance modeling using layered viscoelastic analysis. Proceedings of the 7th International RILEM Conference on Cracking in Pavements, Delft, The Netherlands, NLD, 2012.
15. MOCELIN, D. M. Avaliação do Comportamento à Fadiga de Misturas Asfálticas Quentes e Mornas Através o Modelo de dano Contínuo Viscoelástico. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2018.
16. OSMARI, P. H. Characterization of the Fatigue Damage Behavior of Asphaltic Materials Based on Experimental Multiscale Approaches and on the S-VECD Theory. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2021.
17. L. M. BARROS, L. M., NASCIMENTO, L. A., ARAGÃO, F. S., UNDERWOOD, B. S., PIVETTA, F. C. Characterization of the Permanent Deformation of Asphalt Mixtures Based on Indexes and on Pavement Structural Performance. Construction and Building Materials 326(1):126555, 10.1016/j.conbuildmat.2022.126555. 2022.