

AVALIAÇÃO DE MISTURAS 100% RAP FRENTE À RIGIDEZ E À DEFORMAÇÃO PERMANENTE

Debora Tanise Bordin¹
Luciano Pivoto Specht¹
Pedro Orlando Borges de Almeida Junior¹
Bethania Machado Correa¹
Cléber Faccin¹
Gustavo Menegusso Pires²
Kamilla Vasconcelos³
Matheus Souza Gaspar³

Universidade Federal de Santa Maria¹
The University of Nottingham²
Universidade de São Paulo³

RESUMO

O contexto do trabalho foi estudar a reativação de misturas com 100% *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP), oriundas de duas fontes diferentes, uma com ligante 50/70 e outra com Asfalto Modificado por Polímero (AMP) 60/85, através da avaliação da rigidez e da deformação permanente. Ambos os materiais foram compactados nas temperaturas de 100, 140 e 170°C, originando 6 misturas asfálticas, no qual nenhum material virgem foi adicionado. Foi realizado o ensaio uniaxial de carga repetida e o ensaio de Módulo Complexo. O principal resultado encontrado para o Módulo complexo é que misturas 100% RAP convencional e modificado conseguem reativar as propriedades do ligante em temperaturas próximas a 140°C. Com relação aos resultados do ensaio uniaxial de carga repetida, todos os corpos de prova resistiram à deformação permanente até 10.000 ciclos.

ABSTRACT

The aim of this paper is to study the reactivation of mixtures with 100% Reclaimed Asphalt Pavement (RAP), one with neat 50/70 binder, and another one with asphalt modified by polymer (AMP), classified as 60/85, through the evaluation of stiffness and permanent deformation. These materials were molded at temperatures of 100, 140 and 170 ° C, resulting in 6 asphalt mixtures in which no virgin material was added to the RAP material. The uniaxial repeated load test and the Complex Modulus test were performed. The main result found for the Complex Modulus is that 100% RAP mixtures (with neat and modified binders) can reactivate the properties of the binders at temperatures near to 140 ° C. Related to uniaxial repeated load test, all the samples resisted to permanent deformation until the test was finished after 10.000 cycles.

1. INTRODUÇÃO

Visando a sustentabilidade, a indústria da pavimentação está em constante busca por meios de produção que contemplem materiais alternativos, minimizem danos ambientais e contribuam com a preservação dos recursos naturais, sem que o material perca em desempenho. O uso do material oriundo da fresagem do revestimento asfáltico, conhecido como *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP) é uma alternativa sustentável e valorizada que promove a economia dos recursos naturais, nos custos da pavimentação e energia (Moon et al., 2017; Nosetti et al., 2018; Poulidakos et al., 2017).

Entretanto, utilização de altas porcentagens de RAP em misturas asfálticas à quente ainda é um desafio, sendo que a quantidade média utilizada ainda é baixa (20,3%) (Hansen e Copeland, 2017). Uma das causas é o ligante presente no RAP, que apresenta perda de suas propriedades físicas, químicas e reológicas como resultado do seu processo de envelhecimento durante a vida útil do pavimento, caracterizando-se por baixa penetração, alto ponto de amolecimento e baixa coesão (Yu et al., 2014; Genesseeux, 2015; Osmari, 2016).

Além disso, outro fator limitante para utilização de altas porcentagens de RAP é o grau de reativação do ligante envelhecido e sua interação com os materiais virgens e agentes de reciclagem, pois tem impacto no conteúdo de ligante e na rigidez final da mistura. Se o grau de mistura esperado for maior do que realmente é a mistura asfáltica terá um menor teor de ligante e serão mais rígidas, originando misturas mais susceptíveis à fadiga. O contrário pode originar misturas com excesso de ligante e mais propensas a desenvolver deformação permanente (Coffey et al., 2013).

Duas variáveis estão envolvidas no processo de reativação do ligante RAP, a temperatura e o tempo de mistura. Em baixas porcentagens de substituição, os agregados são superaquecidos no tambor secador para obter a energia necessária para secar e aquecer o RAP. Para maiores porcentagens é necessário pré-aquecer o RAP para facilitar a mistura e reativar as propriedades do ligante e promover a interação com o ligante virgem (Madrigal et al., 2017).

Tendo em vista as consequências mecânicas das propriedades do ligante envelhecido presente no RAP e seu grau de reativação nas misturas recicladas, este trabalho avaliou quanto a rigidez e a deformação permanente de misturas com 100% RAP oriundas de duas fontes diferentes, uma com ligante 50/70 e outra com ligante AMP 60/85, e compactadas em três temperaturas, 100, 140 e 170°C, verificando assim a influência do tipo de ligante e da temperatura de compactação na reativação das propriedades do material.

2. METODOLOGIA

O trabalho consistiu em avaliar quanto a rigidez e a deformação permanente misturas com dois tipos diferentes de RAP em 100%, sem materiais virgens, e mantendo-se constante o teor de ligante residual, com diferentes temperaturas de compactação no Compactador Giratório Superpave (CGS) aplicando o mesmo número de giros, condição de pressão vertical e ângulo de rotação.

Um dos RAP utilizados apresenta ligante 50/70 e outro o ligante AMP 60/85. Além disso, foram utilizadas três diferentes temperaturas de compactação para cada tipo de fresado: 100, 140 e 170°C, totalizando 6 misturas. Portanto, foram moldados seis corpos de prova em cada temperatura para a mistura 100% fresado ligante 50/70 e para a mistura com ligante AMP 60/85, totalizando os 36 corpos de prova do estudo.

A propriedade de rigidez foi avaliada através do ensaio de módulo complexo e a deformação permanente pelo ensaio uniaxial de carga repetida.

2.1. Material fresado

O material de estudo é proveniente da fresagem com o equipamento Fresadora modelo PM 102 de dois trechos com pavimento asfáltico em avançado estado de deterioração, no estado do Rio Grande do Sul. O RAP com ligante 50/70 foi obtido do Km 109+500 ao 112+500 da Rodovia Governador Leonel de Moura Brizola (BR 386/RS), e os materiais granulares contidos nesse fresado são oriundos da Pedreira Construbrás em Barra Funda/RS e estão enquadrados na faixa C (DNIT 031, 2006). O teor de ligante asfáltico encontrado no material foi de 4,85% (DNER ME 035, 1998) e a densidade máxima medida (Gmm) é 2,427 (NBR 15619, 2012).

O RAP com ligante AMP 60/85 foi obtido no Km 72+700 da FreeWay (BR 290/RS) e os materiais granulares deste fresado são oriundos da pedreira TRS em Santa Antônio da Patrulha

(Km 30+500 da BR 290/RS) e também enquadrados na faixa C (DNIT 031, 2006). O teor de ligante encontrado foi de 4,41% (DNER ME 035, 1998) e a densidade máxima medida (Gmm) é 2,394 (NBR 15619, 2012).

O ligante de ambos os RAPs foram extraídos conforme método do refluxo duplo (ASTM D 2172, 2001) e recuperados de acordo método Abson (ASTM D 1856, 2016). Com esse material realizou-se o ensaio de recuperação elástica (DNIT 130, 2010), ponto de amolecimento (NBR 6560, 2008), penetração (NBR 6576, 2007) e viscosidade Brookfield (NBR 15184/2004). Os resultados estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Ensaios de caracterização do ligante asfáltico 50/70 e 60/85 extraídos dos RAPs

Amostra	Recuperação elástica (%)	Ponto de Amolecimento (°C)	Penetração (dmm)	Viscosidade Brookfield		
				10°C Rpm (cP)	30°C Rpm (cP)	60°C Rpm (cP)
Ligante 50/70 recuperado	Sem resultado	78	12	4235	1587	410

Amostra	Recuperação elástica (%)	Ponto de Amolecimento (°C)	Penetração (dmm)	Viscosidade Brookfield		
				20°C Rpm (cP)	50°C Rpm (cP)	100°C Rpm (cP)
AMP 60/85 recuperado	37	66	22	1359	589	171

Fonte: Adaptado de Pinheiro (2017)

2.2. Preparação das Misturas

Para preparação das amostras utilizou-se apenas o material RAP passante na peneira #3/8 e a homogeneização da mistura na temperatura de compactação foi realizada no misturador *Infra Test Testing Systems*, modelo *Bituminous Laboratory Mixer 30 Liter Special Version 380V 60Hz 3Ph*.

Previamente, a massa foi colocada em estufa a 60°C por 24 horas para retirar a umidade contida na amostra, e posteriormente aquecida 4 horas nas temperaturas de compactação (100, 140 e 170°C). Após atingir a temperatura de compactação colocou-se o material dentro do misturador para homogeneização da massa por cinco minutos. Com isso, as amostras foram compactadas no CGS com diâmetro de 10 cm e altura de 15 cm com 100 giros, pressão vertical de 600 kPa, ângulo externo de 1,25° e interno de 1,16° e velocidade constante de 30 rpm. A densidade aparente dos corpos de prova foi determinada através do método adimensional com fator de correção de 0,97.

2.3. Ensaios laboratoriais

As misturas foram avaliadas quanto à rigidez pelo ensaio de módulo complexo e deformação permanente pelo ensaio uniaxial de carga repetida, sendo utilizado 3 corpos de prova por mistura em cada ensaio mecânico. Para o ensaio de módulo complexo seguiu-se a norma AASHTO T 342-11- *Standard Method of Test for Determining Dynamic Modulus of Hot-Mix Asphalt Concrete Mixtures*. O método consiste em aplicar uma carga uniaxial compressiva senoidal no corpo de prova cilíndrico para determinar as propriedades viscoelásticas do

material.

As temperaturas utilizadas para o ensaio foram de -10°C, 4°C, 21°C, 37°C e 54°C e as frequências foram 25, 20, 10, 5, 2, 1, 0,5, 0,2, 0,1 e 0,01Hz, com deformação dentro do limite das pequenas deformações (entre 50 a 75 µm/m), ou seja, dentro do limite viscoelástico. Com os resultados experimentais foi realizada a modelagem física-matemática 2S2PID (2 Springs, 2 Parabolic, 1 Dashpot), de Di Benedetto et al. (2004), para elaboração das curvas mestras de ângulo de fase e módulo dinâmico na temperatura de referência de 20°C, espaço Cole-Cole e Diagrama de Black, que representam o comportamento viscoelástico do material em qualquer temperatura e frequência de carregamento.

O Ensaio Uniaxial de carga Repetida foi utilizado para verificar a resistência à deformação permanente das misturas e seguiu a norma da NBR 16505:2016 - Resistência à deformação permanente utilizando o ensaio uniaxial de carga repetida, com tempo de aplicação de carga de 0,1 s, tempo de repouso de 0,9 s, tensão de 204 kPa e temperatura de ensaio 60°C. No ensaio obtém-se o *Flow Number* que é definido pelo número de repetições de carga até atingir a taxa mínima de deformação, ou seja, a mistura apresentará em um período pequeno uma grande deformação cisalhante, obtendo assim, o colapso da estrutura. A relação do FN com a deformação permanente é que quanto maior o número de ciclos menor a possibilidade de o pavimento sofrer o dano de Afundamento em Trilhas de Roda (ATR).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Análise volumétrica

Na tabela 2 são apresentados os resultados dos volumes de vazios médio (Vv médio), o desvio padrão (Vv SD) e o coeficiente de variação (Vv CV) de 6 corpos de prova para cada mistura após 100 giros no CGS. Além disso, consta-se como complementação o teor de ligante residual e o Gmm.

Tabela 2: Volume de vazios das misturas em cada temperatura de compactação

RAP	Temperatura Compactação	Gmm (g/cm ³)	Teor de ligante residual (%)	Vv médio (%)	Vv SD (%)	Vv CV (%)
50/70	100°C			12,7	0,4	3,2
50/70	140°C	2,427	4,85	7,5	1,2	15,4
50/70	170°C			9,0	0,6	6,5
60/85	100°C			8,0	0,3	3,3
60/85	140°C	2,394	4,41	4,7	0,3	7,3
60/85	170°C			5,3	1,0	19,4

Observa-se que o volume de vazios para ambos os RAPs, 50/70 e 60/85, apresentou os maiores valores na temperatura de compactação de 100°C e os menores valores na temperatura de 140°C. Na temperatura de 170°C os valores de volume de vazios foram intermediários, ou seja, observou-se que até 140°C o volume de vazios decresceu, e em temperaturas acima voltou a crescer para ambas as misturas.

Além disso, em uma mesma temperatura de compactação, a mistura com 60/85 densificou-se melhor do que a mistura com ligante 50/70, fato este explicado pelos ensaios de caracterização

dos ligantes extraídos dos RAPs. O ensaio de penetração indicou valor de 12 dmm para o RAP com ligante 50/70 e de 22 dmm para o RAP 60/85, e o ensaio de viscosidade indicou que o ligante 50/70 é mais viscoso e encontra-se em um grau de envelhecimento maior que o ligante 60/85.

Considerando o grau de compactação em pista para tráfego médio a alto, uma mistura 100% RAP com ligante 60/85 poderia ser executado com temperaturas em torno de 100°C, enquanto uma mistura 100% RAP com ligante 50/70 uma temperatura em torno de 140°C.

3.2. Módulo complexo

Com os dados experimentais utilizou-se o modelo 2S2P1D para obtenção do espaço Cole Cole, Diagrama de Black, curvas mestras de módulo dinâmico e ângulo de fase. Os parâmetros de calibração do modelo para representar o comportamento viscoelástico do material estão apresentados na Tabela 3, juntamente com as constantes C1 e C2, do WLF (William, Landel e Ferry).

Tabela 3: Parâmetros do modelo 2S2P1D e valores de C1 e C2 de cada mistura

Misturas	E*							WLF	
	E00 (MPa)	E0 (MPa)	k	h	δ	τE	B	C1	C2
50/70 100°C	3,00E+01	2,92E+04	0,165	0,49	1,8	6,00E-01	12000	27,821	193,83
50/70 140°C	7,00E+01	3,50E+04	0,185	0,49	1,8	2,00E+00	12000	40,619	271,783
50/70 170°C	2,00E+02	4,15E+04	0,166	0,415	2,6	5,00E-01	12000	41,175	309,024
60/85 100°C	6,00E+01	1,55E+04	0,17	0,51	1,9	3,00E+00	15000	19,546	151,193
60/85 140°C	110	36000	0,16	0,518	2,2	100	10000	34,726	243,098
60/85 170°C	100	25800	0,14	0,49	2,6	80	10000	21,455	162,04

O espaço Cole Cole, apresentado na Figura 1 mostra a média dos dados experimentais e a modelagem 2S2P1D das misturas. No gráfico, o eixo das abscissas mostra a parte real E1 ou módulo de armazenamento e o eixo das ordenadas a parte imaginária E2 ou módulo de perda. Em E1 é possível analisar a parte recuperável da energia armazenada ou comportamento elástico e em E2 a comportamento viscoso do material devido a uma dissipação de energia.

Constata-se que o tipo de ligante presente no RAP influencia no comportamento viscoso e elástico do material, pois nas misturas com RAP 60/85 os valores de picos E2 e E1 foram maiores em relação ao RAP 50/70 para uma mesma temperatura de compactação. Além disso, a temperatura de compactação de 140°C, para ambos os tipos de ligante, conferiu as misturas um maior comportamento viscoso, e também elástico, o que pode ser considerado uma reativação das propriedades viscoelásticas do ligante envelhecido do RAP.

Analisando separadamente por tipo de RAP, a mistura com ligante 50/70 e compactação de 100°C apresentou os menores valores de E2 e E1 entre todas as misturas, fato este explicado pelo elevado volume de vazios e também pela não reativação das propriedades do ligante. A 170°C é possível perceber que o material apresentou valores intermediários de E2 e E1 entre 100°C e 140°C, possivelmente pelo seu volume de vazios.

Para as misturas com ligante 60/85, tem-se a mesma sequência de análise, porém de uma forma menos brusca como a das misturas convencionais; essas apresentam comportamentos

mecânicos mais semelhantes. A temperatura de compactação de 100°C apresentou valores de E2 e E1 menores comparadas às outras misturas modificadas, demonstrando não ser a temperatura de compactação adequada para reativar de forma suficiente as propriedades do ligante. A 170°C apresentou um comportamento viscoso maior e comportamento elástico menor que a mistura com compactação de 140°C.

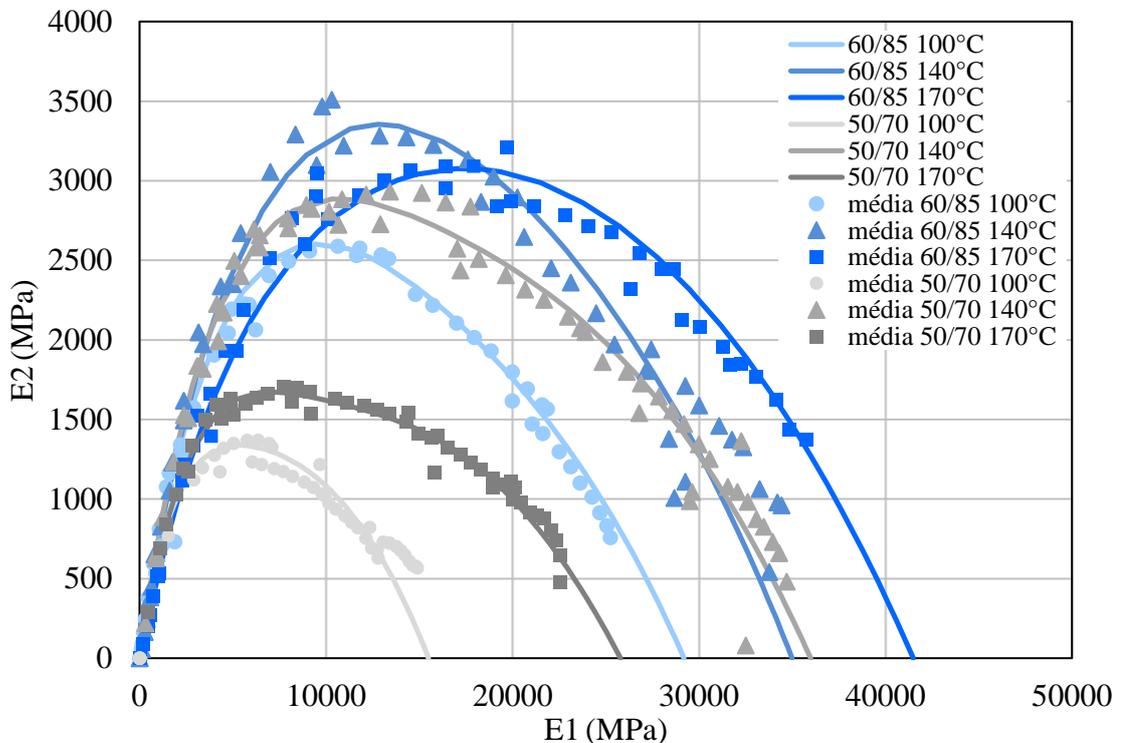


Figura 1: Plano Cole Cole das misturas obtido através da modelagem 2S2P1D.

Por fim, comparando os resultados destas misturas 100% RAP com misturas convencionais da literatura sem RAP (Almeida Júnior, 2016; Mensch, 2017), com exceção as misturas 50/70 100°C e 170°C, em todas as outras os valores de pico E2 e E1 foram muito próximos aos referidos autores.

O Diagrama de Black permite analisar a relação entre o módulo dinâmico e o ângulo de fase em diferentes temperaturas. A figura 2 apresenta as linhas de modelagem do 2S2P1D de todas as misturas, juntamente com a média dos dados experimentais. De modo geral, é possível perceber que a maioria das misturas convencionais apresentam valor de ângulo de fase maior que as misturas modificadas por polímeros, quando comparadas entre sua respectiva temperatura. Isso faz com que as misturas convencionais, em igualdade de temperatura de compactação, tenham uma maior dissipação de energia devido ao maior atrito interno, além de sua parcela viscosa ser a mais atuante.

É possível perceber que a mistura 60/85 170°C apresenta menor valor de ângulo, podendo ser aferido que apresenta um melhor comportamento elástico quando comparada às demais misturas estudadas, corroborando o maior valor de E2 encontrado no Cole Cole. A mistura 60/85 100°C é a que apresenta maior ângulo de fase, isso faz com que essa mistura tenha uma maior dissipação de energia ou perda por atrito interno, pois sua parcela viscosa é a mais atuante.

Analisando os RAPs separadamente, é perceptível que as amostras com ligante 50/70, nas temperaturas de 100 e 140°C apresentam um ângulo de fase maior que as amostras na temperatura de 170°C. Isso demonstra que houve diferença de ativação do ligante influenciado pela temperatura, pois a 170°C o fresado é mais elástico, e a 100 e 140°C mais viscoso. Com 60/85 observa-se que a 100°C de compactação o ângulo de fase é máximo, sendo a mistura com comportamento viscoso, e com o aumento da temperatura para 140 e 170°C, há redução no ângulo de fase, isto é, as misturas vão se tornando mais elásticas.

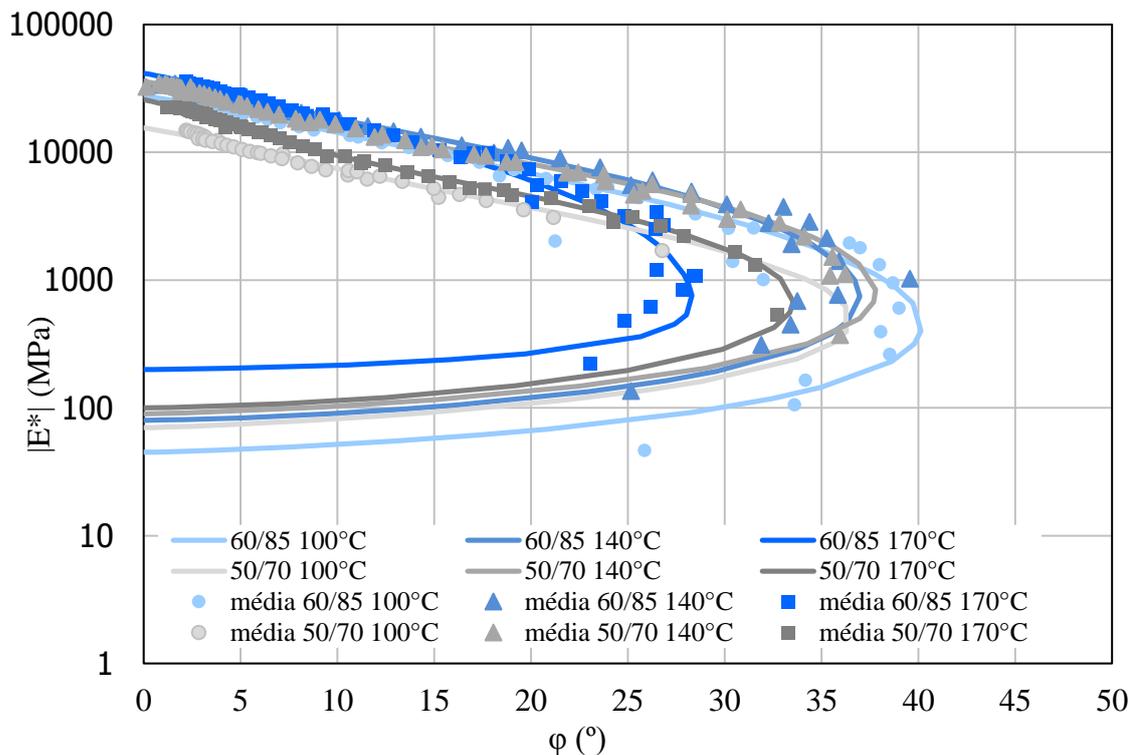


Figura 2: Diagrama Black das misturas obtido através da modelagem 2S2P1D

Com os resultados de módulo dinâmico e ângulo de fase construiu-se as curvas mestras. Para isso, foi utilizado o princípio da superposição tempo-temperatura (TTSP – *time-temperature superposition principle*). As curvas foram ajustadas através do modelo reológico 2S2P1D e pelos coeficientes C1 e C2 de WLF, e a temperatura de referência foi de 20°C.

Na Figura 3 estão apresentadas as curvas mestras de módulo dinâmico das misturas. Observa-se que o módulo dinâmico cresce com aumento da frequência, e que as altas frequências (maiores módulos) estão relacionadas às baixas temperaturas e deformações elásticas, enquanto que as baixas frequências se relacionam às altas temperaturas e deformações viscoelásticas.

Analisando os resultados nas baixas frequências, a mistura com ligante 50/70 nas temperaturas de compactação 140 e 170°C apresentaram uma maior rigidez, preponderando o fato deste ligante apresentar um grau maior de envelhecimento. Nas altas frequências, as misturas com 60/85 apresentam maior rigidez, quando comparadas às misturas 50/70, exceto a mistura 50/70 140°C, que também apresentou uma elevada rigidez. Já as misturas 50/70 e 60/85 a 100°C são as de menor rigidez, o que pode ser explicado pelo seu elevado volume de vazios.

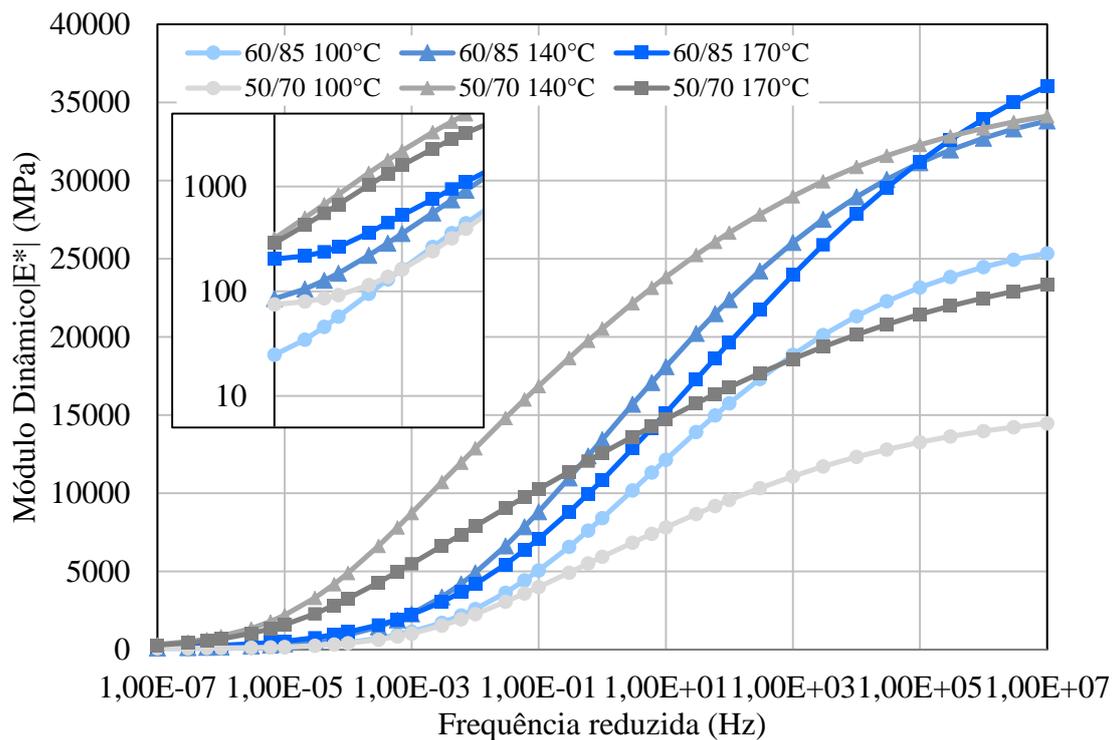


Figura 3: Curvas mestras de Módulo Dinâmico para todas as misturas (@20°C)

Em grande parte do espectro de frequência, o aumento da temperatura de compactação aumentou a rigidez das misturas até 140°C, e após esta temperatura as misturas apresentaram queda na rigidez. Comparando com os valores extremos de rigidez com resultados da literatura (Almeida Júnior, 2016; Mensch, 2017), as misturas 50/70 140°C e 60/85 140°C e 170°C apresentaram valores próximos.

Na Figura 4 estão as curvas mestras de ângulo de fase das misturas. O efeito da modificação por polímero é frequentemente analisado através do ângulo de fase, pois este se relaciona com as propriedades elásticas e viscosas dos materiais asfálticos através da modelagem 2S2P1D.

É possível perceber que as misturas 50/70 140°C e 50/70 170°C apresentam comportamento elástico devido ao menor ângulo de fase durante todo o espectro de frequência. As misturas 60/85 100°C, 60/85 140°C e 50/70 100°C são misturas com comportamento viscoso em função do maior valor de ângulo de fase, e com base nas análises anteriores essa maior viscosidade para as misturas com ligante modificado significa ativação das propriedades viscoelásticas. Além disso, quanto maior a temperatura de compactação menor o ângulo de fase, tanto para as misturas 50/70 como para as misturas 60/85, demonstrando que o aumento da temperatura de compactação contribui para reativar as propriedades do ligante envelhecido.

Outra constatação é que somente a mistura 50/70 100°C atingiu o pico do ângulo de fase com o aumento da temperatura de ensaio, e todas as demais misturas tenderiam a aumentar o ângulo de fase para temperaturas de ensaio maiores que 54°C. Em misturas com incorporação de menores quantidades de RAP e misturas sem reciclado, comumente o valor de ângulo de fase cresce até uma determinada temperatura de ensaio e após o valor reduz drasticamente.

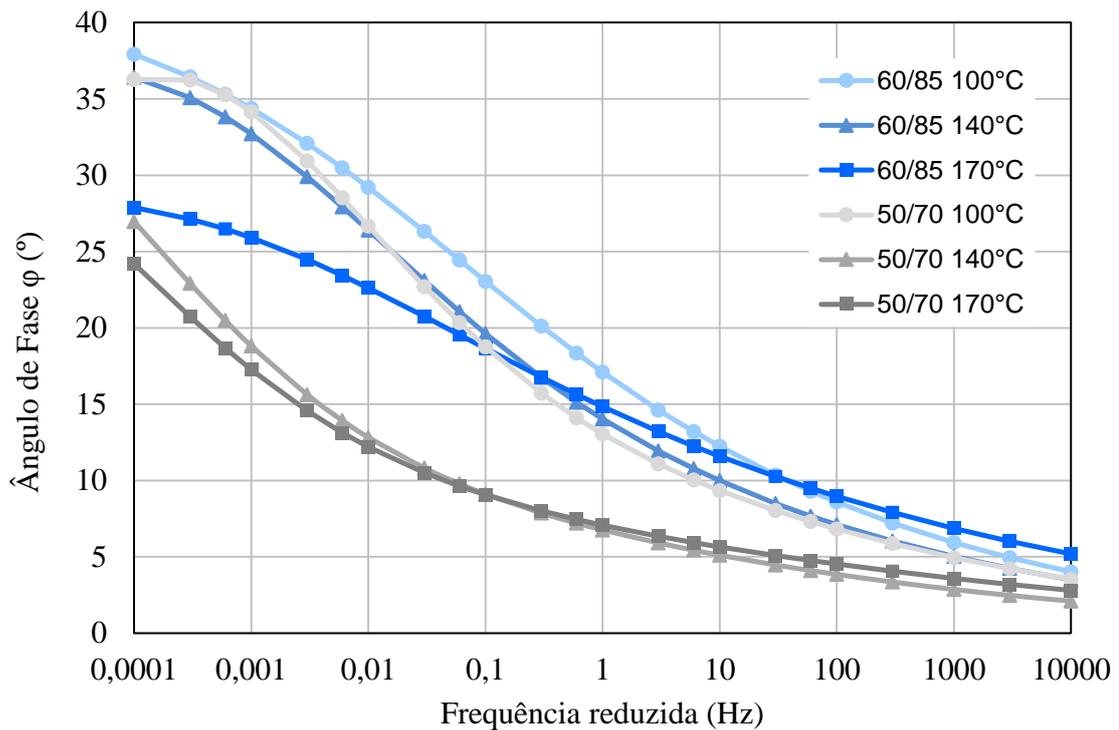


Figura 4: Curvas mestras de Ângulo de Fase para todas as misturas (@20°C)

3.3. Ensaio uniaxial de carga repetida

Todos os corpos de prova analisados suportaram o máximo de ciclos recomendados pela ABNT/NBR 16505:2016, sem atingir o *Flow Number*. Portanto, o ensaio foi finalizado aos 7200 ciclos e não foi necessário realizar o Modelo de Francken. Os corpos de prova ensaiados mostraram-se visualmente intactos, Figura 5, sem desprendimento da massa ou sinais de deformação permanente.

Sobre a análise da deformação permanente, verifica-se que as misturas com 100% fresado, tanto com ligante 50/70 e ligante 60/85 em diferentes níveis de envelhecimento, e temperatura e grau de compactação, apresentam comportamento satisfatório em relação a este dano.



Figura 5: Corpos de prova após ensaio uniaxial de carga repetida sem deformação visual

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho avaliou a influência do tipo de ligante asfáltico presente no RAP e diferentes temperaturas de compactação em misturas 100% RAP quanto a rigidez e a deformação permanente. Os ensaios mostraram que o ligante convencional 50/70 extraído do RAP apresentava-se em um estado mais avançado de envelhecimento que o ligante modificado 60/85, o que influenciou nos resultados de rigidez da mistura.

Em relação à compactação das misturas, a melhor temperatura para ambos os ligantes foi de 140°C devido ao menor volume de vazios e a reativação das propriedades do ligante envelhecido verificado através dos ensaios realizados.

A avaliação quanto às propriedades viscoelásticas lineares, no espaço Cole-Cole, Diagrama Black, curvas mestras de ângulo de fase e módulo de cisalhamento dinâmico mostrou que o tipo de ligante presente no RAP altera o comportamento viscoso e elástico das misturas, e consequentemente a rigidez. A temperatura de 100°C mostrou-se não adequada para reativar as propriedades do ligante envelhecido, enquanto que a temperatura de 140°C foi considerada a mais adequada considerando o conjunto de análise.

Quanto à deformação permanente, pode-se concluir que as misturas com 100% RAP não apresentam susceptibilidade a desenvolver este tipo de dano, independente da temperatura, tipo e propriedades dos ligantes presente no RAP.

O trabalho contribuiu para melhorar a compreensão dos fatores de rigidez e resistência à deformação permanente de misturas 100% RAP, compostas de ligante 50/70 e AMP 60/85, em diferentes temperaturas de compactação. A reciclagem a quente de pavimento, merece especial atenção nas pesquisas futuras, pois vem mostrando resultados satisfatórios e atendendo às premissas da economia e sustentabilidade. Entretanto, salienta-se que em cada projeto deve-se analisar outros tipos de danos, como a fadiga, e as propriedades dos RAPs e materiais disponíveis, de forma a contemplar novas tecnologias para a pavimentação asfáltica sem comprometer o meio ambiente.

Agradecimentos

A ANP/ PETROBRÁS, a CAPES e CNPq pelo suporte financeiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO (2011) T 342-11 - American Association of State Highway and Transportation Officials. Standard Method of Test for Determining Dynamic Modulus of Hot-Mix Asphalt Concrete Mixtures. Washington, D. C.
- ABNT (2008) *NBR 6560 – Materiais betuminosos – Determinação do ponto de amolecimento- Método do anel e bola*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ABNT (2007) *NBR 6576 – Materiais asfálticos – Determinação da penetração*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ABNT (2004) *NBR 15184 – Materiais betuminosos – Determinação da viscosidade em temperatura elevada usando um viscosímetro rotacional*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ABNT (2016) *NBR 16505 – Misturas asfálticas – Resistência à deformação permanente utilizando o ensaio uniaxial de carga repetida*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ABNT (2012) *NBR 15619 – Misturas asfálticas – Determinação da densidade máxima teórica e da massa específica máxima teórica em amostras não compactadas*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- Almeida Junior, P. O. B. (2016) Comportamento mecânico de concretos asfálticos com diferentes granulometrias, ligantes e método de dosagem. 217 p. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Santa Maria, RS.

- ASTM (2001) *D 2172 – Standard Test Methods for Quantitative Extraction of Bitumen from Bituminous Paving Mixtures*. American Society for Testing and Materials, USA.
- ASTM (2001) *D 1856 – Standard Practice for Preparation of Viscosity Blends for Hot Recycled Asphalt Materials*. American Society for Testing and Materials, USA.
- Coffey, S.; Dubois, E.; Metha, Y.; Nolan, A.; Purdy, C. (2013) Determining the impact of degree of blending and quality of reclaimed asphalt pavement on predicted pavement performance using pavement ME design. *Construction and Building Materials*, v. 48, p. 473-478.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.012>
- Di Benedetto, H.; Olard, F.; Sauzéat, C.; Delaporte, B. (2004) Linear Viscoelastic Behaviour of Bituminous Materials: from binders to mixes. *Road Materials and Pavements Design*. Departement Génie Civil et Bâtiment, Ecole Nationale des TPE (ENTPE), 41p. DOI: <https://doi.org/10.1080/14680629.2004.9689992>.
- DNER ME 035 (1998) Agregados – Determinação da Abrasão “Los Angeles” – Método de ensaio. Rio de Janeiro.
- DNIT ES 031 (2006) Pavimentos Flexíveis – Concreto Asfáltico – Especificação de serviço. Rio de Janeiro.
- DNIT ME 130 (2010) Determinação da recuperação elástica de materiais asfálticos pelo ductilômetro – Método de ensaio. Rio de Janeiro.
- Genesseeaux, M. M. L. (2015) Avaliação da durabilidade de misturas asfálticas a quente e mornas contendo material asfáltico fresado. 195p. Tese (Doutorado em Engenharia – Departamento de Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Hansen, K. R., Copeland, A. (2017) Asphalt pavement industry survey on recycled materials and warm-mix asphalt usage 2015, 6th Annual Asphalt Pavement Industry Survey Information Series 138, National Asphalt Pavement Association, Lanham, MD. https://www.asphalt pavement.org/PDFs/IS138/IS138-2015_RAP-RAS-WMA_Survey_Final.pdf.
- Madrigal, D. P.; Lannone, A.; Martinez, A. H.; Giustozzi, F. (2017) Effect of mixing time and temperature on cracking resistance of bituminous mixtures containing reclaimed asphalt pavement material. *Journal of Materials in Civil Engineering*. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001831.
- Mensch, N. G. (2017) Análise viscoelástica de misturas asfálticas quentes e mornas. 168 p. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, RS.
- Moon, K. H.; Falchetto, A. C.; Marasteanu, M. O.; Wistuba, M. P. (2017) Low temperature rheological properties of asphalt mixtures containing different recycle asphalt materials. *International Journal of Pavement Research and Technology*, v. 10, p. 84-97. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijprt.2016.11.007>.
- Nosetti, A.; Madrigal, D. P.; Jimenez, F. P.; Martinez, A. H. (2018) Effect of the recycling process and binder type on bituminous mixture with 100% reclaimed asphalt pavement. *Construction and Building Materials*, v. 167, p. 440-448. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.042>.
- Osmari, P. (2016) Caracterização química, reológica e de morfologia superficial de ligantes asfálticos modificados por diferentes agentes rejuvenescedores. 113p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro/COPPE, Rio de Janeiro.
- Pinheiro, H. L. (2017) Estudo da reativação de ligantes em misturas asfálticas visando o uso de 100% RAP. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, RS.
- Poulikakos, L. D.; Papadaskalopoulou C.; Hofko B.; Gschösser F.; Falchetto A.C.; Bueno M.; Arrigada M.; Sousa J.; Ruiz R.; Petit C.; Loizidou M.; Partl M.N. (2017) Harvesting the unexplored potential of european waste materials for road construction, *Resour. Conserv. Recycl.* v. 116, p. 32–44.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.09.008>.
- Yu, X.; Zoumanis, M.; Dos Santos, S.; Poulikakos, L.D. (2014) Rheological, microscopic, and chemical characterization of the rejuvenating effect on asphalt binders, *Fuel* 135 p.162–171. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.06.038>.