

# EFEITO DELETÉRIO DA ÁGUA NA RIGIDEZ DE MISTURAS ASFÁLTICAS REICLADAS

**Bethania Machado Correa**  
**Pedro Orlando Borges de Almeida Júnior**  
**Gustavo dos Santos Pinheiro**  
**Luciano Pivoto Specht**  
**Kátia Aline Bohn**  
**Débora Tanise Bordin**  
**Deividi da Silva Pereira**

Universidade Federal de Santa Maria  
Grupo de Estudo e Pesquisa em Pavimentação e Segurança Viária

## RESUMO

Este trabalho buscou avaliar o efeito deletério da água na rigidez das misturas asfálticas à quente e mornas recicladas através do ensaio de módulo complexo. Foram utilizados dois ligantes asfálticos, 50/70 e 60/85, com 0, 25 e 50% de fresado, e as misturas foram submetidas ao protocolo de danificação por umidade, baseado no ensaio Lottman Modificado, e posteriormente ao ensaio de módulo complexo, passando por esse ciclo duas vezes, processo esse definido como C1 e C2. Pode-se concluir que as misturas, em geral, sofreram uma diminuição na rigidez após os ciclos de danificação, e as misturas mais suscetíveis à ação da água foram as misturas com ligante 50/70 sem adição de fresado. Além disso, não se encontrou diferença significativa entre a mistura à quente e as mornas recicladas, e a incorporação de fresado nas misturas mornas aumentou a rigidez das misturas.

## ABSTRACT

This paper evaluated the deleterious effect of water in the stiffness of hot and warm recycled asphalt mixtures through dynamic modulus test. Two binders were used, 50/70 and 60/85, with 0, 25 and 50% reclaimed asphalt pavement (RAP), and the mixtures were submitted to the moisture damage protocol, using the Modified Lottman test, and subsequently to the dynamic modulus test, repeating this cycle twice, process defined as C1 and C2. It can be concluded that the mixtures generally suffered a decrease of stiffness after the damage cycles, and the most susceptible mixtures to the water action were the 50/70 mixtures without RAP. Furthermore no significant differences was found between hot and warm recycled asphalt mixtures, however the addition of RAP in the warm mixtures increased its stiffness.

## 1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Com o passar do tempo, o revestimento asfáltico das rodovias apresenta patologias por diversas causas, como excesso de carregamento e tráfego, falta de manutenção, problemas no projeto ou na execução, sendo os dois principais defeitos o trincamento por fadiga e a deformação permanente. O trincamento por fadiga é ocasionado por um elevado número de ciclos de carga e baixa amplitude de deformação, enquanto que a deformação permanente se manifesta por afundamentos nas trilhas de roda devido à altas temperaturas e altas cargas que provocam grandes amplitudes de deformação.

A baixa durabilidade dos pavimentos e as constantes obras de manutenção e reabilitação geram um elevado volume de material reciclado oriundo da fresagem, o *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP). A reciclagem deste material, com sua utilização em novos revestimentos, proporciona ganhos ambientais e econômicos ao conferir uma alternativa sustentável a este resíduo com redução do consumo de agregados e ligantes virgens, de energia e de gases do efeito estufa (Mangiafico, 2014; Genesseeaux, 2015; Hoy et al., 2017).

Nos Estados Unidos em 2015 utilizou-se 72,2 milhões de toneladas de RAP em novos revestimentos que gerou uma economia de 3,7 milhões de toneladas de ligante asfáltico, 70,5 milhões de toneladas de agregados e mais de 2,6 milhões de dólares (Napa, 2015). A utilização

deste material em novos revestimentos é tão promissora que a União Europeia tem por objetivo atingir um mínimo de 50% de RAP em pavimentos de concretos asfálticos até 2020, a partir da recuperação do ligante envelhecido constituinte do resíduo (Bonicelli et al., 2017).

A heterogeneidade do RAP e o ligante envelhecido presente em sua constituição caracterizado pela perda de suas propriedades físicas, químicas e reológicas, com alta rigidez e baixa penetração, pode comprometer o comportamento das misturas recicladas (Osmari, 2016). Com isso, a reciclagem pode ser efetuada de duas formas: a quente, utilizando ligante virgem, agente rejuvenescedor (AR) e agregados fresados aquecidos (técnica utilizada no presente trabalho); ou, a frio, utilizando EAP (Emulsão Asfáltica de Petróleo), agente rejuvenescedor emulsionado (ARE) e agregados fresados à temperatura ambiente (Bernucci et al., 2010).

Outra forma sustentável de produção de misturas asfálticas é a redução da temperatura de usinagem e compactação através da utilização de aditivos, que além de diminuir o consumo de energia reduz a emissão de gases poluentes, chamadas de misturas mornas (*Warm Mixture Asphalt – WMA*). Silva et al. (2010) reduziu em aproximadamente 30°C as temperaturas de mistura e compactação com a utilização do Evothem de terceira geração e Kheradmand et al. (2014) relatou que este aditivo reduziu 46%, 63%, 30%, 34% 58% e 81% as emissões de CO<sub>2</sub>, CO, VOC, PM, NO<sub>x</sub> e SO<sub>x</sub>, respectivamente.

A utilização de aditivos WMA pode ser benéfica em misturas recicladas, pois pode compensar a alta rigidez do ligante envelhecido presente no RAP com redução da sua viscosidade, permitindo assim que o aglutinante revista com facilidade os agregados em temperatura mais baixa, melhorando a trabalhabilidade e a compactação (Kristjánisdóttir et al., 2007; Goh e You, 2012; Omranian et al., 2017).

A literatura ainda carece de conhecimento sobre o comportamento de misturas mornas recicladas, visto que o ligante envelhecido do RAP pode não ser reativado o suficiente para desenvolver coesão entre o aglutinante e agregado, tornando-se susceptível ao dano por umidade (Mohammad et al., 2011; Ahmed, 2014). Autores citam que aditivos WMA aumentam a coesão na interface ligante-agregado, reduzindo a sensibilidade à água de misturas asfálticas recicladas (Silva et al., 2010).

O dano por umidade pode ser definido como perda da resistência e de durabilidade das misturas asfálticas devido ao efeito da água, reduzindo a rigidez das misturas e facilitando o desenvolvimento da fadiga e da deformação permanente. Além disso, este fenômeno não pode ser atribuído a um único mecanismo, e sim a qualquer fator que reduz a aderência entre ligante-agregado, como por exemplo características do ligante e agregado, efeito do tráfego, volume de vazios e do clima (Ahmed, 2014).

A principal variável que potencializa o dano causado pela presença de água na mistura asfáltica é o volume de vazios. A água, ao penetrar no interior dos poros das misturas asfálticas altera o equilíbrio das forças existentes podendo atuar de várias maneiras: agindo sobre a película do ligante asfáltico que recobre a superfície do agregado, ao ponto da resistência coesiva do revestimento se deteriorar pela presença da água na interface granular-ligante; ou, através da difusão da película de ligante asfáltico sob a forma de emulsão inversa, por meio da formação de gotículas de água no interior da película do ligante, diminuindo a coesão do ligante asfáltico e resultando no enfraquecimento da resistência coesiva do agregado (Terrel e Ai-Swailmi,

1994).

Assim, este trabalho busca analisar a influência da água na rigidez de misturas mornas recicladas com teores de 0%, 25% e 50% de RAP e dois tipos de ligante asfálticos, 50/70 e 60/85.

## 2. METODOLOGIA

Os materiais e misturas utilizadas são provenientes de Bohn (2017), e surgiu do interesse em avaliar o comportamento das misturas asfálticas mornas recicladas quando submetidas ao efeito destrutivo da água em sua estrutura.

O material reciclado é proveniente da fresagem com o equipamento PM 102 – CATERPILLAR de um trecho da BR-290, km 72+700, no estado do Rio Grande do Sul. Os agregados deste material são provenientes da pedra TRS em Santo Antônio da Patrulha (Km 30+500 da BR 290/RS) e estão enquadrados na faixa C (DNIT 031,2006) e o ligante é modificado por polímero 60/85. O teor de ligante encontrado foi de 5,66% (DNER ME 035, 1998) e a densidade máxima medida (Gmm) é 2,601 (NBR 15619, 2016). Utilizou-se somente o material passante na 3/8” nas porcentagens de substituição 25% e 50%.

Os agregados virgens também são da pedra TRS, sendo constituídas pelas britas 3/4”, 3/8” e pó de pedra e a granulometria das misturas estão enquadradas na faixa C (DNIT 031,2006). Estes agregados foram obtidos da britagem de rocha basáltica, proveniente da região morfológica da depressão central (Boeira, 2014).

Os ligantes asfálticos utilizados foram um asfalto modificado por polímero 60/85 STYLINK *Performance Grade* (PG) 76-22 (temperatura de mistura 171°C e compactação 151°C) e um ligante convencional 50/70 PG 58-28 (temperatura de mistura 149°C e compactação 137°C). O aditivo surfactante utilizado foi o Evotherm® M1 e a quantidade acrescida foi de 0,5% em função da massa de ligante virgem, possibilitando a redução das temperaturas de mistura e compactação.

As misturas foram dosadas utilizando o cálculo da volumetria Superpave e a utilização do Compactador Giratório Superpave com 100 giros, pressão vertical de 600 kPa, ângulo externo de 1,25° e interno de 1,16° e velocidade constante de 30 rpm.

Com isso elaborou-se 8 misturas asfálticas, sendo duas misturas à quente de referência com cada tipo de ligante, e as demais misturas mornas com 0%, 25% e 50% de fresado em substituição aos agregados virgens em massa para cada tipo de ligante, conforme mostrado na Tabela 1. Foram moldadas 2 amostras de 10x15 cm com volume de vazios de 5,5% ± 0,5% por mistura para avaliação da rigidez.

Os parâmetros volumétricos da dosagem para as 8 misturas estão apresentadas na Tabela 2. A temperatura de mistura e compactação das misturas convencionais à quente 50/70 e 60/85 foram às obtidas no ensaio de viscosidade do ligante asfáltico (NBR 15184/2004), enquanto que as misturas mornas com ligante 50/70 a temperatura de mistura e compactação foi 119°C e 129°C, respectivamente; para as misturas mornas com ligante 60/85 a temperatura de mistura e compactação foi de 141°C e 121°C, respectivamente.

**Tabela 1: Resumo das misturas utilizadas na pesquisa**

Mistura	Número de amostras
Convencional CAP 50/70	2
Morna CAP 50/70	2
Morna 25% Fresado CAP 50/70	2
Morna 50% Fresado CAP 50/70	2
Convencional AMP 60/85	2
Morna AMP 60/85	2
Morna 25% Fresado AMP 60/85	2
Morna 50% Fresado AMP 60/85	2

**Tabela 2 - Parâmetros da dosagem das 8 misturas asfálticas**

Mistura	Teor de ligante adicionado (%)	Teor de ligante envelhecido	Teor de ligante total (%)	VAM (%)	RBV (%)
Convencional 50/70	5,09	-	5,09	13,42	70,00
Morna 50/70	4,92	-	4,92	13,00	69,00
Morna 25% fresado 50/70	3,63	1,42	5,05	15,25	73,50
Morna 50% fresado 50/70	2,40	2,83	5,23	14,75	72,50
Convencional 60/85	5,03	-	5,03	13,48	70,00
Morna 60/85	4,82	-	4,82	12,48	68,50
Morna 25% fresado 60/85	3,22	1,42	4,64	13,95	72,50
Morna 50% fresado 60/85	2,37	2,83	5,20	14,05	72,00

Fonte: Adaptado de Bohn (2017)

A avaliação da danificação por umidade induzida das misturas foi baseada no ensaio Lottman modificado, o qual segue as normas AASHTO T 283- 14 - *Standard Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture - Induced Damage* e a norma brasileira ABNT/NBR 15617:2011 – Misturas Asfálticas - Determinação do Dano por Umidade Induzida. O ensaio avalia a longo prazo a durabilidade de misturas em relação a adesividade ligante/agregado considerando o efeito deletério da água, sendo a análise das relações de resistência à tração por compressão diametral de amostras condicionadas previamente e sem condicionamento. Entretanto, no caso desta pesquisa, a relação é entre o módulo complexo das misturas.

Neste ensaio, as amostras compactadas cilíndricas regulares de misturas asfálticas com teores de vazios preestabelecidos são parcialmente saturadas com água e submetidas a baixas temperaturas para congelamento, durante um período de horas estabelecido em norma, simulando, com isso a presença de água na mistura e as tensões internas induzidas por cargas do tráfego (Bernucci et al., 2010).

Primeiramente as amostras foram avaliadas quanto à rigidez sem condicionamento. Após realizou-se o primeiro ciclo de danificação do Protocolo Lottman Modificado e posteriormente avaliados à rigidez (Ciclo C1). Então, as mesmas amostras foram submetidas a um novo processo de danificação, chamado de ciclo 2 (C2) e também avaliadas quanto à rigidez.

O ciclo de condicionamento consiste em saturar os corpos de prova, com grau entre 70% e 80%,

através da imersão em água destilada e aplicação de vácuo na faixa de 13 a 67 kPa. Cada corpo de prova teve seu grau de saturação calculado. Após atingir a saturação requerida, os mesmos foram embalados ao vácuo e condicionados à temperatura de  $-18^{\circ}\text{C}$  por um período mínimo de 16h, esta temperatura leva o corpo de prova ao congelamento. Então, as amostras foram removidas da refrigeração e imersas em água destilada, à temperatura de  $60^{\circ}\text{C}$ , por um período de 24h. Por fim, os corpos de prova foram imersos em água a uma temperatura de  $25^{\circ}\text{C}$  por um período de 2h.

Após a realização do primeiro ciclo, os corpos de prova das misturas convencional 50/70 e morna 50/70 não resistiram ao protocolo de dano, isto é, ao serem submetidas por 24h à  $60^{\circ}\text{C}$  em água, se desmancharam, conforme Figura 1, portanto não foram avaliadas quanto à rigidez. Esse fato pode ter ocorrido devido às propriedades do ligante 50/70, pois o PG de alta temperatura é  $58^{\circ}\text{C}$ , o que pode explicar a desintegração das amostras. As outras misturas com ligante 50/70 não apresentaram esse comportamento, pois a incorporação do RAP provavelmente aumentou o PG da mistura entre ligante virgem e envelhecido.



**Figura 1:** Amostras referentes às Misturas Convencional e Morna 50/70.

A análise quanto à rigidez das misturas foi realizada pelo ensaio de Módulo Complexo, Figura 2, o que permitiu verificar a influência da umidade na rigidez das misturas. O condicionamento das amostras, bem como toda a realização do ensaio, seguiu os preceitos da norma AASHTO T 342 - 11 – *Determining Dynamic Modulus of Hot mix Asphalt Concrete Mixtures*.



**Figura 2:** Ensaio de Módulo Complexo

O módulo complexo ( $E^*$ ) é um número imaginário que relaciona a tensão axial à deformação axial em um corpo-de-prova cilíndrico sujeito a um carregamento dinâmico com pulsos

senoidais. O ensaio consiste na aplicação de uma carga uniaxial senoidal em corpos de provas cilíndricos. Segundo Nascimento (2008), a relação tensão-deformação é definida pelo Módulo Complexo, e o seu valor absoluto,  $|E^*|$ , é definido como Módulo Dinâmico, e a defasagem entre a aplicação de carga e a resposta da amostra é o ângulo de fase da mistura asfáltica ( $\delta$ ).

Realizou-se o ensaio para as 6 misturas após cada ciclo de danificação por umidade, sendo ensaiadas duas amostras por mistura, totalizando 12 corpos de prova. O ensaio foi realizado nas frequências de 25 Hz, 20 Hz, 10 Hz, 5 Hz, 2 Hz, 1 Hz, 0,5 Hz, 0,2 Hz, 0,1 Hz e 0,01 Hz, e nas temperaturas de - 10°C, 4°C, 21°C, 37°C e 54°C, com deformação dentro do limite das pequenas deformações (entre 50 a 75  $\mu\text{m/m}$ ), ou seja, dentro do limite viscoelástico. Com os resultados experimentais foi realizada a modelagem física-matemática 2S2P1D (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.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para a modelagem viscoelástica foi utilizado o modelo reológico 2S2P1D na construção das curvas mestras de módulo dinâmico e ângulo de fase das misturas. Os valores encontrados no modelo e as constantes C1 e C2 do WLF (William, Landel e Ferry), que foram utilizadas para translação das diferentes temperaturas e montagem das curvas mestras, estão apresentadas nas Tabelas 3 a 5. A fim de diferenciar as constantes de WLF da representação adotada para os ciclos C1 e C2, essas foram retratadas como  $C1_{WLF}$  e  $C2_{WLF}$  mostradas na Tabela 3 os encontrados por Bohn (2017), na Tabela 4 para o Ciclo 1 (C1) e na Tabela 5 para o Ciclo 2 (C2).

**Tabela 3:** Parâmetros do modelo 2S2P1D e valores de  $C1_{WLF}$  e  $C2_{WLF}$  de cada mistura sem danificação.

MISTURA	E*							WLF	
	E <sub>00</sub> (MPa)	E <sub>0</sub> (MPa)	K	h	$\delta$	$\tau_E$ (s)	$\beta$	C1 <sub>WLF</sub>	C2 <sub>WLF</sub> (°C)
Convencional 50/70	50	31500	0,220	0,60	2,20	0,40	200	31,82	230,12
Morna 50/70	35	32250	0,220	0,60	2,20	0,40	200	31,80	229,98
Morna 25% Fresado 50/70	65	32500	0,224	0,58	2,15	0,60	500	31,74	229,62
Morna 50% Fresado 50/70	110	33500	0,220	0,57	2,40	0,10	200	32,41	233,80
Convencional 60/85	85	33500	0,220	0,57	2,15	0,35	500	25,04	189,35
Morna 60/85	95	31000	0,258	0,60	2,90	0,40	200	31,41	229,67
Morna 25% Fresado 60/85	115	34800	0,195	0,54	1,70	1,50	1500	31,17	227,82
Morna 50% Fresado 60/85	110	34000	0,185	0,52	1,78	1,80	1500	32,39	231,79

Fonte: Bohn (2017).

**Tabela 4:** Parâmetros do modelo 2S2P1D e valores de  $C1_{WLF}$  e  $C2_{WLF}$  das misturas após o Ciclo 1.

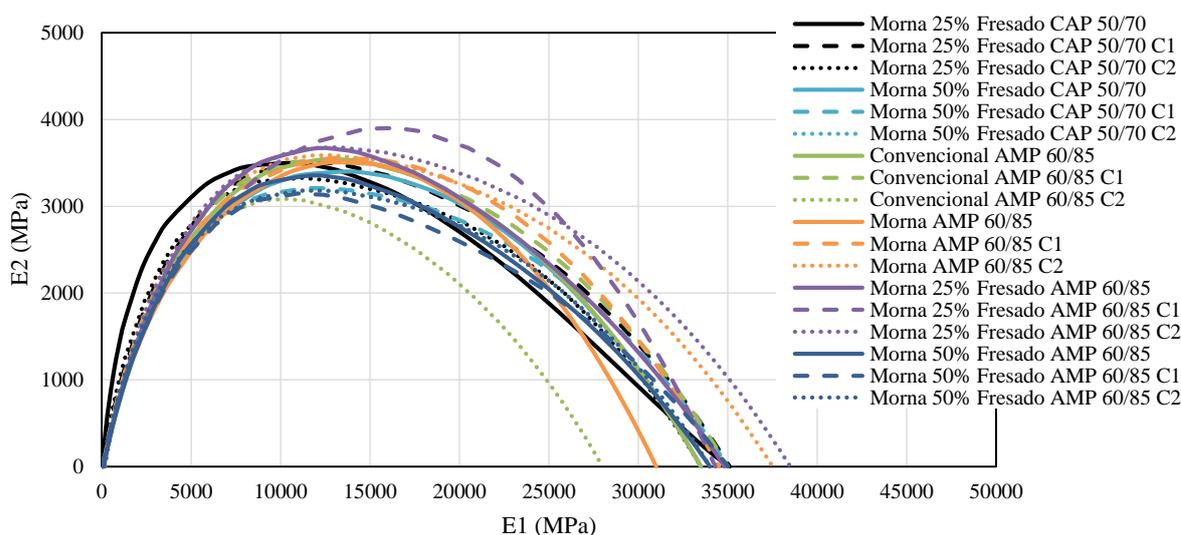
Mistura	E*							WLF	
	E <sub>00</sub> (MPa)	E <sub>0</sub> (MPa)	K	h	$\delta$	$\tau_E$ (s)	$\beta$	C1 <sub>WLF</sub>	C2 <sub>WLF</sub> (°C)
Morna 25% Fresado 50/70	35	35100	0,200	0,59	2,10	0,20	15000	27,88	201,42
Morna 50% Fresado 50/70	50	35000	0,195	0,58	2,38	0,40	15000	25,41	186,33
Convencional 60/85	85	35000	0,210	0,59	2,21	0,20	15000	27,69	200,22
Morna 60/85	85	34500	0,229	0,61	2,60	0,30	15000	27,53	199,25

Morna 25% Fresado 60/85	70	34300	0,270	0,64	3,70	0,40	15000	29,82	212,01
Morna 50% Fresado 60/85	37	35000	0,170	0,52	1,92	0,20	15000	27,69	200,23

**Tabela 5:** Parâmetros do modelo 2S2P1D e valores de  $C1_{WLF}$  e  $C2_{WLF}$  das misturas após o Ciclo 2.

MISTURA	$E^*$						WLF		
	$E_{00}$ (MPa)	$E_0$ (MPa)	k	h	$\delta$	$\tau_E$ (s)	$\beta$	$C1_{WLF}$	$C2_{WLF}$ (°C)
Morna 25% Fresado 50/70	45	33500	0,21	0,65	2,40	0,40	15000	19,81	151,22
Morna 50% Fresado 50/70	50	34000	0,20	0,59	2,40	0,40	15000	19,76	151,75
Convencional 60/85	70	28000	0,22	0,60	2,00	0,40	15000	24,21	170,73
Morna 60/85	120	37500	0,20	0,60	2,30	0,10	1000	38,22	271,38
Morna 25% Fresado 60/85	50	34000	0,20	0,59	2,40	0,40	15000	27,47	198,90
Morna 50% Fresado 60/85	200	34500	0,20	0,60	2,30	0,10	1000	39,83	269,55

A Figura 3 apresenta o espaço Cole Cole com a modelagem 2S2P1D para os valores de referência, valores após C1 e após C2. Na parte real tem-se E1, no eixo das abscissas, e a parte imaginária E2, no eixo das ordenadas, e é semelhante a um arco de círculo. Com E1 pode-se avaliar a parte recuperável da energia armazenada, e com E2 o comportamento viscoso do material devido à dissipação de energia.



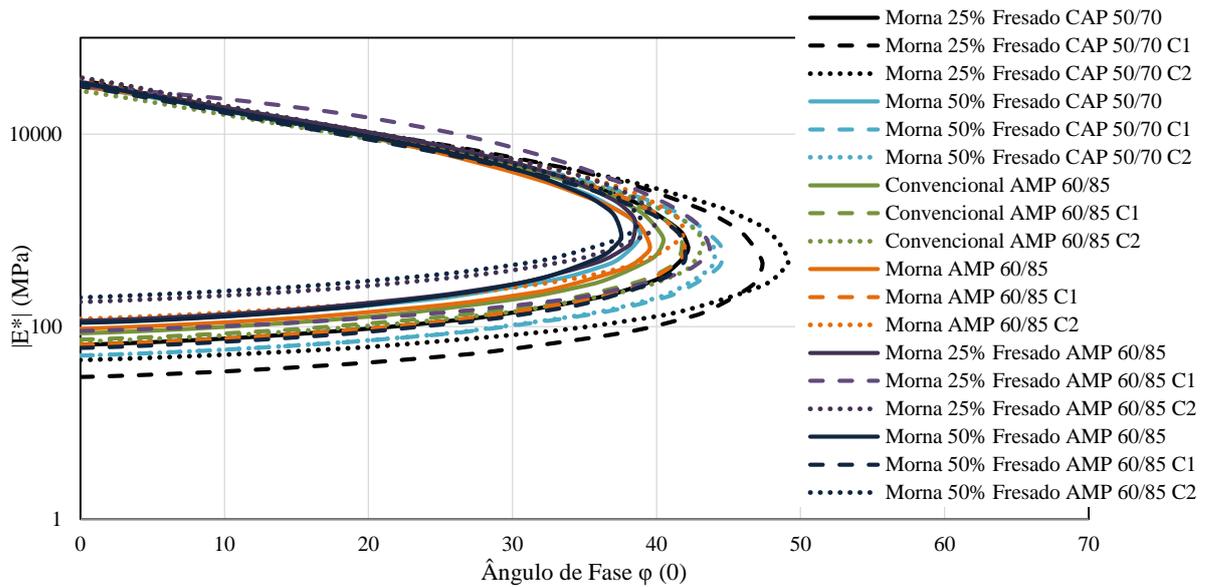
**Figura 3:** Espaço Cole Cole com a modelagem 2S2P1D das misturas

Comparando as misturas convencional à quente e morna com ligante 60/85, verifica-se comportamentos distintos. A mistura à quente resistiu ao C1 sem alterar suas propriedades, entretanto, após C2 reduziu os valores de E2 e E1, mostrando danificação no material. A mistura morna aumentou o valor de E1 após os dois ciclos, tornando-se uma mistura mais elástica. Esta mesma tendência foi verificada para mistura morna 25% RAP e a mistura morna com 50% RAP não apresentou alteração após danificação.

As misturas morna 50/70 com 25% e 50% de RAP apresentaram comportamentos semelhantes, mesmo após os dois ciclos de danificação. Como não foi possível ensaiar a mistura à quente e morna sem RAP com este ligante, ficou comprometida a análise quanto a influência do teor de RAP nas misturas. A mistura morna 60/85 com 50% de fresado apresentou comportamento semelhante as mesmas misturas com ligante 50/70, o que permite afirmar que misturas com

incorporação de RAP são menos susceptíveis ao dano por umidade.

Os resultados para a modelagem do Diagrama Black para as misturas estão apresentados na Figura 4 e permite verificar a relação entre o módulo dinâmico e o ângulo de fase ( $\phi$ ) para diferentes temperaturas. A mistura convencional à quente e morna 60/85 não apresentaram diferenças nos valores de ângulo de fase nas amostras sem danificação. Após C1 e C2, aumentou-se levemente o ângulo de fase das misturas, mostrando baixa danificação das amostras. Sem danificação, a incorporação do RAP na mistura morna 60/85 não alterou os valores de ângulo de fase. Após C1 e C2, houve uma tendência de que quanto maior o teor de RAP maior o comportamento elástico das misturas.



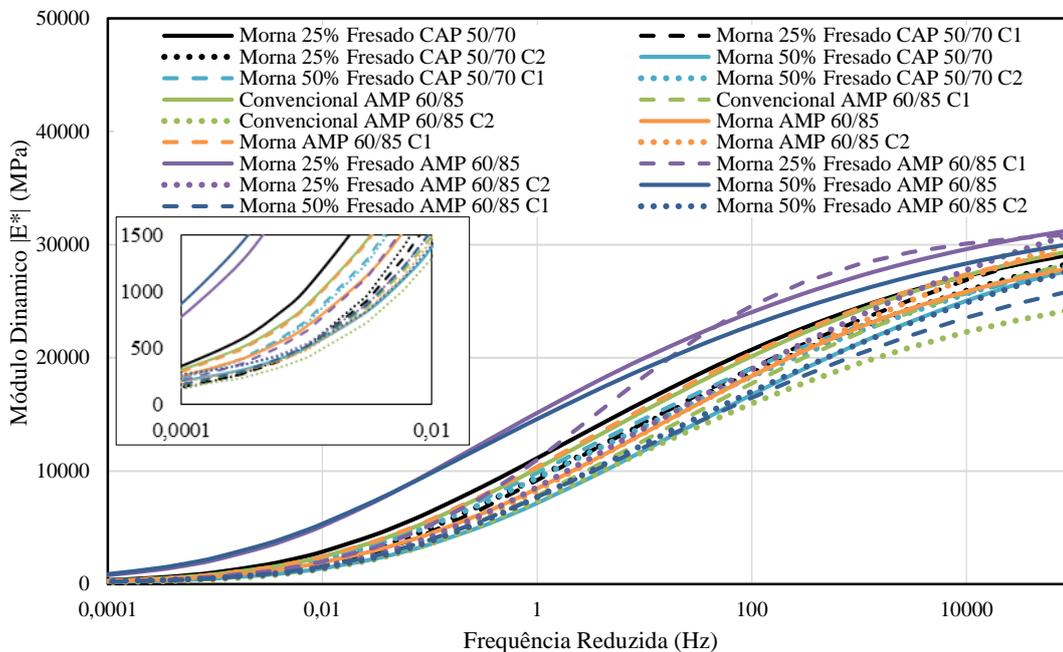
**Figura 4:** Diagrama Black com a modelagem 2S2P1D das misturas.

Para as misturas mornas 50/70, quanto maior o teor de substituição de RAP maior o comportamento elástico das misturas considerando um mesmo nível de danificação. Além disso, as misturas com esse ligante se mostraram mais susceptíveis ao dano por umidade do que às mesmas misturas com ligante 60/85.

As curvas mestras de módulo dinâmico, Figura 5 dos valores de referência, C1 e C2, foram construídas considerando o comportamento termoreológico das misturas asfálticas, a partir dos resultados dos ensaios de módulo complexo (módulo dinâmico e ângulo de fase), utilizando-se do princípio da superposição tempo-temperatura (TTSP – *Time-Temperature Superposition Principle*), sendo as curvas ajustadas pelo modelo reológico 2S2P1D. Estas curvas possibilitam a previsão dos valores de uma determinada rigidez ao longo de uma gama de frequências mais ampla do que a utilizada inicialmente, e nas mais variadas temperaturas. As análises nas altas frequências correspondem às baixas temperaturas e nas baixas frequências às altas temperaturas. Ressalta-se que quanto maior a rigidez da mistura, melhor a distribuição das tensões que um revestimento transfere para as camadas subjacentes.

A mistura convencional à quente 60/85 apresentou maior rigidez em relação a mistura morna 60/85 sem danificação. Após C1 e C2, a mistura morna não apresentou alteração de rigidez em grande parte das frequências de ensaio, somente perda em frequências abaixo de 1 Hz, enquanto

que a mistura à quente perdeu rigidez em todo o espectro. A mistura morna 60/85 com 50% e 25% RAP apresentaram maior rigidez que a quente 60/85 e morna 60/85, e com os ciclos de danificação a perda de rigidez foi significativa, entretanto, os valores finais ficaram semelhantes às misturas danificadas à quente e morna 60/85.



**Figura 5:** Curvas mestras de módulo dinâmico das misturas (@ 21°C).

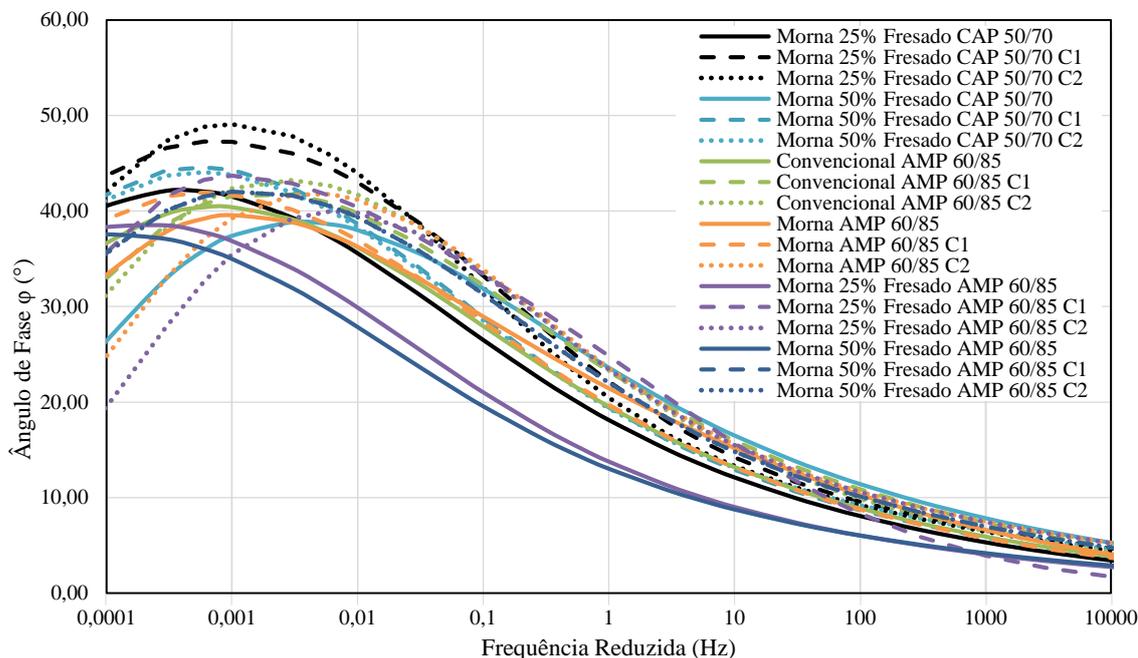
Sem danificação, a mistura morna 50/70 com 25% RAP apresentou maior rigidez que a mistura com 50% RAP. Após a danificação C1 e C2, os valores de rigidez para ambas as misturas se igualaram para todo o espectro de frequência, ou seja, estas misturas mostraram-se pouco susceptíveis a danificação por umidade. A mistura morna 60/85 com 25% e 50% RAP apresentaram maior rigidez que as misturas mornas 50/70 com 25% e 50% RAP nas amostras sem danificação. Após a danificação, os valores foram semelhantes, ou seja, apesar de semelhantes, houve maior perda de rigidez nas misturas com ligante 60/85 com RAP.

O ângulo de fase ( $\phi$ ) é um parâmetro utilizado frequentemente para avaliar o efeito da modificação por polímero, e está relacionado às propriedades elásticas e viscosas dos materiais asfálticos. Estas curvas foram obtidas através da modelagem 2S2P1D e estão apresentadas na Figura 6, com os valores de referência, C1 e C2.

Verifica-se que as misturas convencional e morna sem RAP apresentaram pouca variação do ângulo de fase após C1 e C2. As misturas mornas com 25% e 50% de RAP e ligante 50/70 e 60/85 tendem a aumentar os valores de pico de ângulo de fase após C1 e C2, sendo que entre C1 e C2 houve pouca variação. Isso significa que a danificação das misturas aumentou o comportamento viscoso, além de que a incorporação do RAP também aumentou a susceptibilidade das misturas.

A misturas morna 50/70 e 25% RAP mostrou-se mais susceptível a danificação em relação à mistura com 50% RAP, enquanto que a mistura morna 60/85 com 25% e 50% de RAP apresentaram danificação semelhantes. Também ocorreu uma tendência de o comportamento

das misturas mornas 50/70 ser mais viscoso que as misturas mornas 60/85 para um mesmo teor de RAP.



**Figura 6:** Curvas mestras de ângulo de fase das misturas (@ 21°C).

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As misturas que apresentaram ser mais suscetíveis ao dano por umidade foram as misturas convencional à quente 50/70 e a morna 50/70 que não suportaram a exposição ao primeiro dos ciclos de condicionamento, pois se desintegraram na etapa em que as amostras eram submersas em água à 60°C por 24h. Esse fato pode ser atribuído às misturas conterem somente ligante convencional 50/70 e este possuir *PG 58*, pois as misturas mornas 50/70 com 25% e 50% RAP, que continham o material fresado suportaram todos os ciclos de condicionamento.

De modo geral, verificou-se que o Ciclo 1 de danificação foi mais significativo em alterar a rigidez das misturas, e a rigidez diminuiu após os ciclos de danificação por umidade. A mistura convencional à quente 60/85 apesar de apresentar maior rigidez foi mais susceptível ao dano por umidade que a morna 60/85, e a incorporação de fresado aumentou a rigidez das misturas sem danificação e após C1 e C2. Apesar da maior rigidez das misturas com RAP, também se mostraram mais susceptíveis à perda de rigidez com o dano por umidade do que as misturas sem RAP.

Para as misturas com RAP, o ligante 60/85 conferiu maior rigidez em relação ao ligante 50/70 nas amostras sem danificação. Entretanto, após C1 e C2 a rigidez das mistura para ambos os ligantes foram próximas, o que caracteriza uma maior perda de rigidez das misturas com ligante modificado.

Com isso, pode-se afirmar que as misturas mornas e a utilização de RAP apresentaram comportamento ao dano por umidade semelhante ou até melhor em relação às misturas convencionais à quente, sendo uma alternativa sustentável, por reduzir a emissão de gases

devido a menor temperatura de mistura e compactação e pela reutilização de agregados e ligante asfálticos do RAP. Entretanto, salienta-se que é importante uma análise quanto ao dano das misturas mornas recicladas, a fim de corroborar sua utilização.

#### Agradecimentos

À Petrobras pelo fomento à pesquisa e ao CNPq e Capes pelas bolsas de pesquisa.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO T 342 (2011) - *Standard Method of Test for Determining Dynamic Modulus of Hot-Mix Asphalt Concrete Mixtures*. American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington, D. C.
- AASHTO T 283 (2014) - *Standard Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture - Induced Damage*. American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington, D. C.
- ABNT (2004) NBR 15184 – *Materiais betuminosos - Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ABNT (2011) NBR 15617 – *Misturas asfálticas - Determinação do dano por umidade induzida*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ABNT (2016) 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.
- Ahmed, T. A. H. (2014) *Investigating the rutting and moisture sensitivity of warm mix asphalt with varying contents of recycled asphalt pavement*. Doctoral Thesis. The University of Iowa, Iowa City, Iowa.
- Bernucci, L. B.; Motta, L. G.; Ceratti, J. A. P.; Soares, J. B. (2010) *Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros*. Rio de Janeiro: Petrobrás: ABEDA.
- Boeira, F. D. (2014) *Estudo do comportamento de concretos asfálticos com diferentes tipos de agregados e cales*. 148p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.
- Bohn, K. A. (2017) *Avaliação das misturas asfálticas mornas com uso de ligantes convencional e modificado por polímero*. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Santa Maria, RS.
- Bonicelli, A. et al. (2017) *Experimental study on the use of rejuvenators and plastomeric polymers for improving durability of high RAP content asphalt mixtures*. *Construction and Building Materials*, v. 155, p. 37-44. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.013>.
- 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 (1998) ME 035 – *Agregados – determinação da abrasão “Los Angeles”*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro.
- DNIT (2006) 031 - ES: *Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de serviço*. Rio de Janeiro.
- DNIT (2006) *Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos*. Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. 2ª ed. 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.
- Goh, S., You, Z. (2012). *Mechanical properties of porous asphalt pavement materials with warm mix asphalt and RAP*. *Journal of Transportation Engineering* 138(1), 90-97. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000307](https://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000307).
- Hoy, M. et al. (2017) *Effect of Wetting-Drying Cycles on Compressive Strength and Microstructure of Recycled Asphalt Pavement – Fly Ash Geopolymer*. *Construction and Building Materials*, v. 144, p. 624-634. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2017.03.243](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.243).
- Kheradmand, B., Muniandy, R., Hua, L.T., et al. (2014). *An overview of the emerging warm mix asphalt technology*. *International Journal of Pavement Engineering* 15(1), 79-94. DOI: <https://doi.org/10.1080/10298436.2013.839791>.
- Kristjánssdóttir, Ó., Muench, S.T., Michael, L., Burke, G. (2007). *Assessing potential for warm-mix asphalt technology adoption*. *Transportation Research Record* 2040, 91-99.

DOI: <https://doi.org/10.3141/2040-10>.

- Mangiafico, S. (2014) *Linear viscoelastic properties and fatigue of bituminous mixtures produced with Reclaimed Asphalt Pavement and corresponding binder blends*. Tese de Doutorado. l'École Nationale des Travaux Publics de l'État.
- Nascimento, L. A. H. (2008) *Nova Abordagem da Dosagem de Misturas Asfálticas Densas com Uso do Compactador Giratório e Foco na Deformação Permanente*. Dissertação de mestrado em Ciências em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio de Janeiro.
- NAPA (2015) *Asphalt Pavement Industry Survey on Recycled Materials and Warm-Mix Asphalt Usage*. National Asphalt Pavement Association.
- Omranian, S. E.; Hamzah, M. O.; Gungat, L.; Teh, S. Y. (2018) *Evaluation of asphalt mixture behavior incorporating warm mix additives and reclaimed asphalt pavement*. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition). Doi: 10.1016/j.jtte.2017.08.003.
- 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.
- Silva, H., Oliveira, J., Ferreira, C., et la., (2010). *Assessment of the performance of warm mix asphalts in road pavements*. International Journal of Pavement Research and Technology 3(3), 119-127. ISSN 1997-1400.
- Terrel, R; Al-Swailmi, S. (1994) *Water Sensitivity of Asphalt-Aggregate Mixes: test selection*. Strategic Highway Research Program. National Research Council. Washington, D.C. (USA).