

PROPRIEDADES DE RIGIDEZ SOB O DOMÍNIO DA ELASTICIDADE E VISCOELASTICIDADE E RESISTÊNCIA À DEFORMAÇÃO PERMANENTE DE MISTURAS COM CAP 50/70 E CAP 30/45

Andressa Ambrós de Oliveira
Ketrily Killys Martins Saraiva
Fernando Luiz Zucchi
Évelyn Paniz Possebon

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

RESUMO

A relação direta existente entre a qualidade do pavimento e o desempenho do ligante determinam o comportamento mecânico de misturas asfálticas nas propriedades de dosagem, rigidez e deformação permanente. As duas misturas asfálticas produzidas neste trabalho, a partir dos CAPs 30/45 e 50/70 da refinaria REGAP (MG), com esqueleto pétreo conforme a Faixa C do DNIT e dosadas pela metodologia Superpave, foram submetidas aos ensaios de Módulo de Resiliência e Módulo Complexo para avaliar a rigidez das misturas; Resistência a tração por compressão diametral e *Flow Number* (FN) para avaliar danificação. As análises dos resultados de Módulo Complexo foram realizadas pela modelagem 2S2P1D e a mistura com CAP 30/45 se mostrou mais rígida e menos suscetível à temperatura. Os resultados de *Flow Number* foram analisados utilizando o modelo de Francken e a mistura com CAP 30/45 suportou mais ciclos de carregamento antes da ruptura.

ABSTRACT

The direct relationship between the quality of the pavement and the performance of the binder determinates the mechanical behavior of mixtures on the dosage properties, stiffness and permanent deformation. Both mixtures produced in this work, from the 30/45 and 50/70 PACs of the REGAP (MG) refinery, with aggregates from the DNIT C range and dosed by the Superpave methodology, were submitted to the following tests: Resilience Module and Complex Module to evaluate the stiffness of the mixtures; Diametral Tensile Strength and Flow Number (FN) to evaluate the rutting. The Complex Modulus results were analyzed by the 2S2P1D modeling and the results showed that the mixture with PAC 30/45 is stiffer and less susceptible to temperature than the PAC 50/70 mixture. The Flow Number results were analyzed using the Francken model and the PAC 30/45 mixture supported more loading cycles before failure.

1. INTRODUÇÃO

O crescimento da frota de veículos nas rodovias brasileiras demonstra a importância do transporte rodoviário na economia e organização social do país, sendo indispensável o correto dimensionamento e especificação de materiais para proporcionar o conforto, durabilidade e segurança aos usuários.

O concreto asfáltico é o principal tipo de revestimento das rodovias pavimentadas do Brasil, e sua composição deverá cumprir todas as demandas estruturais e funcionais necessárias ao desempenho e durabilidade mais apropriados para a demanda de cada localidade, incluindo a composição do carregamento dos veículos e o clima. Sendo assim, a avaliação do comportamento dos ligantes asfálticos em misturas torna-se indispensável, devido à relação direta existente entre qualidade do pavimento e desempenho do ligante, pois sua função é a de aglutinar os agregados, conferindo propriedades de resistência e durabilidade ao revestimento.

King (1999), Nascimento (2008), Nascimento (2015) e Kim (2002) afirmam que os tipos mais comuns de deterioração dos pavimentos asfálticos são deformação permanente e formação de trincas por fadiga e baixas temperaturas. O afundamento da trilha de rodas geralmente leva à perda de regularidade e serventia dos pavimentos e resulta da deformação permanente

causada pela deformação plástica destes sob carga cíclica, problema que se acentua quando as temperaturas são mais altas.

Atualmente os cimentos asfálticos de petróleo (CAP) aplicados nos pavimentos brasileiros são produzidos e comercializados por nove refinarias da Petrobras, cada uma com as suas etapas de produção. Os CAPs são fabricados a partir de diferentes processos de refino, originando CAPs de diferentes especificações, como o CAP 30/45 e o CAP 50/70, que diferem quimicamente, reologicamente e no comportamento em campo. A definição do tipo de CAP a ser utilizado em cada situação deve ser acertada conforme as características mecânicas que estes propiciam às misturas.

A reprodução dos carregamentos e das deformações de campo em laboratório restringem as condições que os pavimentos estão realmente submetidos. As modelagens baseadas na teoria da elasticidade e viscosidade limitam ainda mais as condições de campo, deixando de considerar temperatura, variação de carga e recuperação da deformação da mistura. Dentro deste contexto, é necessário utilizar modelos matemáticos que se aproximem das variáveis reais, como o 2S2P1D (2 *Springs* - molas, 2 *Parabolic* – elementos parabólicos, 1 *Dashpot* - amortecedor) desenvolvido por Di Benedetto et al. (2004), utilizado neste trabalho.

Conhecer de forma mais completa a influência que os dois tipos de CAPs comercializados no Brasil têm nas misturas é o que impulsionou a realização deste artigo, que visa quantificar as propriedades mecânicas, quanto à rigidez e a deformação permanente, de duas misturas produzidas com CAPs 30/45 e 50/70 produzidos pela refinaria REGAP (MG).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A primeira etapa da pesquisa foi coletar, separar, e caracterizar os CAPs, agregados e a cal. Em seguida foram dosadas as misturas asfálticas, ambas com o mesmo esqueleto pétreo. O teor de CAP foi determinado pela metodologia Superpave e então foi realizada a moldagem dos corpos de prova com volume de vazios e dimensões coerentes com as normas dos ensaios. Foram utilizados dois CAPs provenientes da mesma refinaria, REGAP, o 30/45 e o 50/70. Por fim, as misturas com diferentes CAPs foram ensaiadas para verificar o comportamento seu quanto a rigidez e ao dano por deformação permanente.

2.1 Materiais utilizados

Os agregados utilizados são provenientes do município de Itaara/RS, localizado na formação geológica do Planalto Basáltico, classificado como um riódacito de origem vulcânica. Foram utilizadas as frações brita 3/4, brita 3/8, pó de pedra e cal. Realizaram-se ensaios de índice de forma (conforme DNER-ME-086/94, resultados para a brita 3/4”: 0,94% e 3/8”: 0,78%), índice de lamelaridade (a norma utilizada foi DAER/RS-EL 108/01, resultados para a brita 3/4”: 9,20% e 3/8”: 27,4%), sanidade (DNER-ME 089/94, resultado 0,44%), abrasão (DNER-ME 035/98, resultando 13%) e equivalente de areia (DNER-ME 054/97 com resultado de 80%). Ainda, foi realizado o ensaio de absorção conforme DNER-ME 195/97, cujo resultado encontrado foi de 2,93%, valor considerado alto para este tipo de agregados. A adesividade do agregado se mostrou satisfatória para os dois tipos de CAPs estudados. Foram realizados ensaios de textura dos agregados por AIMS e químicos para a cal, cujos resultados podem ser encontrados em Possebon (2018). Foram coletados dois CAPs, 30/45 e 50/70, produzidos pela REGAP (MG), para avaliar seus desempenhos em misturas utilizando agregados do RS, uma vez que o estado do Rio Grande do Sul ainda não produz CAP 30/45. O resultado dos

ensaios de penetração, viscosidade Brookfield e ponto de amolecimento realizados confirmam o laudo das refinarias, cujos valores estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Resultados dos ensaios de especificação dos CAP conforme laudos.

PROPRIEDADE/UNIDADE	LIMITES	LIMITES	MÉTODO	30/45	50/70
	30/45	50/70		REGAP	REGAP
Penetração (0,1mm)	30 a 45	50 a 70	D 5	30	50
Ponto de Amolecimento (°C)			D 36	63,2	50,2
Viscosidade Brookfield a 135°C, SP 21, 20rpm (cP)	374	274	D 4402	430	315
Viscosidade Brookfield a 150°C, SP 21 (cP)	203	112	D 4402	211	169
Viscosidade Brookfield a 177°C, SP 21 (cP)	76 a 285	57 a 285	D 4402	76	64
RTFOT Penetração Retida (%)	60	55	D 5	70	55
RTFOT Aumento Ponto de Amolecim. (°C)	8	8	D 36	4,2	4,8
RTFOT Ductilidade a 25°C (cm)	10	20	D 113	>150	>150
RTFOT Variação em % Massa (%)	0,5	-0,5 a 0,5	D 2872	-0,105	-0,121
Ductilidade a 25°C (cm)	60	60	D 113	>150	>150
Solubilidade no Tricloroetileno (% massa)	99,5	99,5	D 2042	99,9	99,9
Ponto de Fulgor (°C)	235	235	D 92	304	328
Índice de Suscetibilidade Térmica	-1,5 a 0,7	-1,5 a 0,7	X 018	-1,5	-1,1
Densidade relativa a 20/4 °C			D 70	1,011	1,011

As misturas asfálticas desta pesquisa foram realizadas com dois CAPs diferentes, ambas com o mesmo esqueleto pétreo e 2% de cal (valor comumente adotado nos projetos de pavimentos no RS). O teor de CAP de projeto foi definido pela metodologia Superpave, utilizando o Compactador giratório Superpave.

A composição granulométrica da mistura foi estudada e definida para se adequar aos limites da Faixa C do DNIT 031/2006 bem como os limites do método Bailey para misturas miúdas. A mistura é considerada miúda conforme o *Asphalt Institute* (2011) pois 51,7% do material é passante na peneira 4,75mm (peneira de controle para este TMN). Privilegiou-se o melhor ajuste granulométrico. Para mistura foi definida a proporção de agregados de: 29% de brita 3/4", 23% de brita 3/8", 46% de pó de pedra e 2% de cal.

A curva de composição granulométrica da mistura está apresentada na Figura 1 onde é possível visualizar o encaixe da curva de composição das misturas (preta) entre as curvas de limites da faixa C do DNIT (vermelhas) e também o ajuste entre a faixa de trabalho (curvas verdes). Também se observou os limites e a zona de restrição da metodologia Superpave.

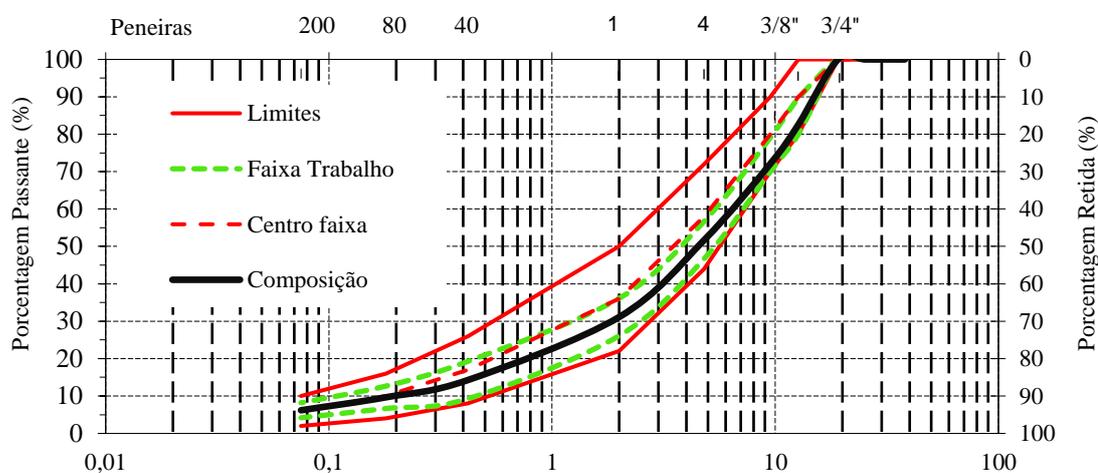


Figura 1: Curva da composição granulométrica - Faixa C DNIT-ESP 031/2006.

2.2 Ensaios Laboratoriais

Os ensaios laboratoriais realizados, do ponto de vista do domínio da rigidez, foram: módulo de resiliência, que avalia o comportamento elástico da mistura, e módulo complexo, que considera o seu comportamento viscoelástico. Sob o domínio da danificação da mistura, foram realizados os ensaios de: *Flow Number* para avaliar a deformação permanente, e ensaio de resistência à tração por compressão diametral.

2.2.1 Ensaios para misturas asfálticas quanto à rigidez

O ensaio de módulo de resiliência tem como objetivo mensurar a capacidade que um corpo elástico tem de armazenar energia e retornar ao estado inicial após a aplicação de uma carga. Para tal foi utilizada a prensa Universal Testing Machine UTM – 25 da IPC Global. A prensa possui um pistão que aplica ciclos de carga de 1 Hz de frequência nos CPs, que devem estar condicionados a 25°C antes de iniciar o ensaio.

O módulo de resiliência é medido a partir da aplicação do carregamento dinâmico com tempo de 0,1s de duração e 0,9s de repouso. Assim, a amostra sofre deformações horizontais, que são medidas através de dois LVDT's, ligados a um computador, que coleta e arquiva todas as informações. O carregamento utilizado é o mínimo suficiente para deformar a amostra. O coeficiente de Poisson, para execução do ensaio, foi fixado em 0,30 para 25°C de acordo com a norma DNIT – ME 135/2010. Neste estudo foi considerada a influência do arranjo granulométrico dentro das amostras na determinação dos valores de módulo, o que levou a realizar os ensaios de MR em duas direções (0° e 90°).

O ensaio de Módulo Complexo (E^*) é baseado na norma da AASHTO T 342-11 – *Determining Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt* (HMA). Segundo essa norma, as temperaturas de ensaio devem ser -10°C, 4°C, 21°C, 37°C e 54°C, as frequências de carregamento são 0,1, 0,5, 1, 5, 10 e 25Hz (para cada temperatura) e o tamanho do corpo-de-prova deve ter um diâmetro entre 100 e 104 mm, altura de 147,5 e 152,5mm e tamanho máximo nominal de agregados de 37,5 mm.

O ensaio foi realizado na prensa UTM-25, que aplica um carregamento axial semi-senoidal no corpo-de-prova para medir os deslocamentos verticais. Foram utilizados 3 LVDTs, fixados com pinos nos CPs, segurados por uma borracha contra o CP, pois há tendência de se soltarem em altas temperaturas. A Figura 2 apresenta o CP posicionado na prensa conforme o ensaio, na temperatura de -10°C.



Figura 2: Realização do ensaio de Módulo dinâmico na prensa UTM-25 no LMCC.

Foi utilizada a modelagem 2S2P1D, desenvolvida por Di Benedetto & Corté (2005), para interpretar os resultados do ensaio para carregamentos bidimensionais. O modelo 2S2P1D aplicado a este caso possui os parâmetros de calibração para representação correta do comportamento viscoelástico do material em termos de módulo e ângulo de fase para temperatura e frequência de carregamento variado.

2.2.2 Ensaio de danificação para misturas asfálticas

O ensaio de Resistência à tração por compressão diametral foi realizado conforme a norma DNER-ME 138/94. Para este ensaio pode-se utilizar os mesmos CPs ensaiados pelo MR. O ensaio também é feito na prensa UTM-25 e consiste na aplicação de uma carga estática de compressão distribuída ao longo de duas geratrizes opostas, com objetivo de obter as tensões de tração através do diâmetro horizontal, perpendicularmente à carga. O CP, que nesse ensaio teve as dimensões de 6,3cm de altura e 10cm de diâmetro, deve estar apoiado sobre uma geratriz com temperatura controlada de 25°C, antes de ser aplicada a carga. A prensa UTM-25 e o software adaptado forneceram dados de deslocamento vertical e força a cada 0,01 segundo.

O ensaio de Flow Number é realizado considerando a norma ABNT NBR 16505:2016 e objetiva avaliar a resistência das misturas asfálticas a deformações permanentes baseado em cargas repetidas e é realizado pela prensa UTM-25. O ensaio consiste na aplicação de pulsos de carga cilíndrica na direção axial dos CPs, que tem dimensões de $150 \pm 2,5$ mm de altura e 102 ± 2 mm de diâmetro, aplicados a uma frequência de 1Hz, na qual existe um carregamento de 0,1s e repouso de 0,9s. A Figura 3 mostra o aparato para realização do ensaio e o posicionamento do CP, bem como um CP após a ruptura.

A relação do ensaio de FN com a deformação permanente está ligada ao fato de que quanto maior o número de ciclos e menor a deformação acumulada, menor é a propensão do pavimento à formação de trilhos de roda.

O ensaio encerra quando um dos casos ocorre: O Flow Number é atingido, ou seja, quando o número de ciclos em que a deformação de cisalhamento inicia sob volume constante. Este é o ponto em que a deformação permanente acumulada no corpo de prova aumenta rapidamente; ou quando o número de ciclos chegar a 7500.



Figura 3: Realização do ensaio *Flow Number* na prensa UTM-25.

Para que uma determinada mistura asfáltica não apresente deformação permanente no campo, espera-se que os valores limites definidos (critérios de FN) para alguns volumes de tráfego sejam respeitados. Nascimento (2008) definiu que os limites de tráfego médio e pesado tem valores de 300 KPa e 750 KPa, respectivamente. Já os limites de tráfego propostos por Bastos (2017), tem valor de 100 KPa para tráfego médio e 300 KPa para tráfego pesado.

3. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

3.1 Dosagem das misturas

A definição do teor de ligante foi realizada por tentativas, com o objetivo de atingir o volume de vazios (VV) de 4% nas duas misturas. Os resultados obtidos para o teor de ligante de projeto estão na tabela 3, assim como os valores calculados de teor de ligante absorvido e efetivo, VAM (Vazios do agregado mineral), RBV (Relação betume-vazios), MEA (Massa Específica Aparente) e FAD (Faixa de Agregados Dominantes) para estes teores. Vale ressaltar que a única variação controlada entre as misturas é o tipo de CAP e seu teor.

Tabela 3: Resultado do teor de ligante de projeto, VAM, RBV, MEA e FAD

Mistura	Teor de ligante de projeto (%)	Teor de ligante absorvido (%)	Teor de ligante efetivo (%)	VAM (%)	RBV (%)	MEA (g/cm ³)	FAD (%)
30/45 REGAP	5,47	0,41	5,45	17,63	77,24	2,27	36,2
50/70 REGAP	5,55	0,41	5,53	17,62	77,32	2,27	36,2

3.2 Módulo de resiliência

Os resultados de MR médio das misturas estudadas foram de 11241 MPa para o CAP 30/45 e 8382 MPa para o CAP 50/70. Bernucci et al. (2010) mostram que valores típicos de MR a 25°C para misturas asfálticas estão entre 2000MPa e 8000MPa. Com os resultados do ensaio, observa-se que o MR da mistura 30/45 excede esse intervalo e é visivelmente maior que o da mistura com CAP 50/70. Esse fato ocorre, pois, o CAP da mistura 30/45 é mais rígido (menor resultado no ensaio de penetração).

Pode-se utilizar os resultados deste ensaio como parâmetro de comparação com outras misturas, pois é o ensaio preconizado no novo método de dimensionamento brasileiro, em que a mistura é entendida como elástica, o que é uma simplificação da realidade. Como melhor comportamento resiliente não é sinônimo de melhor comportamento ao dano, foram analisados resultados de ensaios de *Flow Number* para melhores conclusões.

3.3 Módulo complexo

O protocolo de Di Benedetto & Corté (2005) foi seguido para a apresentação e análise dos resultados do ensaio de Módulo Complexo. As médias dos dados experimentais obtidos foram submetidas ao modelo reológico 2S2P1D para a construção do espaço Cole Cole, Diagrama de Black e das curvas mestras de Módulo Dinâmico e Ângulo de Fase das misturas. Os sete parâmetros do modelo e as constantes C1 e C2, de WLF (William, Landel e Ferry), para as duas misturas pesquisadas, constam na Tabela 4.

O espaço Cole Cole apresenta no eixo das abscissas a parte real (E1) e no eixo das ordenadas a parte imaginária (E2) com forma semelhante a um arco de círculo. Com E1 é possível avaliar a parte recuperável da energia armazenada, e com E2 o comportamento viscoso

irreversível do material em decorrência da dissipação de energia. Com o Diagrama de Black é possível analisar a relação entre o módulo dinâmico e o ângulo de fase em diferentes temperaturas. É válido salientar que a modelagem 2S2P1D de cada mistura foi realizada diante da análise da média dos dados obtidos pelo ensaio de cada CP e os parâmetros da tabela 4 foram ajustados para cada mistura afim de obter a curva da modelagem.

Tabela 4: Parâmetros 2S2P1D, C1 e C2 obtidos com a modelagem matemática

Mistura	E*						WLF		
	E ₀₀ (MPa)	E ₀ (MPa)	k	h	δ	t _E (s)	β	C1	C2 (°C)
CAP 30/45 REGAP	4,50E+01	2,71E+04	0,185	0,560	1,80	0,228	2000	30,495	203,598
CAP 50/70 REGAP	4,00E+01	2,61E+04	0,195	0,550	1,70	0,066	2000	30,855	203,526

O diagrama Cole-cole da Figura 4 mostra os resultados da modelagem 2S2P1D das duas misturas. O gráfico inicia com os resultados obtidos com os ensaios em altas temperaturas e é moldado de acordo com o decréscimo das temperaturas ensaiadas. Com isso é possível inferir que quanto menor a temperatura, maior é o comportamento elástico da mistura com CAP 30/45 em relação à com CAP 50/70. Além disso é notório que na temperatura intermediária, de 21°C, a mistura com CAP 50/70 possui comportamento mais viscoso que a com CAP 30/45, o que não acontece nas outras faixas de temperatura ensaiadas.

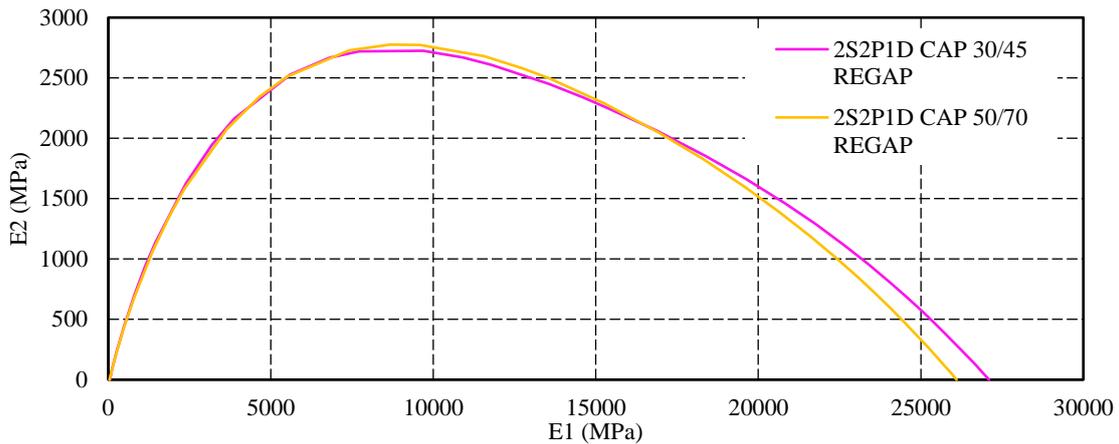


Figura 4: Diagrama Cole-cole obtido pelo 2S2P1D das misturas estudadas

Na análise do diagrama de Black da Figura 5, verifica-se que a mistura com CAP 50/70 possui valor de ângulo de fase ligeiramente menor que a mistura com CAP 30/45. Isto representa que a mistura com CAP 50/70 possui maior comportamento elástico enquanto a com CAP 30/45 possui o maior valor de ângulo de fase, ou seja, apresenta uma parcela viscosa mais significativa quando comparada a parcela elástica. Assim, na mistura com CAP 30/45 há uma maior dissipação de energia ou maior perda por atrito interno.

Diante dos resultados de módulo dinâmico e ângulo de fase, considerando o comportamento termoreológico das misturas, foram construídas curvas mestras, através do princípio da superposição tempo-temperatura. Nas Figuras 6 e 7 encontram-se as curvas mestras, que foram ajustadas pelo modelo reológico 2S2P1D. Na Figura 6 há um destaque para visualizar o $|E^*|$ nas baixas frequências, correspondentes à baixas velocidades de carregamento que estão

associadas à formação de trilhos de rodas. A temperatura de referência das curvas mestras é 20°C.

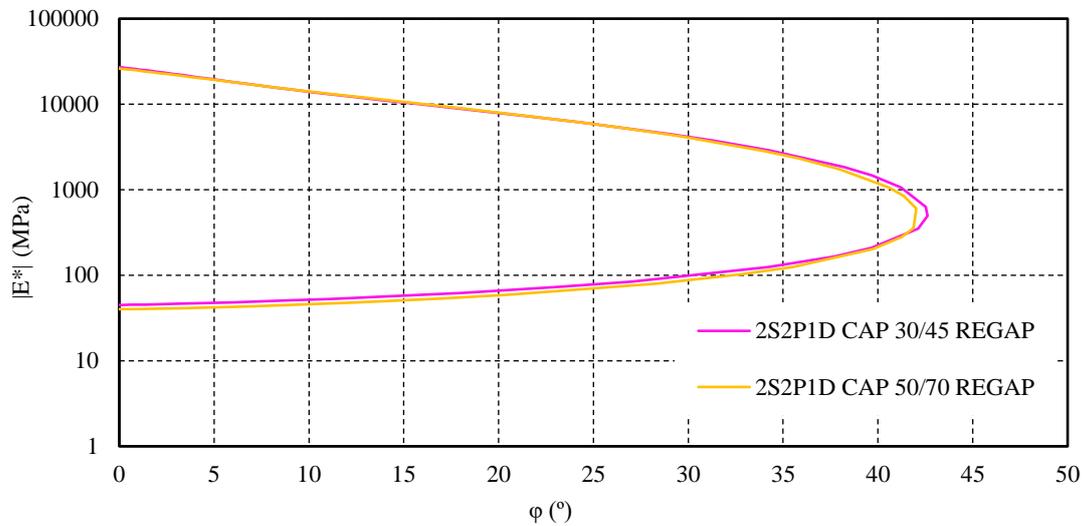


Figura 5: Diagrama de Black para todas as misturas obtido pelo 2S2P1D

Nas duas misturas asfálticas estudadas percebe-se que o módulo dinâmico cresce com o aumento da frequência devido a menor exposição à carga quando aumentada a frequência, ou seja, não há tempo para ocorrerem as deformações viscoelásticas das misturas asfálticas. Os módulos atingem os maiores valores nas altas frequências, pois praticamente só ocorrem deformações elásticas no material. Já os menores valores de módulo dinâmico ocorrem nas baixas frequências, pois o tempo de carregamento é maior, o que possibilita medir as deformações viscoelásticas do material, que costumam se manifestar em sua totalidade. Com a modelagem 2S2P1D, a avaliação do comportamento viscoelástico das misturas é válida apenas para a faixa de temperaturas de realização do ensaio (-10°C a 54°C). As altas frequências estão associadas ao dano por trincamento térmico no revestimento asfáltico e as baixas frequências podem ser relacionadas à ocorrência de deformação permanente na mistura asfáltica.

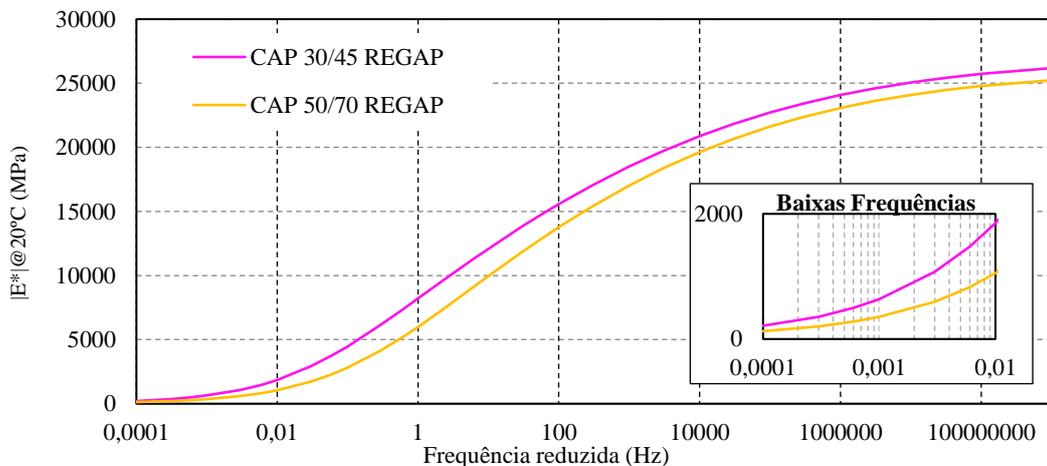


Figura 6: Curvas mestras de Módulo dinâmico para as misturas

A mistura de CAP 30/45 apresentou maior valor de módulo, ou seja, uma maior rigidez da mistura. Tal resultado já era esperado, tendo em vista que este CAP é considerado mais consistente.

O ângulo de fase é um parâmetro usado para avaliar o efeito dos ligantes nas misturas e está relacionado às propriedades elásticas e viscosas dos materiais asfálticos. Ao analisar as curvas mestras de ângulo de fase da Figura 7, nota-se que as misturas se desordenam conforme a frequência muda. Para as baixas frequências, a mistura com CAP 30/45 apresenta maior ângulo de fase, o que indica que esta teve uma maior defasagem entre o carregamento e a deformação, exibindo que tem comportamento mais viscoso quando comparada à outra mistura. Para as altas frequências a mistura com CAP 30/45 apresenta um valor baixo de ângulo de fase, representando uma maior fase elástica nesse período.

A mistura com CAP 50/70 tem o pico de ângulo de fase em uma frequência maior do que o pico da mistura de CAP 30/45, indicando (pelo princípio da superposição de tempo e temperatura) que a mistura de CAP 30/45 é mais elástica em temperaturas menores, a rigidez tende a aumentar com a redução da parcela viscosa e com a diminuição do ângulo de fase. Já com o aumento da temperatura, a rigidez cai.

A construção de curvas mestras apresenta vantagem, pois estas possibilitam a previsão de valores de uma determinada propriedade reológica ao longo de uma gama de frequências e temperaturas mais ampla do que a utilizada experimentalmente.

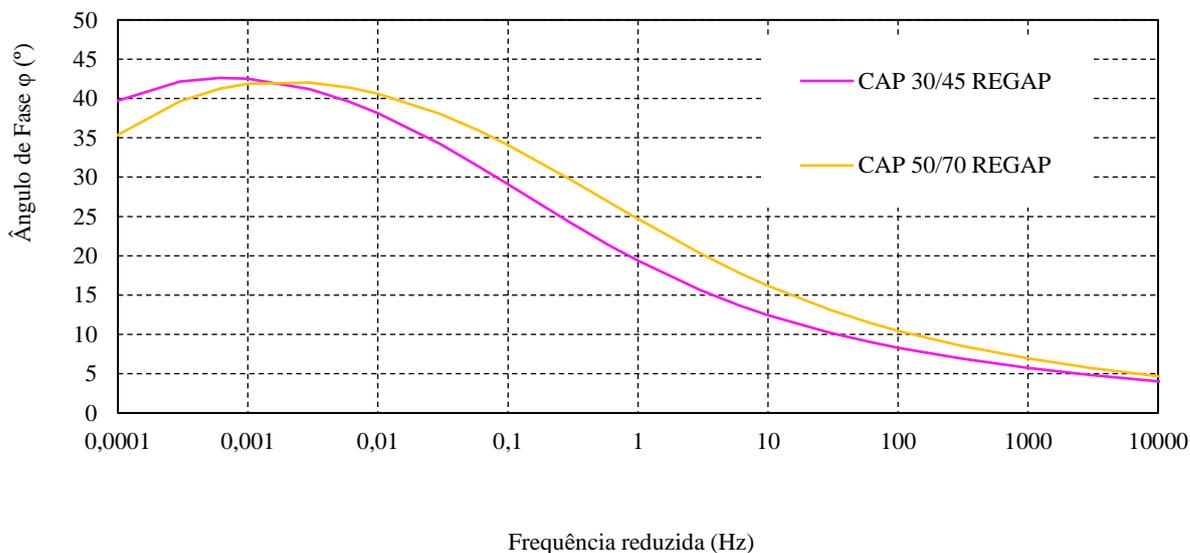


Figura 7: Curvas mestras de Ângulo de fase para as misturas

3.4 Resistência a tração por compressão diametral

A Tabela 5 apresenta os resultados deste ensaio para três CPs avaliados por mistura, apresentados em forma da média entre os resultados dessas amostras, bem como o desvio padrão e o coeficiente de variação. Observa-se que os resultados de RT das duas misturas apresentam CV baixos.

O valor mínimo de RT segundo a norma DNIT - ES 031/2006 deve ser 0,65MPa. Bernucci et al. (2010) afirmam que para misturas asfálticas a quente, os valores típicos situam-se entre 0,5 e 2 MPa sendo que este valor pode ser aumentado dada a consistência mais dura de algum ligante asfáltico, por exemplo em misturas de módulo elevado. De acordo com os resultados de RT apresentados na Tabela 5, nota-se que a mistura com CAP 30/45 apresenta maior resistência a tração do que a com CAP 50/70.

Tabela 5: Resultados do ensaio de RT de cada amostra, suas médias, DP e CV.

MISTURA	CAP 30/45			CAP 50/70			
	CP	13	14	15	1	2	3
RT		2,38	2,39	2,36	1,27	1,27	1,27
MÉDIA			2,37			1,30	
DP			0,01			0,05	
CV			0,6%			4,1%	

3.5 Flow Number

Através do Modelo de Francken foram obtidos os resultados de Flow Number (FN) encontrados para as duas misturas estudadas e estão apresentados na Tabela 6, com seus respectivos desvios-padrões (DP), coeficientes de variação (CV) e parâmetros A, B, C e D do modelo bem como os VV de cada amostra.

Para o ensaio de FN, considerando valor médio de FN encontrado para duas amostras o CV não deve ultrapassar o valor de 14,1% e para três amostras o valor deve ser inferior a 11,5%, segundo a norma AASHTO T79. A norma brasileira não faz referência ao CV das médias de FN entre as amostras, mas ainda assim a maioria das misturas ensaiadas respeitam os CV da norma americana. Nascimento (2008) encontrou CV de 2,5% a 42,9% para suas misturas, Onofre (2012) valores entre 13% e 26%, Almeida Jr. (2016) encontrou CV de até 24% e Bohn (2016) de até 21%. Os ensaios das amostras foram finalizados quando a mistura atingiu 5% da deformação. Nenhuma amostra suportou 7500 ciclos.

Tabela 6: Resultados de FN, DP, CV e coeficientes do modelo de Francken

MISTURA	CP	VV (%)	GC (%)	FN	FN médio	DP	CV (%)	Coeficientes do modelo de Francken			
								A	B	C	D
CAP 30/45 REGAP	2	7,47	97,50	217	214	5,00	2,32	1039,99	0,52	382,87	0,01
	3	7,78	97,30	210				1035,86	0,53	302,09	0,01
	6	6,67	96,80	142	944,92	0,59	135,70	0,01			
CAP 50/70 REGAP	7	6,88	96,80	118	132	12,49	9,46	1062,73	0,58	203,45	0,02
	19	6,89	96,75	136				862,49	0,60	160,75	0,01

De acordo com os ensaios, a mistura que apresentou o maior FN foi a mistura com CAP 30/45, com o valor de 214 kPa, enquanto a mistura com CAP 50/70 apresentou FN de 132 KPa. Com isso, é possível inferir que as duas misturas estão adequadas para os limites de tráfego médio (100kPa) proposto por Bastos (2017) e não atingiram o limite mínimo para tráfego médio (300 KPa) conforme Nascimento (2008). Misturas com qualquer CAP dificilmente estão adequadas para tráfego pesado, tráfego no qual é mais indicado o uso de ligantes modificados.

3.6 Considerações sobre os resultados

Na Figura 8 é apresentado um diagrama com todos os resultados, afim de obter correlações entre eles e ter uma visão global das misturas. As barras coloridas indicam a proporção dos valores entre colunas (ensaios). O $|E^*|$ considerado para esta comparação é à 25°C na frequência de 10 Hz.

MISTURA	TEOR DE LIGANTE (%)	MR (MPa)	RT (MPa)	$ E^* @25^\circ\text{C } 10\text{Hz}$ (MPa)	FN
30/45	5,48	11637	2,3747	9277	214
50/70	5,55	7960	1,303	6914	132

Figura 8: Diagrama comparativo entre os resultados de todos os ensaios

Observa-se que para todos os ensaios os resultados da mistura de CAP 30/45 são os maiores, o que comprova sua supremacia frente à outra mistura. O resultado de RT da mistura com CAP 30/45 é 55% maior que a mistura com CAP 50/70, o que indica que a primeira possui maior resistência a deformações de tração associadas ao dano por fadiga. Vale salientar que o FN da mistura 30/45 foi 61% maior do que o da mistura com CAP 50/70, o que comprova que a com CAP 30/45 é a mistura mais resistente à deformação permanente. Ainda assim, a mistura com CAP 30/45 apenas suporta o tráfego médio proposto por Bastos (2017) e não atinge os limites mínimos de FN para suportar tráfego pesado proposto por este e nem o tráfego médio e pesado de Nascimento (2008).

4. CONCLUSÕES

É recorrente no Brasil o estudo da influência dos ligantes asfálticos. Dessa forma, essa pesquisa poderá cooperar para o avanço do conhecimento das misturas e suas características determinadas pelos CAPs 30/45 e 50/70 produzidos pela refinaria REGAP. Ademais, a pesquisa intenta colaborar com dados e avaliações sob o ponto de vista da rigidez e comportamento das misturas asfálticas frente a deformação permanente.

Salienta-se que a disseminação dos conceitos e resultados de comportamento reológico das misturas brasileiras é favorecida com a determinação da viscoelasticidade das misturas desta pesquisa e com a utilização do modelo 2S2P1D para avaliar os resultados. De acordo com a análise dos resultados de módulo dinâmico observou-se que a mistura com CAP 50/70 possui menor rigidez quando comparada à mistura com CAP 30/45.

Com relação aos resultados de FN, a mistura com CAP 30/45 suportou maior número de ciclos quando comparada à mistura de CAP 50/70, o que comprova que esta é a mistura mais resistente à deformação permanente. Ainda assim, nenhuma das misturas estudadas atinge o critério para suportar tráfego médio proposto por Nascimento (2008).

Agradecimentos

Os autores agradecem as seguintes instituições, que financiaram ou auxiliaram no desenvolvimento desta pesquisa: Petrobras, Laboratório de materiais de construção civil da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), CAPES, CNPq e Programa de pós-graduação em Engenharia Civil da UFSM.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2016) ABNT NBR 16505:2016 *Misturas asfálticas - Resistência à deformação permanente utilizando o ensaio uniaxial de carga repetida*. Rio de Janeiro.

- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION. (2011). AASHTO T 342-11. *Standard Method of Test for Determining Dynamic Modulus of Hot-Mix Asphalt Concrete Mixtures*. Washington, D. C.
- ALMEIDA JÚNIOR, P. O. B. (2016) *Comportamento mecânico de concretos asfálticos com diferentes granulometrias, ligantes e métodos de dosagem*. Dissertação de Mestrado. UFSM – Santa Maria. Junho.
- ASPHALT INSTITUTE. (2011) *The Bailey Method Achieving Volumetrics and HMA Compactibility*. Asphalt Institute, Lexington KY USA.
- BASTOS, J. B. S.; SOARES, J. B. e NASCIMENTO, L. A. H. (2017) *Critérios para os resultados do ensaio uniaxial de carga repetida de misturas asfálticas em laboratório a partir do desempenho em campo*. Revista Transportes, v. 25, n. 2.
- BECKER, M. Y.; MÜLLER, J. A.; RODRIGUEZ, Y. (2003) *Use of rheological compatibility criteria to study SBS modified asphalts*. *Journal of applied polymer science*, New York, v. 90, n. 7, p. 1772-1782.
- BERNUCCI, L.; MOTTA, L. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. (2010) *Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros*. 504 f. 3ª Reimpressão. Rio de Janeiro: Petrobrás: ABEDA.
- BOHN, K. A. (2016) *Utilização de material fresado em misturas asfálticas mornas*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria – RS.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES - DNIT – ME 135/2010. (2010) *Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio*. Rio de Janeiro.
- _____. DNIT 031/2006. (2006) *Pavimentos Flexíveis - Concreto asfáltico*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Especificação de Serviço.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER – ME – 138/1994. *Pavimentos flexíveis - Misturas betuminosas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio*. Rio de Janeiro.
- DI BENEDETTO, H.; CORTÉ, J. F. (2005) *Matériaux routiers*. Tome 2. 283p.
- FERNANDES, M. (2004) *Characterization of styrene-butadiene-styrene copolymer modified bitumens*. In PPS 2004 Americas Regional Meeting, Florianópolis.
- KIM, RICHARD; WEN & Y HAIFANG. (2002). *Fracture Energy from Indirect Tension Testing*. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*. 71. 779-793.
- KING, G.; KING, R. D. H.; PAVLOVICH, A. L. E.; PRITHVI, K. (1999) *Additives in asphalt*. *Asphalt Paving Technology*, Lino Lakes, v. 68A, p. 32-69.
- LEITE, Leni F. M. (1990) *Estudos reológicos de cimentos asfálticos*. Tese de doutorado. Rio de Janeiro, RJ.
- NASCIMENTO, L. A. H. (2008) do. *Nova abordagem da dosagem de misturas asfálticas densas com uso compactador giratório e foco na deformação permanente*. 2008. 204 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- NASCIMENTO, L. A. H. (2015) *Implementation and Validation of the Viscoelastic Continuum Damage Theory for Asphalt Mixture and Pavement Analysis in Brazil*. Dissertation (Doctor of Philosophy). Graduate Faculty of North Carolina State University.
- ONOFRE, F. C. (2012) *Avaliação do comportamento mecânico de misturas asfálticas produzidas com ligantes asfálticos modificados por ácido polifosfórico e aditivos poliméricos, enfatizando a resistência à deformação permanente*. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Fortaleza.
- POSSEBON, P. É. (2018) *Estudo laboratorial das propriedades mecânicas de misturas com diferentes cimentos asfálticos de petróleo produzidos no Brasil*. Dissertação de Mestrado. UFSM – Santa Maria.

Andressa Ambrós de Oliveira (andressa.ambros@hotmail.com)

Ketrily Killys Martins Saraiva (ketrilysaraiva@gmail.com)

Fernando Luiz Zucchi (fernando.zucchi@ufsm.br)

Évelyn Paniz Possebon (evelyn.paniz@gmail.com)

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

Av. Roraima, 1000 - 7 – Camobi - Santa Maria, RS, Brasil