COMPARAÇÃO DA EVOLUÇÃO DA DEFORMAÇÃO PERMANENTE DE MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS EM RELAÇÃO A UMA MISTURA TRADICIONAL

Thiago Marques da Frota
Universidade Federal do Ceará
Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes – PETRAN
Aline Cavalcanti Fialho Vale
Universidade Federal do Ceará
Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes – PETRAN
Juceline Batista dos Santos Bastos
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará
Programa de Pós-graduação em Tecnologia e Gestão Ambiental – PGTGA
Jorge Barbosa Soares
Universidade Federal do Ceará
Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes – PETRAN

Resumo: O Afundamento de Trilha de Roda (ATR) é um dos defeitos mais comuns em pavimentos asfálticos em regiões de clima quente. Nesse contexto, este artigo comparou a influência da adição de RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*) em relação a uma mistura tradicional na resistência à deformação permanente por meio da evolução de ATR de camadas de rolamento de pavimentos típicos do Ceará. Foram dosadas três misturas pela metodologia Superpave, sendo uma mistura de referência (Mref) e as demais misturas com adição de 11,4% (R15) e 22,8% (R30) de RAP em substituição a massa total da mistura. As misturas então foram caracterizadas quanto a rigidez, por meio do ensaio de Módulo Dinâmico (MD), e a deformação permanente, por meio do *Stress Sweep Rutting* (SSR), permitindo a previsão da evolução do ATR. Os resultados foram utilizados como *inputs* para o programa de dimensionamento CAP 3D-D. A predição da evolução de ATR indicou que a adição a mistura R30 resulta em menor suscetibilidade a essa falha ao longo da vida de serviço, mostrando que além dos ganhos econômicos e ambientais, há viabilidade técnica.

Palavras-chave: Afundamento de Trilha de Roda. Deformação permanente. *Reclaimed Asphalt Pavement*. Reciclagem de pavimentos. Sustentabilidade.

1 INTRODUÇÃO

O Afundamento de Trilha de Rodas (ATR) é um dos principais defeitos em revestimentos asfálticos no Brasil (Nascimento, 2008; Borges, 2014; Bastos *et al*., 2015; Vale, 2020; Barros, 2022). O ATR afeta diretamente o conforto e a segurança dos usuários, o que requer medidas de prevenção para o aumento da sua durabilidade. Bernucci *et al*. (2022) apontam que este fenômeno, quando ocorre somente no revestimento asfáltico, é resultado de uma combinação do fluxo do material, viscoelástico ou viscoplástico, e do dano nesse material, representado pela formação e propagação de trincas.

Diante do cenário nacional, surge a necessidade de construção de novas rodovias e da manutenção regular e periódica daquelas existentes e, consequentemente, o potencial aumento do consumo de matérias-primas. Desta forma, o reaproveitamento do resíduo proveniente da fresagem de camadas asfálticas, em inglês RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*), tem se tornado cada vez mais atrativo para o cenário brasileiro, não só pela diminuição dos custos, mas também pelo aspecto ambiental.

Segundo Williams *et al*. (2021), nos Estados Unidos, em 2020, o uso do fresado em novas misturas asfálticas possibilitou uma redução na emissão de gases de efeito estufa contabilizados em 2,3 milhões de toneladas de $CO2_e$ (equivalente a emissão anual de 510 mil veículos destinados ao transporte de passageiros). Em um estudo de caso da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) na produção de misturas asfálticas no Ceará, Frota *et al*. (2022) apontaram que a etapa de extração das matérias-primas virgens foi a que representou os maiores impactos ambientais negativos, ou seja, os ganhos ambientais são tão maiores quanto maior é a porcentagem de RAP na mistura.

Do ponto de vista do comportamento mecânico, estudos apontam que as misturas asfálticas contendo RAP são menos suscetíveis a deformação permanente, o que pode ser explicado pela alta rigidez do ligante já envelhecido (Kim *et al*., 2016). No entanto, os departamentos estaduais de transporte norte-americano expressaram preocupação com a falta de informações disponíveis sobre o uso de altas porcentagens (ou seja, superiores a 20%) de RAP em misturas e o desempenho subsequente do pavimento (Lo Presti *et al*., 2016).

Hoje, no Brasil, o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) adota o ensaio de *Flow Number*, DNIT-ME 184 (2018), como critério de ranqueamento e seleção prévia de misturas asfálticas ainda na dosagem quanto a resistência a deformação permanente, mas não considera a evolução desse fenômeno ao longo da vida útil do pavimento (DNIT, 2021). Com isso, surge a necessidade de uma investigação mais aprofundada com uso de novas metodologias capazes de avaliar como as camadas asfálticas se comportam com o tempo somado aos fatores das cargas e da temperatura por meio do ensaio SSR (*Stress Sweep Rutting*) (AASHTO, 2019; Vale, 2020).

Com a evolução das metodologias de ensaio e dos modelos para previsão da evolução do ATR, a implementação do modelo *shift model* foi realizada no CAP3D-D, programa de dimensionamento desenvolvido no Brasil (Vale *et al*., 2022).

O objetivo deste artigo é avaliar a evolução da deformação permanente no revestimento asfáltico, considerando estruturas típicas de pavimentos do estado do Ceará, com variação do teor de RAP nas camadas asfálticas por meio do ensaio SSR e do programa de dimensionamento CAP 3D-D.

2 MATERIAIS E MÉTODO

2.1 Materiais

Para atingir os objetivos deste trabalho, foram utilizadas 3 diferentes misturas asfálticas com diferentes teores de RAP. Para a composição destas misturas, o ligante asfáltico utilizado foi o CAP 50/70 com *Performance Grade* (PG) 64-XX (AASHTO, M 320-21), cedido pela Refinaria Lubrificantes e Derivados do Nordeste (Lubnor), à época da Petrobras, em Fortaleza – CE. Os agregados minerais de origem granítica e o RAP utilizados nesta pesquisa foram coletados na empresa Insttale Engenharia, localizada na Região Metropolitana de Fortaleza.

Em laboratório, o material fresado foi separado com auxílio de peneirador mecânico para se obter a sua fração miúda, ou seja, a porção passante na peneira 4,75mm, com teor de ligante de 5,9% (DNIT-ME 158/2011).

A dosagem da mistura de referência (Mref) seguiu a metodologia Superpave (AASHTO, M 323-17). Para as misturas recicladas a adição do RAP foi baseada no parâmetro RBR (*RAP Binder Ratio*), ou seja, proporção de ligante oriundo do RAP em relação ao total de ligante asfáltico na mistura. Assim, as misturas com RBR definidos em 15 e 30% foram denominadas R15 e R30, respectivamente. O teor de ligante para todas as misturas foi fixado em 4,5% e a curva granulométrica proposta foi adequada aos limites da Faixa C do DNIT 031/2006 (Figura 1). A Tabela 1 contém o resumo das principais características das misturas investigadas.

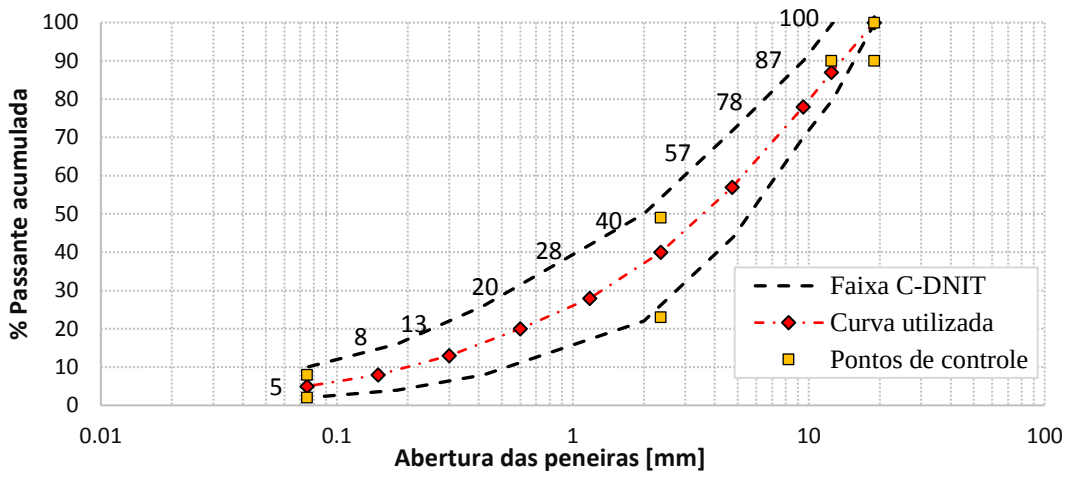

Figura 1 - Composição granulométrica das misturas asfálticas.

Fonte: Autores

Tabela 1 – Características das misturas investigadas.

Mistura	Ligante	Percentual de ligante (%)	Densidade máxima medida	Volume de vazios (Vv) de projeto (%)	RBR (%)
Mref			2,453		0
R15	50/70	4,5	2,442	4	15
R30			2,451		30

Fonte: Autores

As demais misturas também foram compactadas utilizando o compactador giratório Superpave, adotando a altura de 150mm e o diâmetro de 100mm. Os corpos de prova submetidos ao ensaio de Módulo Dinâmico (MD) e *Stress Sweep Rutting* (SSR) foram moldados com 4 ± 0,4% e 5,5 +0,5% de Vv, respectivamente. A temperatura de 150°C de pré-aquecimento do RAP foi definida conforme Pires (2018), assim como adaptações sugeridas por Gaspar (2019).

2.2 Método

Ensaio SSR e o *shift model*

Para a caracterização da deformação permanente nas misturas asfálticas, foi realizado o ensaio triaxial SSR (Kim e Kim, 2017; Vale *et al.*, 2022), numa prensa UTM – 25 (*Universal Testing Machine* - 25). O protocolo do ensaio considera a aplicação de 600 ciclos divididos em três blocos de 200 ciclos de aplicação de níveis de tensões verticais diferentes, considerando duas temperaturas distintas, e com aplicação de uma tensão confinante constante de 69kPa.

No ensaio realizado em alta temperatura (Th), definido em 47°C (Choi, 2013), são aplicados carregamentos com tensões verticais de 689, 483 e 896kPa. Em cada tensão, são aplicados 200 ciclos de carregamento com período de aplicação de carga de 0,4s e repouso de 3,6s. Uma curva de referência para predição de ATR é obtida a partir da modelagem dos primeiros 200 ciclos do ensaio em Th.

Na etapa do ensaio realizado em baixa temperatura (Tl), definido em 17°C (Choi, 2013), a ordem das tensões aplicadas passa a ser: 483, 689 e 896kPa. Além disso, para Tl, o período de aplicação de carga é de 0,4s com período de repouso de 1,6s.

Com os dados obtidos por meio do ensaio SSR, foi utilizado o *shift model*, que se baseia principalmente nas Equações (1), (2) e (3).

$$\varepsilon_{vp} = \frac{\varepsilon_0 \times N_{red}}{(N_1 + N_{red})^{\beta}} \tag{1}$$

$$a_{\xi_p} = p_1 \, log \, log \, (\xi_p) \; + p_2 \tag{2}$$

$$a_{\sigma_v} = d_1 \left(\frac{\sigma_v}{p_a}\right)^{d_2} \tag{3}$$

Onde:
ε_{vp} = deformação viscoplástica (permanente),
$\varepsilon 0$, N_1, β = coeficientes do modelo,
Nred = número de ciclos reduzidos na condição de carregamento de referência,
$a_{\xi p}$ = fator de ajuste de redução do tempo de aplicação de carga,
ξ_p = tempo de carregamento reduzido,
p1 e p2 = coeficientes do fator de ajuste de redução do tempo de aplicação de carga,
$a_{\sigma v}$ = fator de ajuste de tensão vertical,
σ_v = tensão vertical, e
d1 e d2 = coeficientes do fator de ajuste de tensão aplicada.

Programa de dimensionamento CAP 3D-D

O CAP 3D-D, programa de dimensionamento de pavimentos desenvolvido pelo grupo de pesquisa da UFC (Holanda *et al*., 2006; Torquato e Silva *et al*., 2014; Vale *et al*., 2022), foi usado para realizar as simulações e comparar a evolução do ATR ao longo do tempo para as misturas deste artigo. Foi utilizada uma estrutura padrão composta por materiais de base, sub-base e subleito típicos da região, conforme detalhado em Cabral *et al.* (2021). A camada de base é uma mistura estabilizada granulometricamente composta por uma Brita Graduada Simples (BGS) e Areia Branca (AB), a sub-base é composta pela AB e o subleito por um solo do Nordeste, denominado M1. Os coeficientes do modelo para as camadas granulares estão descritos na Tabela 2 (Cabral *et al.*, 2021).

Tabela 2 – Coeficientes do modelo de DP para as camadas granulares

Camada	Material	K1	K2	K3	K4
Sub-base	AB	0,7227	0,1770	-0,2117	0,0887
Base	BGS+AB	1,1464	0,2460	-0,1518	0,0191
Subleito	M1	0,3156	0,5433	-0,3740	0,1970

Fonte: Autores

A estrutura considerada para as simulações está ilustrada na Figura 2. Foi utilizado um número N que representa um volume de tráfego médio (5×10^6) e um crescimento linear de 2% ao ano. Também foram fixados a velocidade com 60km/h, o eixo padrão (20kN) e foi definida uma temperatura constante de 27°C, que representa a temperatura média do estado do Ceará (CLIMA: CEARÁ, 2022). Para realização das simulações e correspondentes previsões de ATR, foram necessários os resultados do ensaio de Módulo Dinâmico (DNIT-ME 416/2019), que

indicam a rigidez do material e possuem influência no comportamento das misturas quanto à DP.

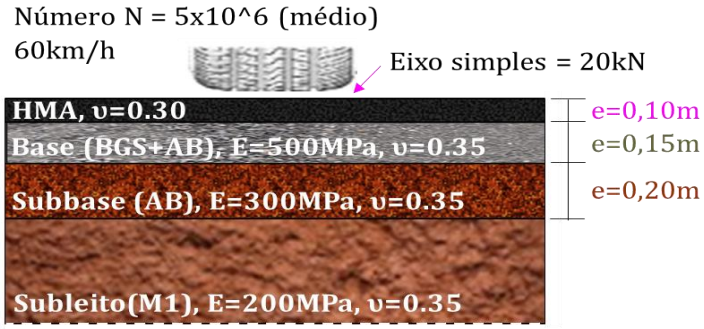

Figura 2 – Estrutura padrão considerada para simulações de dimensionamento do pavimento

Fonte: Autores

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Módulo Dinâmico

Na Figura 3 são apresentadas as curvas mestras segmentadas por temperatura, por meio dos pontos experimentais, e as curvas sigmodais de todas as misturas (Mref, R15 e R30).

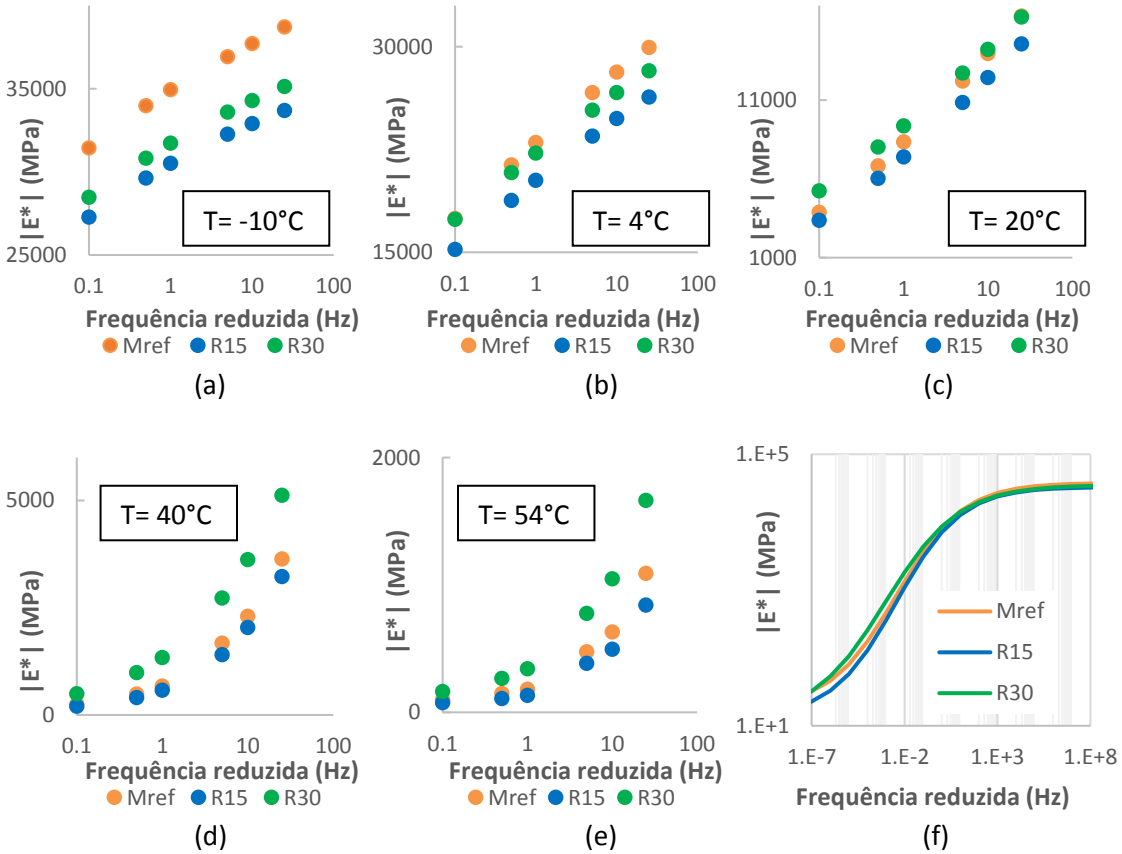

Figura 3 – Módulo dinâmico experimentais em todas as temperaturas de ensaio (a, b, c, d, e) e curvas sigmodais (f).

Fonte: Autores

A mistura R15 apresentou menor rigidez entre todas as misturas nas temperaturas de 20 a 54°C, frequências mais baixas de ensaio, enquanto a mistura R30 apresentou maior rigidez nestas mesmas condições. Sabe-se que a deformação permanente ocorre mais em temperaturas elevadas, então a rigidez mais elevada da mistura R30 nestas condições, pode ser um indicativo de melhor resistência à deformação permanente. Nas baixas temperaturas, Mref apresentou módulos mais elevados em -10°C e rigidez semelhantes a R30 a 4°C.

Foram obtidos ainda, por meio do ensaio de Módulo Dinâmico, os coeficientes do modelo Sigmoidal que foram usados no programa de dimensionamento (Tabela 3).

Tabela 3 – Coeficientes do Módulo Dinâmico

Mistura	a	b	d	g	a1	a2	a3
Mref	1,27199	3,30687	1,36912	0,56259	0,00098	-0,18527	3,47008
R15	1,12845	3,39010	1,40652	0,57526	0,00094	-0,18160	3,41027
R30	1,10764	3,43786	1,53406	0,50800	0,00104	-0,18514	3,44262

Fonte: Autores

3.2 Deformação Permanente

As Figuras 3, 4 e 5 contêm os resultados do ensaio SSR das misturas desta pesquisa. É possível observar que a deformação permanente ao final dos 600 ciclos foi mais elevada para a mistura de referência (Mref) (0,0195με) e houve uma diminuição dessa deformação com o acréscimo de RAP na mistura, sendo menores 23 e 35%, respectivamente, para R15 e R30.

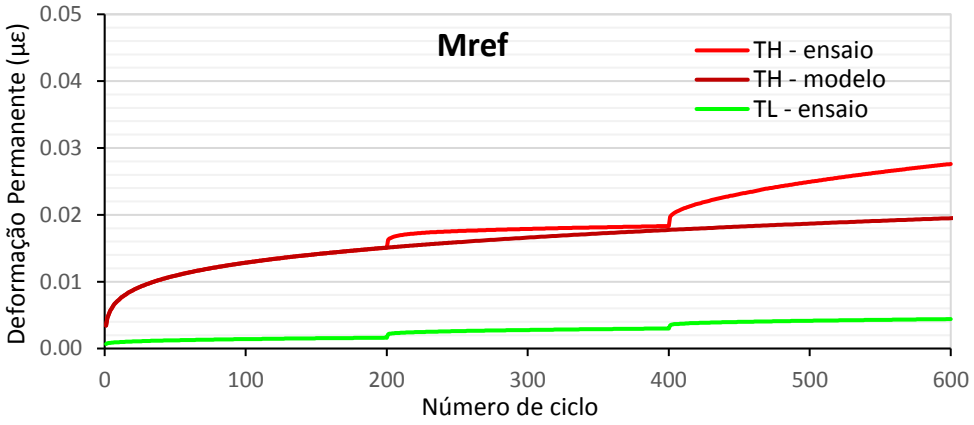

Figura 3 – Resultados do ensaio SSR para a mistura Mref

Fonte: Autores

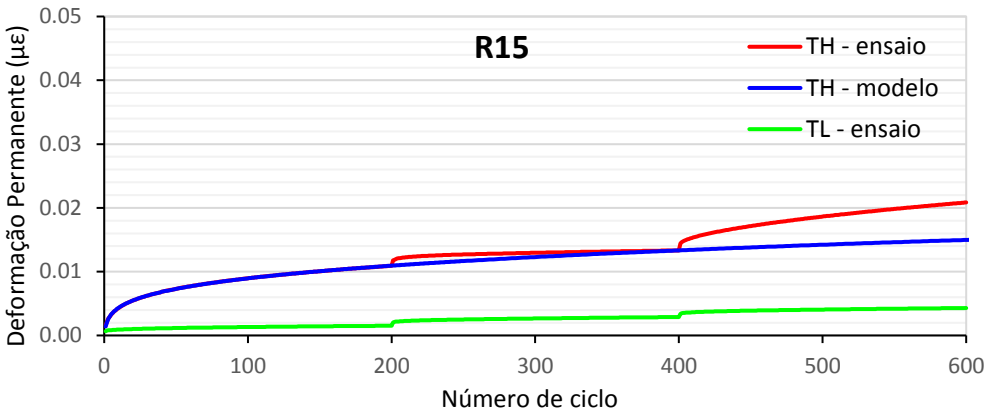

Figura 4 - Resultados do ensaio SSR para a mistura R15

Fonte: Autores

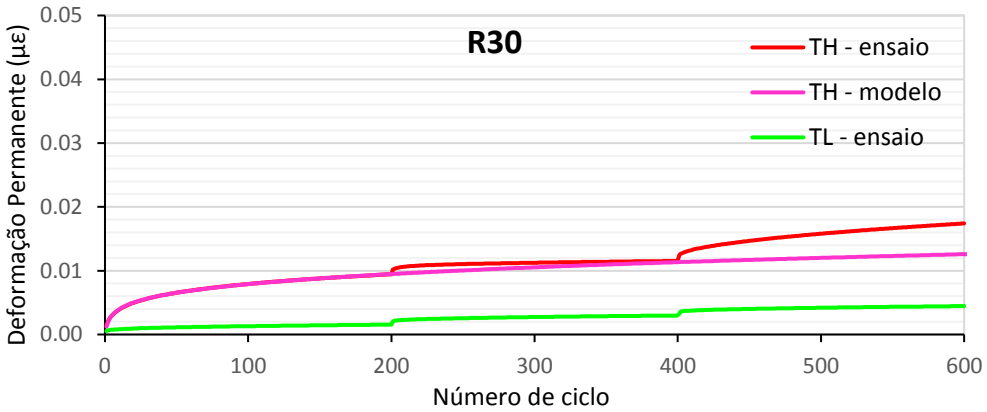

Figura 5 - Resultados do ensaio SSR para a mistura R30

Fonte: Autores

A partir da aplicação do *shift model*, foram obtidos os coeficientes (Tabela 4) que são usados como *inputs* no programa de dimensionamento CAP 3D-D (Figura 6).

Tabela 4 – Coeficientes do *shift model*

	ε0	N1	β	p1	p2	d1	d2
Mref	0,004423	0,405463	0,768033	0,753179	0,29972	0,0560168	1,52471
R15	0,002449	1,169598	0,716662	0,57911	0,230451	0,0145871	3,473151
R30	0,002473	1,62435	0,745339	0,600087	0,238798	0,0303521	2,731723

Fonte: Autores

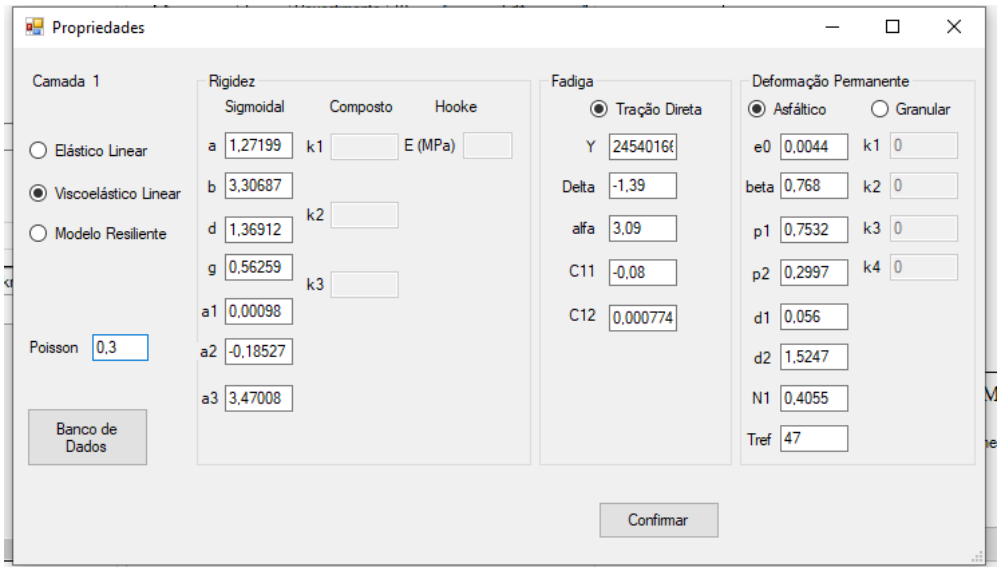

Figura 6 - Tela do CAP 3D-D para definição dos inputs do modelo sigmoidal e *shift model*

Fonte: Autores

3.3 Simulações de dimensionamento dos pavimentos

A Figura 7 apresenta a previsão de evolução de ATR para a camada de rolamento no período de 120 meses, permanecendo as três soluções comparadas abaixo de 12,5mm. Em geral, valores de deformação permanente de até 12,5mm são admitidos (Choi, 2013; LaCroix, 2013), sendo este limite adotado como critério máximo de deformação permanente tanto por grupos de pesquisa norte-americanos (e.g., *North Carolina State University,* NCSU), quanto por grupos de pesquisas nacionais (e.g., Petrobras/Cenpes em suas pistas experimentais na Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ). Valores de deformação na camada asfáltica superiores a 12,5mm equivalem a uma condição de falha na estrutura do pavimento, pois problemas como hidroplanagem podem ocorrer.

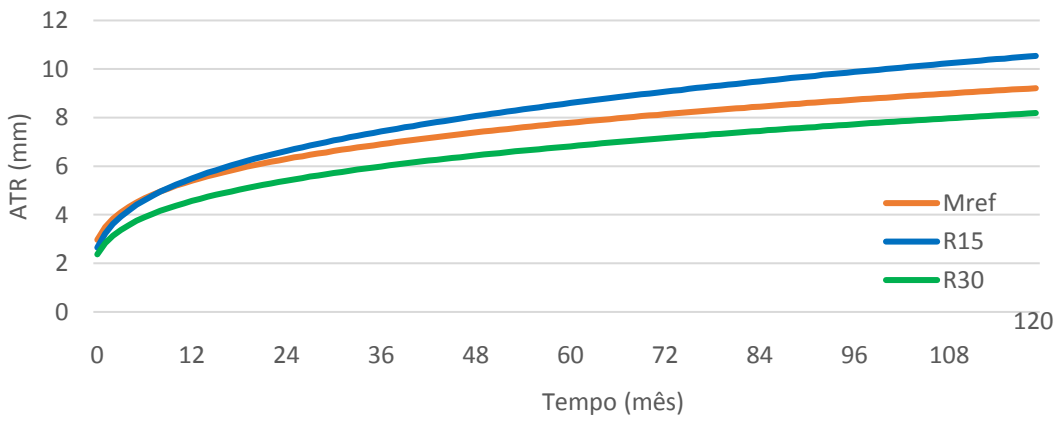

Figura 7 - Resultados do ensaio SSR para a mistura R30

Fonte: Autores

A evolução da ATR nos primeiros meses segue a tendência observada nos ensaios de SSR (Figuras 3, 4 e 5), ou seja, quanto maior a quantidade de RAP presente na mistura, menor a deformação. Por outro lado, a partir do mês 10, a mistura R15 apresenta os maiores valores de

ATRs. Esse comportamento não era esperado, mas pode ser explicado nos resultados de MD (Figura 3), onde tal mistura apresenta menor rigidez nas baixas frequências (altas temperaturas), levando assim a uma maior deformabilidade. Destaca-se ainda que comparando o ATR nas misturas com fresado (15 e 30%) em relação ao ATR na mistura de referência, a diferença não atinge 1,5mm ao longo de 120 meses.

Kim *et al*. (2016) compararam a previsão de ART em misturas com 15 e 50% de RAP, por meio ensaio *Triaxial Stress Sweep* (TSS) e software *Layered Viscoelastic Continuum Damage* (LVECD), com medições em campo. O estudo indicou que as simulações subestimaram os valores medidos em campo, mas foram capazes de prever classificações aceitáveis. Apesar disso, as misturas recicladas apresentaram um comportamento excelente em campo com ATRs menores que 6mm ao final de 6 anos de serviço.

4. CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho avaliou a deformação permanente de misturas asfálticas, com e sem RAP, aplicadas em camada de rolamento do estado do Ceará. Com a análise resultados de SSR, conforme esperado, ocorreu diminuição de DP com o aumento do teor de fresado. Por outro lado, no ensaio de Módulo Dinâmico, a mistura com adição de 15% de RAP foi a que apresentou a menor das rigidezes dentre as misturas analisadas. Nas simulações de predição de Afundamento de Trilha de Roda, a mistura que menos deformou ao final do período analisado foi a R30, embora os resultados sejam bem aproximados, com diferença máxima de 1,3mm em relação ao ATR com a mistura de referência. De um modo geral, as misturas recicladas apresentaram ATR menores que 11mm ao final do período simulado de 10 anos. Apesar disso, o projeto de pavimentação necessitaria ainda de uma análise quanto à fadiga, além do acompanhamento da evolução dos defeitos em trechos experimentais. Vale destacar que a utilização do RAP, como observado em R30 com menor deformação, poderia contribuir para projetos de pavimentos com maiores potenciais de ganhos econômicos e ambientais, além do aspecto técnico aqui abordado. Além disso, ensaios que consideram falhas específicas com base em mecanismos físicos, juntamente com modelos de predição dos defeitos no pavimento, podem funcionar como ferramentas para tomadores de decisões optarem por misturas mais sustentáveis.

Agradecimentos

Os autores agradecem à ANP/Petrobras pela bolsa do primeiro autor, à CAPES pela bolsa da segunda autora, à Funcap pela bolsa de inovação tecnológica da terceira autora, ao CNPq pela bolsa de produtividade em pesquisa do quarto autor; à Rede de Tecnologia em Asfalto – Petrobras pelo apoio ao grupo de pesquisa da Universidade Federal do Ceará (UFC); ao CNPq (CNPq 408682/2021-3) pelo financiamento do projeto.

Referências

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO M 320**. Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder. Washington, DC, 2021.

_____. **AASHTO M 323**. Superpave Volumetric Mix Design. Washington, DC, 2017.

_____. **AASHTO TP 134-19**: Stress Sweep Rutting (SSR) Test Using Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT).

BARROS, Larissa. M.; BRITO, Lélio A. T.; CERATTI, Jorge A. P. Desempenho quanto à deformação permanente de misturas asfálticas com diferentes ligantes. In: XVIII Congreso Ibero Latinoamericano del Asfalto (CILA), 2015, Bariloche, Argentina. **Anais**. pp. 325-333.

BASTOS, J. B. S.; BORGES, R. L.; SOARES, J. B.; KLINSKY, L. M. G. Avaliação em laboratório e em campo da deformação permanente de pavimentos asfálticos do Ceará e de São Paulo. **TRANSPORTES**, v.23, n.3, p.44.

BERNUCCI, Liedi Légi Bariani *et al*. **Pavimentação asfáltica: Formação básica para engenheiros**. 2°ed. Rio de Janeiro: PETROBRAS, ABEDA, 2022.

BORGES, Rômulo Luiz. **Deformação permanente em misturas asfálticas a partir do shift model viscoplástico e ensaios triaxiais de carga repetida**. 2014. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 2014.

CHOI, Yeong-Tae. **Development of a mechanistic prediction model and test protocol for the permanent deformation of asphalt concrete**. 2013. Dissertação (Mestrado). North Carolina State University at Raleigh, 2013. Disponível em: <http://repository.lib.ncsu.edu/ir/bitstream/1840.16/8713/1/etd.pdf>. Acesso em: 29/08/2022.

CLIMA: CEARÁ, Climate-Data.org, 2022, disponível em https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/ceara-212/ e acesso em 02, Setembro de 2022.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). Pesquisa CNT de Rodovias 2021. Brasília: CNT, SEST, SENAT, 2021.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **DNIT-ES 031**: Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico - Especificação de serviço. Rio de Janeiro, IPR, 2006.

_____. **DNIT-IS 247**: Estudos para Elaboração de Projetos de Implantação usando o Método de Dimensionamento Nacional – MeDiNa – Instrução de Serviço. Rio de Janeiro, IPR, 2021.

_____. **DNIT-ME 158**: Mistura asfáltica – Determinação da porcentagem de betume em mistura asfáltica utilizando o extrator Soxhlet – Método de ensaio. Rio de Janeiro, IPR, 2011.

_____. **DNIT-ME 184:** Pavimentação - Misturas asfálticas - Ensaio uniaxial de carga repetida para determinação da resistência à deformação permanente – Método de ensaio. Rio de Janeiro, IPR, 2018.

_____. **DNIT-ME 416**: Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação do módulo dinâmico – Método de ensaio. Rio de Janeiro, IPR, 2019.

FROTA, Thiago. M. da; BASTOS, Juceline. B. S.; SOARES, Jorge. B. Potenciais impactos ambientais na produção de misturas asfálticas recicladas aplicando ACV cradle-to-gate: estudo de caso de Fortaleza. In: XXI Congreso Ibero Latinoamericano del Asfalto (CILA), 2022, Punta del Leste, Uruguai. **Anais**.

GASPAR, Matheus de Souza. **Mecanismo de ativação e interação entre ligantes na reciclagem asfáltica a quente e morna**. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, São Paulo. Brasil, 2019. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-22082019-141237/publico/MatheusdeSouzaGasparCorr19.pdf. Acesso em 17 out.2021.

HOLANDA, Aurea. S.; PARENTE JR, Evandro; ARAÚJO, Tereza. D. P.; MELO, Lucas. T. B.; EVANGELISTA JR, Francisco.; SOARES, Jorge. B. Finite Element Modeling of Flexible Pavements. In: Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering (CILAMCE), 2006, Belém. **Anais**. Belém.

KIM, D., NOROUZI, A., KASS, S., LISKE, T., E KIM, Y. R. Mechanistic performance evaluation of pavement sections containing RAP and WMA additives in Manitoba. **Construction and Building Materials**. Elsevier BV, 2016.

KIM, D.; Y. R. KIM. Development of Stress Sweep Rutting (SSR) test for permanent deformation characterization of asphalt mixture. **Construction and Building Materials**, v. 154, 2017.

LACROIX, A. T. **Performance prediction of the NCAT test track pavements using mechanistic models**. 2013. Dissertação (Doctor of Philosophy). North Carolina State University, NC, 2013.

LO PRESTI, D.; JIMÉNEZ DEL BARCO CARRIÓN, A.; AIREY, G.; HAJJ, E. 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.

NASCIMENTO, Luis Alberto Herrmann. **Nova abordagem da dosagem de misturas asfálticas densas com uso compactador giratório e foco na deformação permanente**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

PIRES, Gaspar Menegusso. **A new methodology for the measurement of the reclaimed asphalt degree of binder activation**. 2018. University of Nottingham. Nottingham. Disponível em: https://bityli.com/L8QGcw. Acesso em 17 out.2021.

TORQUATO e SILVA, Samuel. A.; SOARES, Jorge. B.; HOLANDA, Aurea. S.; OLIVEIRA, Jardel A. Utilização do método dos elementos finitos em retroanálise de pavimentos flexíveis. In: XXVIII Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, 2014, Curitiba. **Anais**.

VALE, Aline Cavalcanti Fialho. **Analysis of the evolution of permanent deformation of asphalt mixtures using the stress sweep rutting (SSR) test methodology**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. Brasil, 2020.

VALE, Aline. C. F.; SILVA, Lucas. S. V.; BASTOS, Juceline B. S.; BARROSO, Elias S.; BABADOPULOS, Lucas. F. A. L.; PARENTE JUNIOR; Evandro; SOARES, Jorge B. Acúmulo de deformação permanente em camadas asfálticas no dimensionamento de pavimentos a partir de modelo viscoplástico. XXVIII Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET. Fortaleza, CE, 2022.

WILLIAMS, B.A., J.R. WILLIS, & SHACAT, J. **Annual Asphalt Pavement Industry Survey on Recycled Materials and Warm-Mix Asphalt Usage: 2020, 11th Annual Survey (IS 138)**. National Asphalt Pavement Association, Greenbelt, Maryland. DOI:10.13140/RG.2.2.14846.46409. 2021.