

INFLUÊNCIA DE DIFERENTES GAPS NOS RESULTADOS OBTIDOS EM ENSAIOS DO DYNAMIC SHEAR RHEOMETER COM LIGANTE ASFALTO-BORRACHA

INFLUENCE OF DIFFERENT GAPS ON RESULTS OBTAINED FROM THE DYNAMIC SHEAR RHEOMETER TESTS IN ASPHALT RUBBER BINDERS

INFLUENCIA DE DIFERENTES GAPS EM LOS RESULTADOS OBTENIDOS EM LOS ENSAYOS NO DYNAMIC SHEAR RHEOMETER EM ASFALTO CAUCHO

Jennifer Ilha Vendrusculo¹
Sílvia Lisboa Schuster²
Pedro Orlando Borges de Almeida Júnior³
Luciano Pivoto Specht⁴

58

Resumo: O principal equipamento para caracterização do ligante asfáltico é o Reômetro de Cisalhamento Dinâmico – (DSR). Este equipamento possui dois pratos cuja distância é conhecida como gap. O objetivo desta pesquisa é avaliar o impacto de três diferentes gaps nos parâmetros reológicos (Módulo Dinâmico de Cisalhamento e do Ângulo de Fase) em dois ligantes asfálticos modificados por borracha. As amostras foram ensaiadas em cinco temperaturas e a frequência de 10 rad/s. Portanto, os resultados encontrados não apontaram uma diferença significativa entre os três gaps testados.

Palavras-chave: Asfalto Borracha. Gaps. Parâmetros Reológicos

Abstract: The main equipment for characterizing the asphalt binder is the Dynamic Shear Rheometer - (DSR). This equipment has two plates whose distance is known as the gap. The objective of this research is to evaluate the impact of three different gaps in rheological parameters (Dynamic Shear and Phase Angle Module) test in two rubber-modified asphalt binders. The samples were tested at five temperatures and frequency of 10 rad/s. Therefore, the results found did not indicate a significant difference between the three gaps tested.

Keywords: Rubber Asphalt. Gaps. Rheological Parameters

¹ Graduanda. Universidade Federal de Santa Maria. E-mail: jennifer-ilha@hotmail.com

² Mestre. Universidade Federal de Santa Maria. E-mail: silviolschuster@gmail.com

³ Mestre. Universidade Federal de Santa Maria. E-mail: engcivilpedro@hotmail.com.

⁴ Doutor. Universidade Federal de Santa Maria. E-mail: luspecht@gmail.com

Resumen: El equipo principal para caracterizar el ligante de asfalto es el Reómetro de Cizallamiento Dinámico - (DSR). Este equipo tiene dos placas cuya distancia se conoce como *gap*. El objetivo de esta investigación es evaluar el impacto de tres *gaps* diferentes en parámetros reológicos (Módulo de Cizallamiento Dinámico y ángulo de fase) en dos ligantes asfálticos modificados con caucho. Las muestras se probaron a cinco temperaturas y una frecuencia de 10 rad/s. Por lo tanto, los resultados encontrados no indicaron una diferencia significativa entre los tres *gaps* probados.

Palabras-clave: Asfalto de Caucho. Gaps. Parámetros Reológicos.

Submetido 10/10/2020

Aceito 21/11/2020

Publicado 15/12/2020

Introdução

A relação do impacto das ações humanas no meio ambiente foi assunto em vários debates internacionais, como as conferências realizadas em Estocolmo (1972), Montreal (1987), Rio de Janeiro (1992), Kyoto (1997), Paris (2015). Conforme Manual do Asfalto (1989), a primeira utilização do asfalto na pavimentação ocorreu em Lyon, na França, no ano de 1829. Desde então, estudos e pesquisas sobre como agregar melhorias no material asfáltico vêm galgando importância no contexto ambiental com a modificação por diferentes materiais. O CAUQ é uma das misturas asfálticas mais utilizadas no Brasil e trata-se do produto da combinação de agregados em diversos tamanhos e de cimento asfáltico, ambos aquecidos a temperaturas específicas, de acordo com a característica viscosidade-temperatura do ligante e em proporções convenientemente escolhidas.

Segundo Oda (2000) as primeiras experiências da incorporação da borracha moída às misturas asfálticas foram feitas na década de 1960 no Arizona, Estados Unidos. O responsável por tal feito foi Charles McDonald que pressupôs o efeito dos pneus triturados ao proporcionar maior flexibilidade ao asfalto. Hodiernamente, os estados da Arizona, Califórnia e Flórida possuem um vasto conhecimento a respeito da utilização da borracha moída em pavimentação. Afere-se que somente no estado do Arizona aproximadamente 3.300 km de rodovias foram construídas ou restauradas utilizando ligantes modificados com borracha. No Brasil, de acordo com Faxina (2002), as universidades brasileiras e centros de pesquisas iniciaram seus estudos na década de 1990.

O descarte inadequado de pneus inservíveis ainda é um problema de difícil solução. Segundo dados da SEST SENAT (2017), anualmente são descartadas 450 mil toneladas de pneus. Além de ser um material com elevado período de decomposição, em torno de 600 anos, ainda é uma ameaça à saúde pública, visto que, tendem a servir como criadouro de mosquitos transmissores de doenças. Conforme a Fapesp em 2015 foram vendidos no Brasil 71,9 milhões de pneus e descartados 45,7 milhões. De acordo com Torgal e Jalali (2010) as misturas com concreto betuminoso com borracha permitem em média o reaproveitamento por volta de 4000 pneus por cada quilômetro de estrada com 12m de largura e espessura de 4cm. Além do ponto de vista sustentável, de acordo com Sousa et al (2000) diversos estudos apontam vários

benefícios à mistura como redução do envelhecimento, maior flexibilidade, maior resistência às deformações e trincas, maior resistência às variações de temperatura e redução do ruído.

CURY et al. (2002) e o DNIT (2006) definem como principais vantagens a utilização do asfalto borracha a redução do aparecimento de fissuras no asfalto sobreposto, redução dos custos de manutenção, aumento da vida útil do pavimento, melhoria da resistência à derrapagem, diminuição dos níveis de ruído, redução da espessura da camada asfáltica, diminuição do descarte inadequado incorreto de pneus inservíveis e redução da suscetibilidade térmica. No entanto como desvantagens, CURY et al. (2002) e o DNIT (2006) citam o aumento do custo de fabricação, falta de investimento e produção de ruídos durante a fabricação. A incorporação da borracha moída no CAP (Cimento Asfáltico de Petróleo) é feita de acordo com técnicas diferentes, e dentre esses vários processos, salienta-se o processo seco e úmido.

Para a determinação e caracterização do ligante asfáltico o equipamento mais utilizado é o reômetro de cisalhamento dinâmico – (DSR) que analisa o ligante por meio da rotação entre dois pratos, um superior que provoca o cisalhamento na amostra e outro inferior que é fixo. A distância entre esses dois pratos é chamada de gap e esta é arbitrada de acordo com o tamanho da geometria dos pratos a ser utilizados. No entanto, há certa incerteza ao utilizar altura de gap pré-determinada para ensaios de ligante borracha pois não é sabido o tamanho máximo dos grânulos de borracha incorporados ao ligante. Sendo assim, para determinado ensaio que utilize uma geometria de 25mm de diâmetro a qual o gap convencionalmente é utilizado é 1mm, grãos de borracha com diâmetro superior a este podem levar a dados equivocados, comprometendo as análises do comportamento do material. Desta forma, essa pesquisa tem como objetivo avaliar esse tipo de discrepância nos resultados a partir das diferentes alturas de gap. Foram realizados ensaios de caracterização reológica (Módulo de Cisalhamento Dinâmico e Ângulo de Fase) em três gaps diferentes (1, 2 e 3mm) em amostras de ligante borracha afim de investigar de que maneira as diferentes espessuras podem afetar os resultados encontrados.

Revisão bibliográfica

O asfalto é um material aglutinante castanho escuro ou preto, cujos constituintes principais são hidrocarbonetos de alto peso molecular, que ocorre na natureza ou é obtido por

meio do processamento do petróleo (Read e Whiteoak, 2003; El Beze, 2008). No Brasil, o derivado do petróleo utilizado nas misturas asfálticas é denominado cimento asfáltico de petróleo (CAP).

O comportamento mecânico das misturas asfálticas é de alta complexibilidade e estudá-lo é de suma importância para que a malha rodoviária seja eficiente. Para Renault (1996) a alteração da rigidez das misturas asfálticas provém da suscetibilidade térmica das misturas betuminosas, característica herdada das propriedades do ligante asfáltico. Assim, o ligante asfáltico possui importante relação com o comportamento mecânico do pavimento, de forma que a correta especificação e caracterização assegura melhores condições viárias.

Comportamento viscoelástico dos ligantes asfálticos.

Em materiais com comportamento elástico, a relação tensão deformação pode ser descrita usando a lei de Hooke, isto é, tensão e deformação são linearmente proporcionais e o material é afetado apenas pela tensão ou deformação imposta no momento atual. Já para aqueles com comportamento viscoelástico, de maneira simples, podem ser compreendidos como uma combinação do comportamento de materiais elásticos e viscosos.

Segundo Christensen, (1982) o Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) pode apresentar resposta elástica quando submetido a uma solicitação mecânica. Porém, este material também tem componentes viscosas que resultam em uma resposta dependente do tempo e da taxa de aplicação de carga. Benedetto e Corté (2005) definem os materiais viscoelásticos como aqueles que podem armazenar e dissipar energia mecânica em resposta a uma deformação por uma tensão mecânica. A capacidade de armazenar está ligada ao comportamento elástico, e as perdas dissipativas aos efeitos viscosos.

Assim sendo, os materiais viscoelásticos nem armazenam nem dissipam toda a energia que lhes é aplicada. Além disso, de acordo com Babadopulos (2014) quando submetidos a altas frequências, estes se comportam de forma similar a um sólido elástico, armazenando totalmente a energia mecânica. De forma análoga, quando submetidos a baixos carregamentos, baixas frequências, o comportamento se assemelha a um líquido viscoso, dissipando totalmente a energia mecânica. Essa premissa também se relaciona com a temperatura. Baixas temperaturas levam a uma maior rigidez e a um comportamento similar ao do elástico, com menor defasagem

entre a aplicação da tensão e a resposta de deformação. Já em altas temperaturas, o ligante asfáltico tende a se aproximar de um comportamento puramente viscoso com diminuição da rigidez. De acordo com Huang (2004) e Specht et al. (2017) é de comum acordo na literatura que, para pequenas deformações, os ligantes e misturas asfálticas apresentam comportamento viscoelástico linear (LVE), e que o uso da teoria viscoelástica é um melhor artifício em frente a teoria da elasticidade para nos aproximar do real comportamento do material.

Influência da modificação por inserção de borracha no comportamento linear viscoelástico.

Diversos estudos apresentados na literatura voltaram a atenção para a caracterização do comportamento linear viscoelástico de ligantes asfálticos modificados por borracha (Bahia e Davies, 1991; Bennert, 2001; Navarro et al., 2002) e notou-se um acréscimo dos valores de módulo dinâmico com a adição de borracha, além de que o tamanho das partículas, o teor de borracha e o asfalto base utilizado podem afetar as propriedades final do ligante asfáltico. Rochani et al. (2020) aponta conclusões próximas, entretanto verifica que os valores de rigidez também diminuem dependendo das características da borracha utilizada, principalmente vinculadas a tamanhos menores dos grãos. A autora conclui também que ligantes modificados por borracha são mais rígidos principalmente em altas temperaturas quando comparados aos ligantes convencionais, se deformando menos e apresentando recuperação mais rápida após cessado o carregamento.

63

Efeito dos diferentes gaps em estudos com asfalto borracha

Para Teymourpour et al. (2016), os resultados reológicos apontaram um incremento da rigidez e maior variabilidade para o gap de 2 mm em relação ao de 3 e, quanto à presença de partículas, a repetibilidade entre as réplicas foi considerada plausível para o teste conduzido a 3 mm. Entretanto, outros estudos ratificaram resultados com diferenças pouco significativas entre os gaps 1 e 2 mm e ainda dependentes das partículas de borracha (Baumgardner e D'Angelo, 2012; Puga, 2015), além da maior intercorrência referente aos resultados do asfalto borracha. Puga (2015) também conduziu testes para a determinação do PG de diferentes AMB e indicou que, com o distanciamento entre as placas e o aumento da temperatura de ensaio, a

amostra tende a escorrer e perder sua conformidade com a geometria de placas-paralelas, gerando inconsistência nas medições, fato que pode ocorrer principalmente com ligantes asfálticos menos consistentes, o que já havia sido reportado em estudos anteriores (Bennert, 2013).

Caracterização Linear Viscoelástica: módulo de cisalhamento dinâmico

Para a caracterização reológica dos ligantes asfálticos, o ensaio de varredura de frequências e temperaturas tem sido realizado em deformação controlada dentro do domínio linear viscoelástico por meio da obtenção do comportamento viscoso e elástico ao efetuar a medição do módulo de cisalhamento dinâmico (G^*) e ângulo de fase (δ). As condições de teste são temperaturas de ensaio geralmente entre 5 a 35°C com geometria dos pratos de 8mm e gap de 2mm e geometria de 25 mm com gap de 1mm para temperaturas de 35 a 85°C. As frequências empregadas geralmente são configuradas em rampa linear de 0,1 a 30 Hz.

Performance Grade

A Metodologia Superpave (Superior Performance Pavements), respalda-se nas condições climáticas, tráfego e propriedades reológicas para o estudo de ligantes asfálticos baseado no Grau de Desempenho (PG – Performance Grade) em diversas faixas de temperatura e circunstâncias de serviço.

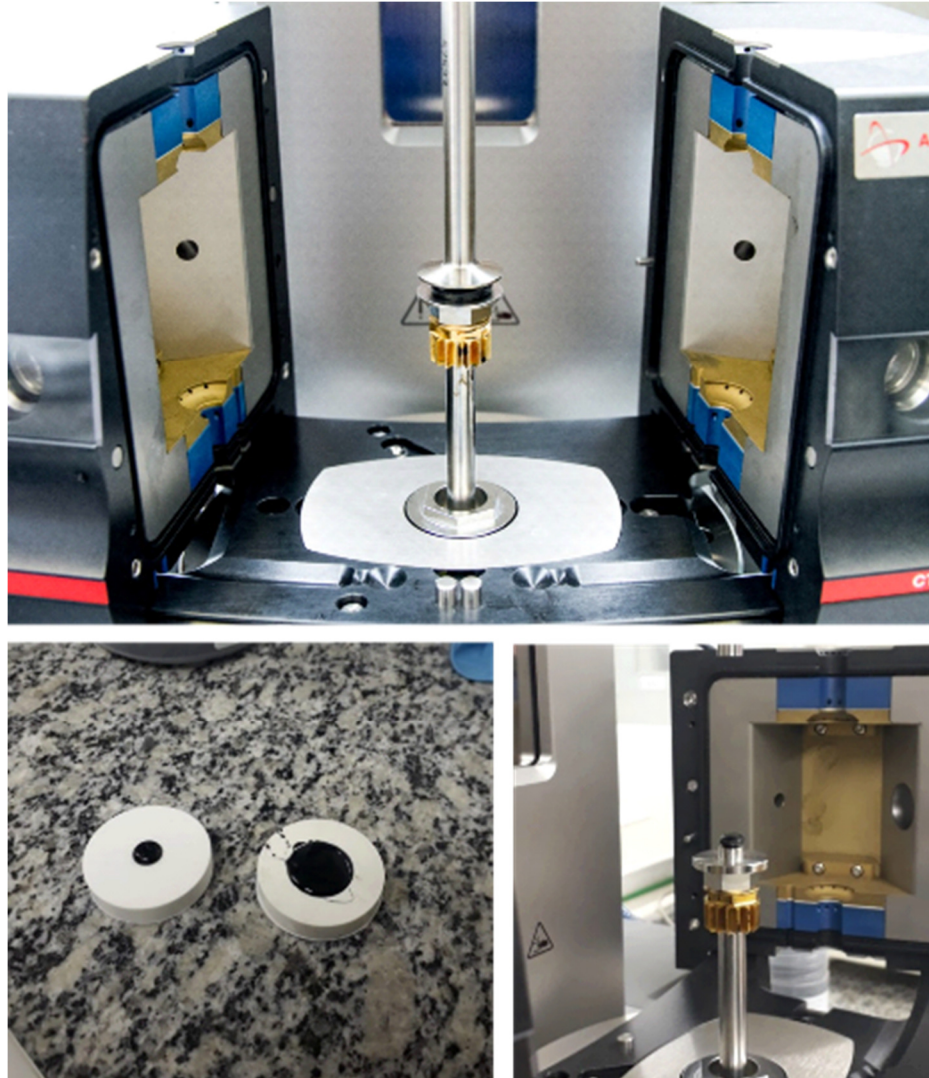
Esta classificação sugere duas temperaturas, uma positiva e outra negativa as quais estabelecem uma gama de temperaturas de desempenho adequado do ligante em relação à deformação permanente e ao trincamento térmico. A máxima temperatura que o ligante não é susceptível à deformação permanente é denominada High Performance Grade (PGH) e está relacionada ao parâmetro $|G^*| \sin \delta$, ou seja, este defeito é atribuído à insuficiência de rigidez em altas temperaturas de atuação. O PGH é obtido com a determinação do módulo complexo (G^*) e ângulo de fase (δ) no Dynamic Shear Rheometer em amostras com 25 mm de diâmetro e 1 mm de gap nas temperaturas de 52, 58, 64, 70, 76 e 82 °C. Já a temperatura mínima que o ligante não é susceptível ao trincamento térmico é chamada é Low Performance Grade (PGL) e é obtida por meio do Bending Beam Rheometer (BBR) o qual é utilizado para a determinação das amostras a temperaturas inferiores a 0°C, entretanto não foi investigada neste trabalho.

Metodologia

Para o desenvolvimento da pesquisa, foram testados quatro ligantes borracha de duas diferentes fontes, nomeados aqui como Fonte 1A, Fonte 1B, Fonte 2A e Fonte 2B. Antes da testagem, o ligante foi aquecido a 165°C por 15 ou 20 minutos. Para homogeneização das partículas de borracha, o mesmo foi agitado após aquecimento. Para cada ligante, foram moldadas 3 amostras nos moldes de silicone de 25 mm de diâmetro. Além disso, após a moldagem as 3 amostras foram testadas em um período máximo de 4 horas. Para a colocação da amostra na placa inferior do reômetro, as placas deste foram pré-aquecidas a 52°C e em sequência feito o ajuste do zero gap. O modo de carregamento foi o quociente entre tensão controlada e o nível de carregamento, 0,120 kpa, como recomendado pela ASTM D 7175-15. Cada amostra foi ensaiada nas temperaturas de 58, 64, 70, 76 e 82°C e a uma frequência de 10rad/s. O tempo de equilíbrio de temperatura foi de 10 minutos, sendo realizado 10 ciclos para cada uma delas e um ponto coletado por temperatura.

Esse procedimento foi adotado como padrão e a única variável foi o tamanho de gap empregado, sendo 1 mm, 2 mm e 3 mm. O procedimento totalizou 36 amostras e foi realizado sempre pelo mesmo operador. Depois disso, foi testado o grau de desempenho (PG) de cada amostra em espessuras diferentes de gap para 4 ligantes borracha. O Reômetro Anton Paar MCR 502 (Figura 1) foi utilizado para as mensurações dos parâmetros reológicos.

Figura 1 - Reômetro de Cisalhamento Dinâmico (DSR): Amostras utilizadas para ensaio.



66

Análise dos Resultados

Na Tabela 1 e Tabela 2 são apresentados os resultados obtidos a partir do DSR para os quatro ligantes modificados por inserção de borracha, sendo cada tabela referente a uma fonte diferente. Apresenta-se para cada temperatura, os valores de módulo dinâmico (IG^*) e ângulo de fase (ϕ) na condição de frequência de 10rad/s . A média dos valores é então obtida por meio de três amostras, sendo exibido o desvio padrão e o coeficiente de variação entre as medições.

Tabela 1 - Resultados de módulo dinâmico e ângulo de fase para os ligantes Fonte 1A e Fonte 1B para os diferentes GAPs

RESULTADOS – F1A - GAP 1 mm												
Temp.	Amostra 1		Amostra 2		Amostra 3		Médias		Desvio Padrão		Coef. De Variação (%)	
(°C)	G* (Pa)	φ (°)	G* (Pa)	φ (°)	G* (Pa)	φ (°)	G* (Pa)	φ (°)	G* (Pa)	φ (°)	G* (Pa)	φ (°)
58	9187	65,2	8944	66,2	8407	66,6	8846	66,0	399	0,7	4,51	1,1
64	5027	68,0	4793	69,2	4540	69,7	4787	69,0	244	0,9	5,09	1,3
70	2746	71,7	2596	72,8	2443	73,5	2595	72,7	151	0,9	5,84	1,2
76	1485	76,3	1400	77,3	1305	78,1	1396	77,2	90	0,9	6,46	1,1
82	787	81,0	752	81,6	691	82,2	743	81,6	48	0,6	6,50	0,7
RESULTADOS – F2B - GAP 1 mm												
Temp.	Amostra 1		Amostra 2		Amostra 3		Médias		Desvio Padrão		Coef. De Variação (%)	
(°C)	G* (Pa)	φ (°)	G* (Pa)	φ (°)	G* (Pa)	φ (°)	G* (Pa)	φ (°)	G* (Pa)	φ (°)	G* (Pa)	φ (°)
58	9246	65,9	9332	65,3	9056	65,9	9212	65,7	141	0,4	1,53	0,6
64	4922	69,1	5013	68,4	4837	69,2	4924	68,9	88	0,4	1,78	0,6
70	2656	72,8	2731	72,0	2615	72,8	2667	72,6	59	0,5	2,21	0,6
76	1429	77,4	1477	76,6	1405	77,1	1437	77,0	37	0,4	2,58	0,5
82	759	81,6	793	81,1	754	81,2	769	81,3	21	0,3	2,75	0,3
RESULTADOS – F1A - GAP 2 mm												
Temp.	Amostra 1		Amostra 2		Amostra 3		Médias		Desvio Padrão		Coef. De Variação (%)	
(°C)	G* (Pa)	φ (°)	G* (Pa)	φ (°)	G* (Pa)	φ (°)	G* (Pa)	φ (°)	G* (Pa)	φ (°)	G* (Pa)	φ (°)
58	8489	67,1	8741	67,0	8673	66,7	8634	66,9	130	0,2	1,51	0,4
64	4555	70,6	4674	70,7	4662	70,3	4630	70,5	66	0,2	1,42	0,3
70	2450	74,8	2507	74,9	2506	74,6	2488	74,8	33	0,1	1,33	0,2
76	1305	79,2	1338	79,2	1340	79,1	1328	79,2	20	0,1	1,48	0,1
82	698	82,7	720	82,7	722	82,7	713	82,7	14	0,0	1,90	0,1
RESULTADOS – F1B - GAP 2 mm												
Temp.	Amostra 1		Amostra 2		Amostra 3		Médias		Desvio Padrão		Coef. De Variação	
(°C)	G* (Pa)	φ (°)	G* (Pa)	φ (°)	G* (Pa)	φ (°)	G* (Pa)	φ (°)	G* (Pa)	φ (°)	G* (Pa)	φ (°)
58	9098	66,3	8843	66,1	8166	66,3	8703	66,2	482	0,1	5,53	0,2
64	4853	69,8	4763	69,6	4478	70,1	4698	69,8	195	0,2	4,16	0,4
70	2612	73,9	2565	73,7	2428	74,9	2535	74,2	95	0,7	3,77	0,9
76	1400	78,2	1380	78,0	1329	78,9	1370	78,4	36	0,4	2,65	0,6
82	746	82,0	739	81,9	728	82,3	738	82,1	9	0,2	1,22	0,2
RESULTADOS – F1A - GAP 3 mm												
Temp.	Amostra 1		Amostra 2		Amostra 3		Médias		Desvio Padrão		Coef. De Variação (%)	
(°C)	G* (Pa)	φ (°)	G* (Pa)	φ (°)	G* (Pa)	φ (°)	G* (Pa)	φ (°)	G* (Pa)	φ (°)	G* (Pa)	φ (°)
58	8407	67,2	8452	67,2	8327	66,6	8395	67,0	63	0,3	0,75	0,5
64	4498	70,9	4505	71,0	4554	70,4	4519	70,8	30	0,3	0,67	0,4
70	2412	75,0	2416	75,3	2485	74,7	2437	75,0	41	0,3	1,69	0,4
76	1287	79,2	1287	79,6	1326	79,1	1300	79,3	22	0,3	1,72	0,3
82	697	82,5	694	83,0	713	82,7	701	82,7	10	0,2	1,48	0,3
RESULTADOS – F1B - GAP 3 mm												
Temp.	Amostra 1		Amostra 2		Amostra 3		Médias		Desvio Padrão		Coef. De Variação (%)	
(°C)	G* (Pa)	φ (°)	G* (Pa)	φ (°)	G* (Pa)	φ (°)	G* (Pa)	φ (°)	G* (Pa)	φ (°)	G* (Pa)	φ (°)
58	8487	66,3	9215	65,8	8759	66,0	8821	66,0	368	0,2	4,17	0,4
64	4586	69,9	4970	69,5	4701	69,7	4753	69,7	197	0,2	4,14	0,3
70	2479	74,1	2683	73,7	2536	74,0	2566	73,9	105	0,2	4,10	0,3
76	1331	78,5	1437	78,2	1356	78,4	1375	78,4	55	0,2	4,02	0,2
82	717	82,1	773	81,9	730	82,1	740	82,0	29	0,1	3,97	0,1

Tabela 2 - Resultados de módulo dinâmico e ângulo de fase para os ligantes Fonte 2A e Fonte 2B para os diferentes GAPs

RESULTADOS – F2A - GAP 1 mm													
Temp. (°C)	Amostra 1		Amostra 2		Amostra 3		Médias		Desvio Padrão		Coef. De Variação (%)		
	G* (Pa)	φ (°)	G* (Pa)	φ (°)	G* (Pa)	φ (°)	G* (Pa)	φ (°)	G* (Pa)	φ (°)	G* (Pa)	φ (°)	
58	8535	68,7	8259	68,5	8227	68,0	8340	68,4	169	0,4	2,03	0,6	
64	4487	71,5	4335	71,2	4351	70,6	4391	71,1	84	0,5	1,91	0,7	
70	2403	74,6	2324	74,4	2354	73,6	2360	74,2	40	0,5	1,68	0,7	
76	1295	78,2	1251	78,0	1279	77,2	1275	77,8	22	0,5	1,73	0,6	
82	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
RESULTADOS – F2B - GAP 1 mm													
Temp. (°C)	Amostra 1		Amostra 2		Amostra 3		Médias		Desvio Padrão		Coef. De Variação (%)		
	G* (Pa)	φ (°)	G* (Pa)	φ (°)	G* (Pa)	φ (°)	G* (Pa)	φ (°)	G* (Pa)	φ (°)	G* (Pa)	φ (°)	
58	8758	67,9	8889	68,0	8947	67,2	8865	67,7	97	0,4	1,09	0,6	
64	4605	70,5	4673	70,8	4803	69,8	4694	70,4	101	0,5	2,14	0,7	
70	2473	73,6	2509	73,9	2608	72,9	2530	73,5	70	0,5	2,76	0,7	
76	1338	77,2	1359	77,4	1418	76,6	1372	77,1	42	0,4	3,04	0,6	
82	735	80,6	751	80,7	-	-	742	80,7	10	0,07	1,44	0,4	
RESULTADOS – F2A - GAP 2 mm													
Temp. (°C)	Amostra 1		Amostra 2		Amostra 3		Médias		Desvio Padrão		Coef. De Variação (%)		
	G* (Pa)	φ (°)	G* (Pa)	φ (°)	G* (Pa)	φ (°)	G* (Pa)	φ (°)	G* (Pa)	φ (°)	G* (Pa)	φ (°)	
58	9443	67,6	8411	69,1	8602	68,3	8819	68,3	549	0,8	6,23	1,1	
64	2680	73,8	2352	75,4	2422	74,7	2485	74,6	173	0,8	6,97	1,1	
70	2680	73,8	2352	75,4	2422	74,7	2485	74,6	173	0,8	6,97	1,1	
76	1453	77,3	1258	79,0	1299	78,2	1337	78,2	103	0,8	7,67	1,1	
82	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
RESULTADOS – F2B - GAP 2 mm													
Temp. (°C)	Amostra 1		Amostra 2		Amostra 3		Médias		Desvio Padrão		Coef. De Variação		
	G* (Pa)	φ (°)	G* (Pa)	φ (°)	G* (Pa)	φ (°)	G* (Pa)	φ (°)	G* (Pa)	φ (°)	G* (Pa)	φ (°)	
58	9394	68,4	9160	68,2	8850	68,4	9135	68,3	273	0,1	2,99	0,1	
64	4877	71,4	4775	71,2	4706	71,2	4786	71,2	86	0,1	1,79	0,1	
70	2592	74,7	2548	74,5	2518	74,4	2552	74,6	38	0,2	1,47	0,2	
76	1394	78,2	1372	78,0	1360	77,9	1375	78,0	17	0,1	1,27	0,2	
82	764	81,3	752	81,3	-	-	757	81,2	9	0,1	1,12	0,1	
RESULTADOS – F2A - GAP 3 mm													
Temp. (°C)	Amostra 1		Amostra 2		Amostra 3		Médias		Desvio Padrão		Coef. De Variação (%)		
	G* (Pa)	φ (°)	G* (Pa)	φ (°)	G* (Pa)	φ (°)	G* (Pa)	φ (°)	G* (Pa)	φ (°)	G* (Pa)	φ (°)	
58	8674	68,6	8144	69,1	8146	68,7	8321	68,8	306	0,3	3,67	0,4	
64	4542	71,6	4234	72,1	4247	71,8	4341	71,8	175	0,2	4,02	0,3	
70	2424	74,9	2250	75,3	2260	75,2	2311	75,1	98	0,2	4,23	0,3	
76	1300	78,4	1204	78,7	1207	78,7	1237	78,6	55	0,2	4,41	0,3	
82	713	81,4	661	81,8	-	-	687	81,7	36	0,2	5,33	0,3	
RESULTADOS – F2B - GAP 3 mm													
Temp. (°C)	Amostra 1		Amostra 2		Amostra 3		Médias		Desvio Padrão		Coef. De Variação (%)		
	G* (Pa)	φ (°)	G* (Pa)	φ (°)	G* (Pa)	φ (°)	G* (Pa)	φ (°)	G* (Pa)	φ (°)	G* (Pa)	φ (°)	
58	8603	68,8	8177	69,1	7993	69,1	8258	69,0	313	0,2	3,79	0,2	
64	4486	71,8	4277	72,0	4247	72,0	4336	71,9	130	0,1	3,00	0,2	
70	2389	75,0	2285	75,2	2265	75,2	2313	75,1	67	0,1	2,90	0,2	
76	1283	78,5	1227	78,6	1212	78,7	1240	78,6	37	0,1	3,00	0,1	
82	704	81,7	672	81,8	-	-	688	81,8	23	0,1	3,31	0,1	

Os dados de módulo dinâmico e ângulo de fase para cada temperatura são apresentados discretizados por ligante na Figura 2; Figura 3; Figura 4 e Figura 5. O módulo dinâmico representa a rigidez do ligante dada a condição de carregamento aplicado. O ângulo de fase representa o atraso entre o pico de tensão aplicada e o pico de deformação observada, cujos comportamentos puramente elástico e viscoso são expressos a 0° e 90° respectivamente, enquanto comportamentos viscoelásticos apresentam valores entre 0° e 90° .

Figura 2 – Resultados de módulo dinâmico e ângulo de fase para ligante Fonte 1A

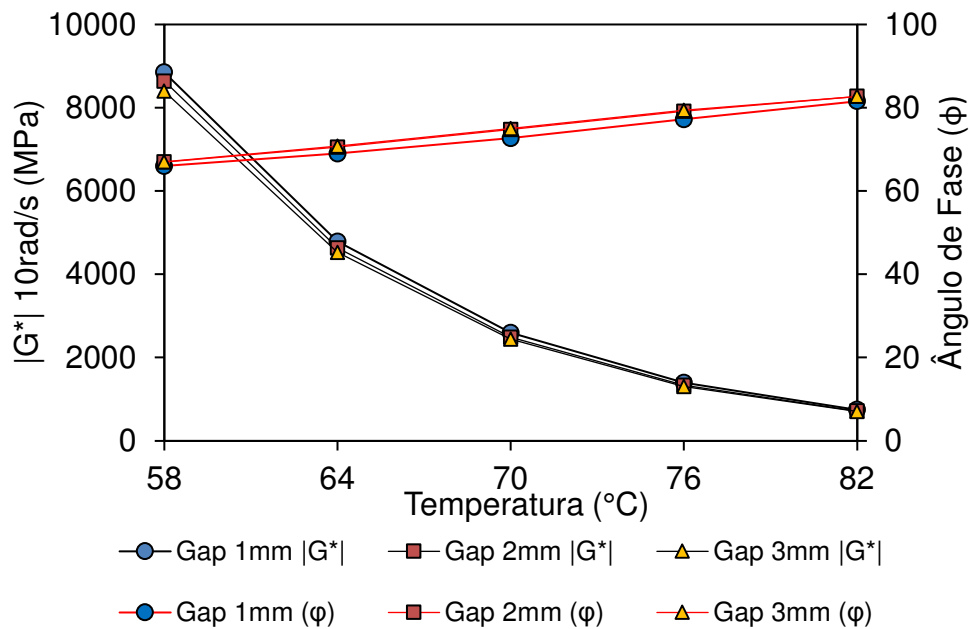


Figura 3 – Resultados de módulo dinâmico e ângulo de fase para ligante Fonte 1B

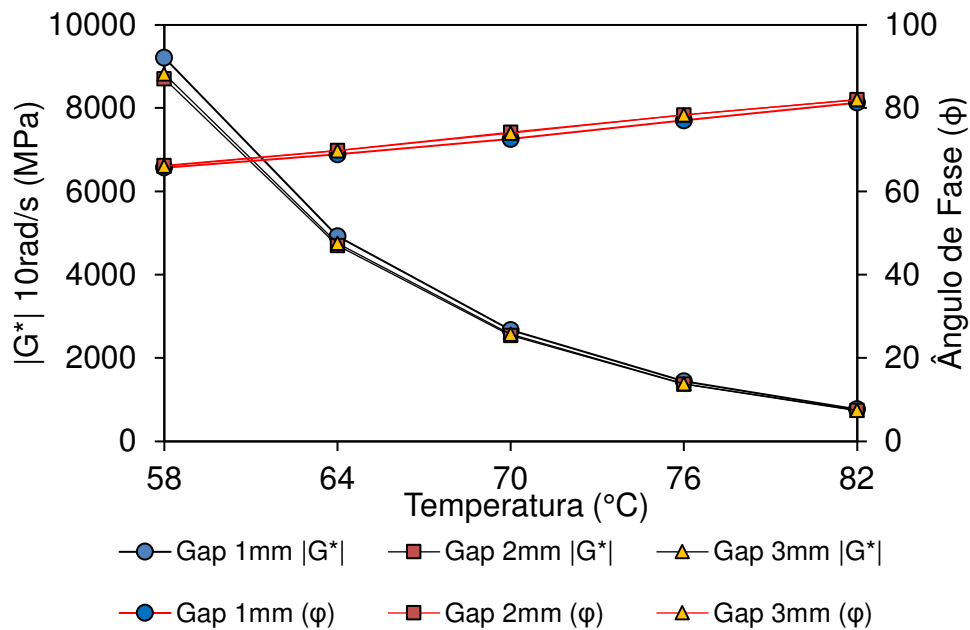


Figura 4 – Resultados de módulo dinâmico e ângulo de fase para ligante Fonte 2A

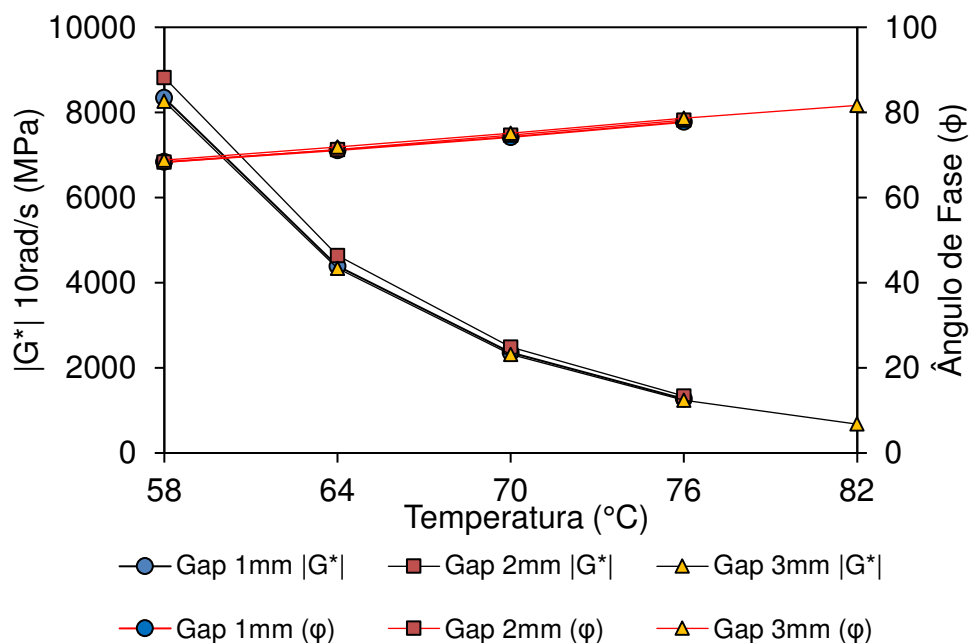
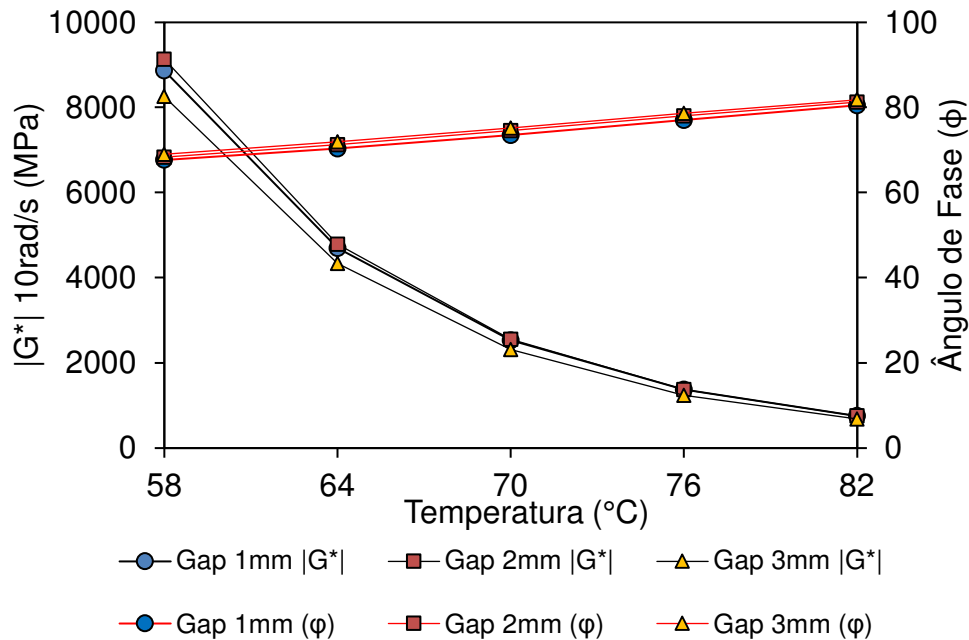


Figura 5 – Resultados de módulo dinâmico e ângulo de fase para ligante Fonte 2B



Ao analisar as figuras de 4 a 7, verifica-se que, para os quatro ligantes não houveram diferenças significativas nos dados obtidos. Visualiza-se que em todos os casos, quando aplicado o Gap de 3mm obteve-se um menor valor de rigidez do material, entretanto as variações encontradas são de pequena magnitude e podem estar provavelmente ligadas a variações usuais entre amostras, sugerindo que para gaps de 1mm, 2mm, e 3mm não são observadas inconsistências nas medidas obtidas pelo reômetro de cisalhamento. De forma a analisar os dados numéricos, a partir dos resultados médios, determinou-se a diferença percentual do módulo dinâmico e ângulo de fase para cada temperatura, analisadas através da Equação 1 e Equação 2 para as respectivas análises de variação entre gaps de 1 a 2 mm e de 1 a 3 mm.

$$\Delta(|G^*|)_{1-2} \% = \left(\frac{(|G^*|)_{1mm}}{(|G^*|)_{2mm}} - 1 \right) \times 100$$

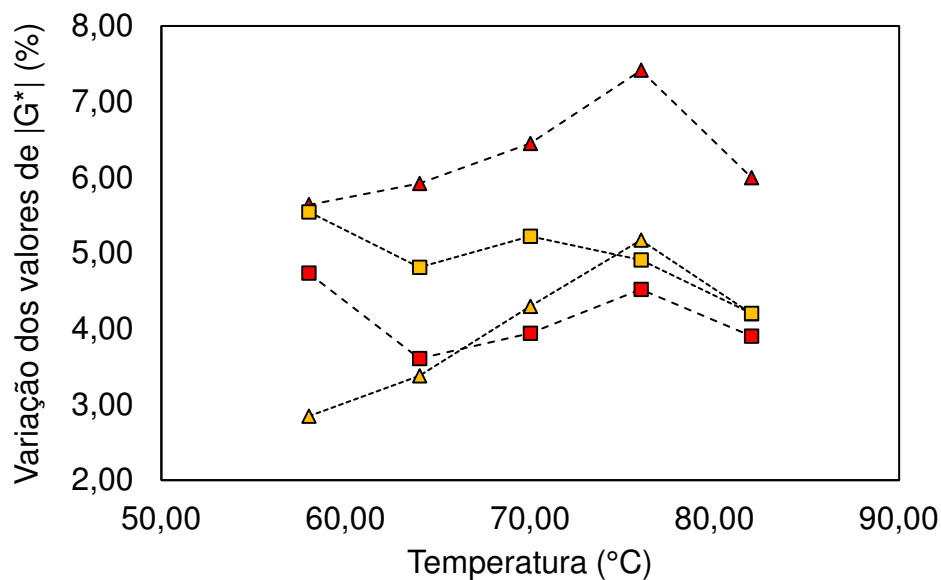
$$\Delta(|G^*|)_{1-3} \% = \left(\frac{(|G^*|)_{1mm}}{(|G^*|)_{3mm}} - 1 \right) \times 100$$

O mesmo procedimento de cálculo serve para avaliar as variações dos valores de ângulo de fase. Nas Figuras 6 e 7 são apresentadas as variações percentuais de $|G^*|$ e ϕ para os ligantes da Fonte 1 e Fonte 2 respectivamente.

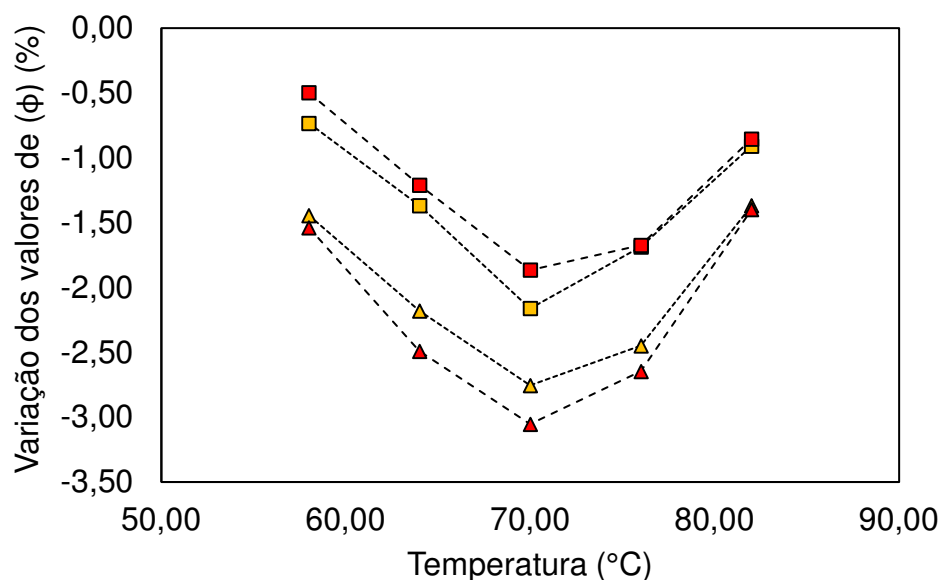
Dada as expressões matemáticas, variações percentuais positivas referem-se a queda de valores, ao passo que variações negativas são interpretadas como valores maiores. Foi possível, assim, verificar para o ligante Fonte 1 A e B (Figura 6) uma queda nos valores de rigidez e um aumento nos valores de ângulo de fase com o aumento do gap de 1mm para 2 mm e 3 mm. Embora o ligante F1A apresentou a maior variação dos resultados quando o gap passou de 1mm para 3 mm, não existe uma tendência clara de influência da altura de gap, visto que o ligante F1B gap 3mm exibiu comportamento semelhante ao resultados de ambos os ligantes para altura de gap de 2mm.

O percentual de variação dos resultados para $|G^*|$ parece não sofrer influência das temperaturas de análise, ao contrário dos resultados de ϕ , que apresentam aumento da variação para a temperatura intermediária de análise (70°C) e então voltam a diminuir.

Figura 6 – Fonte 1 - Variação percentual dos resultados obtidos para cada temperatura: (a) Valores de Módulo Dinâmico. (b) Valores de Ângulo de fase

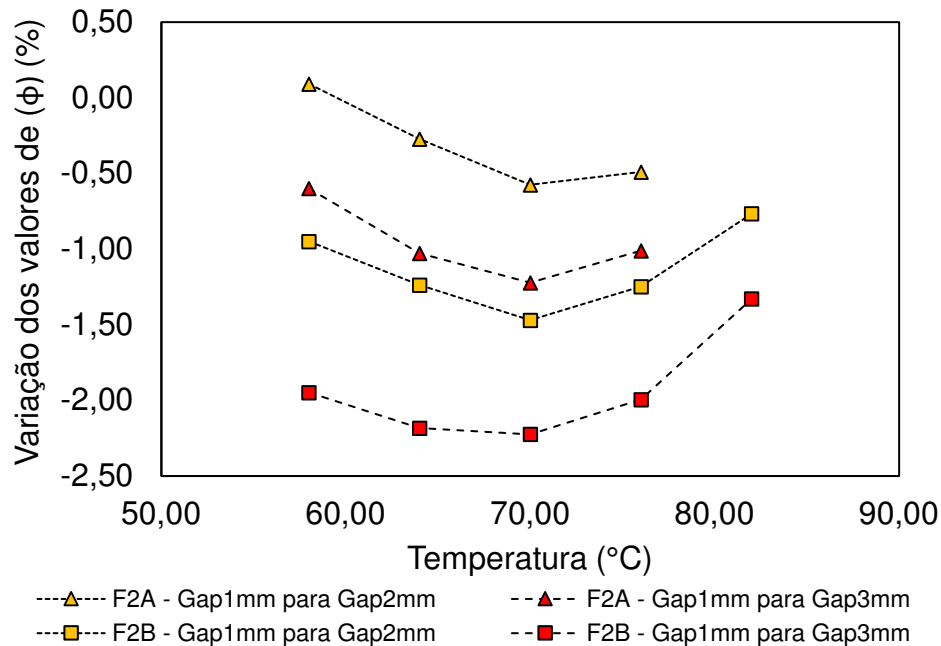
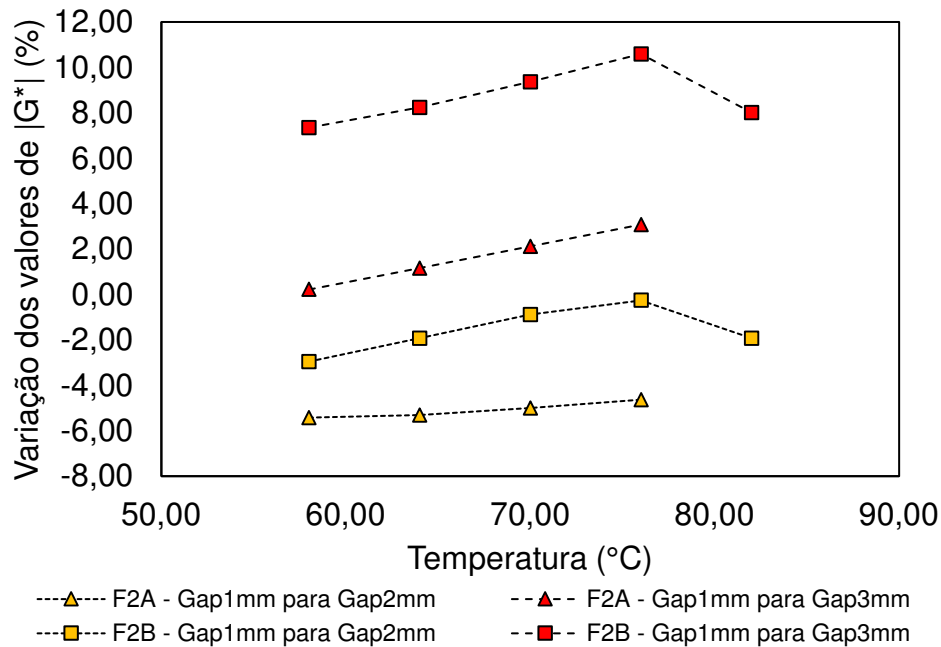


---▲--- F1A - Gap1mm para Gap2mm ---▲--- F1A - Gap1mm para Gap3mm
 ---■--- F1B - Gap1mm para Gap2mm ---■--- F1B - Gap1mm para Gap3mm



---▲--- F1A - Gap1mm para Gap2mm ---▲--- F1A - Gap1mm para Gap3mm
 ---■--- F1B - Gap1mm para Gap2mm ---■--- F1B - Gap1mm para Gap3mm

Figura 7 - Fonte 2 - Variação percentual dos resultados obtidos para cada temperatura: (a) Valores de Módulo Dinâmico. (b) Valores de Ângulo de fase

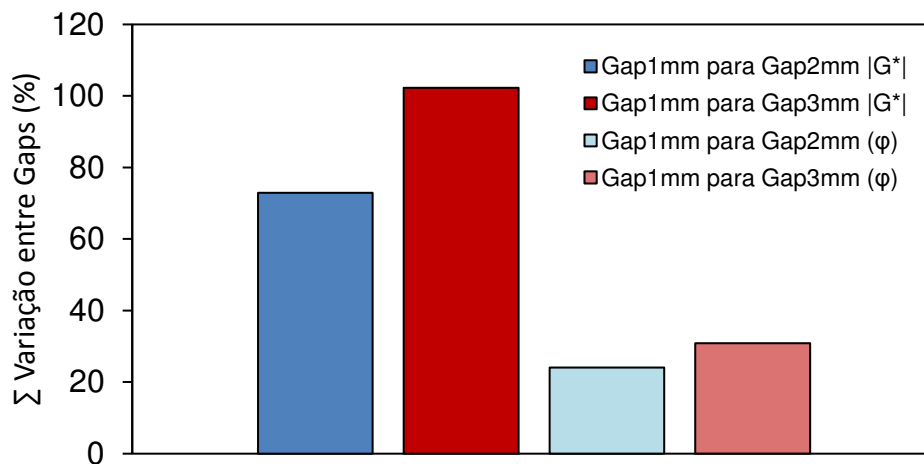


Quando se analisa o comportamento do ligante F2A e F2B (Figura 7), verifica-se que à medida que se aumentou o gap de 1mm para 3mm, aumentou-se a queda de rigidez, entretanto o aumento para 2mm levou a maiores valores de módulo. Os dados de variação do ângulo de

fase apontam assim como para o ligante da Fonte 1, que a maior variação em cada série de medidas foi para a temperatura de 70°C, com queda progressiva da variação tanto para maiores quanto para menores temperaturas. Este fato pode estar ligado ao estado físico do ligante e a interação das particulais de borracha com o ligante base nesta temperatura, fato que merece maiores investigações.

De forma a visualizar o total de variação percentual entre os gaps, apresenta-se na Figura 8 a soma total em módulo da variação percentual de todos os quatro ligantes juntos em cada altura de gap testada para os parâmetros de $|G^*|$ e φ .

Figura 8 - Somatório total da variação percentual entre os gaps testados



Verifica-se assim que as maiores variações de resultados foram encontradas entre as alturas de Gap de 1mm e 3mm para as medidas de rigidez e ângulo de fase. Ao passo que os valores de rigidez sempre caíram quando se aumentou o gap de 1mm para 3mm, as medidas para 2mm de gap apresentaram resultados por vezes maiores e por vezes menores em relação a altura de 1mm, sugerindo que ambas as geometrias de 1mm e 2 mm apresentam resultados semelhantes, afetados apenas pela variabilidade amostra-amostra. Quanto a queda dos valores para gap de 3mm, pode-se verificar que este comportamento não é expressivo embora apresente tendência convergente nas medições de maneira que parece haver o efeito da altura do gap nos resultados, embora com pouca significância, sendo necessária a condução de estudos em um maior número de ligantes modificados por borracha para elucidar a questão com clareza.

Considerações Finais

Ao comparar o efeito da mudança da distância entre as placas notou-se que para os quatro ligantes, não houveram diferenças significativas nos dados obtidos. Além disso, observou-se que, quando aplicado o gap de 3mm obteve-se um menor valor de rigidez do material, entretanto, essa diferença é muito sutil. Quando se aumentou o gap de 1mm para 3 mm os valores de rigidez sempre caíram. Quanto a medida de 2mm, os resultados não apresentaram constância, por vezes a rigidez foi maior e por outras menor.

Já que os valores de rigidez não obtiveram variação considerável com a mudança de gap, para esse parâmetro estudado, presumivelmente, a alteração da espessura de gap não acarretou diferenças significativas. Por conseguinte, a pesquisa segue andamento com ênfase na realização de outros testes analisando a interferência do tamanho dos grãos de borracha em ensaios com alturas de gap pré-determinadas.

Referências

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard specification for asphalt-rubber binder**. D 6114-97. In: ASTM .Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, v 4.03, p.659-661, 1997.
- AASHTO M 332. Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder Using Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, 2019.
- BABADOPULOS, L. F. A. L. **A contribution to couple aging to hot mix asphalt (HMA) mechanical characterization under load-induced damage**. M.Sc. Thesis, Programa de Pós Graduação em Engenharia de Transportes, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brazil, 2014.
- BAHIA, H. U., & Davies, R. **Effect of Crumb Rubber Modifiers (CRM) on Performance-Related Properties of Asphalt Binders**. P. 414-438, 1991.
- BENNERT, T. **Grade Determination of Crumb Rubber-Modified Performance Graded Asphalt Binder**. Center for Advanced Infrastructure and Transportation, 2013.
- CHRISTENSEN, R. M. **Theory of Viscoelasticity**. Dover Publications, Inc, 1nd Ed. New York, USA, 364 pgs, 1982.
- CURY, M. V. Q. et al. **Análise socioeconômica e ambiental para o uso de asfalto emborrachado na construção de rodovias**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE ESTRADAS E A INTERFACE AMBIENTAL. 2002. Foz do Iguaçu. Anais... Foz do Iguaçu: SESINAM. p. 1-12, 2002.
- DI BENEDETTO, H.; CORTÉ, J. F. **Matériaux routiers**. Tome 2. 283p. 2005.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTE - DNIT 031/2006 - ES Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico -Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTE - DNIT – EM 111/2009: **Pavimentação flexível - Cimento asfáltico modificado por borracha de pneus inservíveis pelo processo via úmida, do tipo “Terminal Blending” - Especificação de material**, Rio de Janeiro, 2009.

EL BEZE, L. **Recyclage à chaud des agregats d'enrobes bitumineux: Identification de Traceurs D'Homogénéité du Melangé Entre Bitume Vieilli et Bitume Neuf d'Apport"**. Thèse, 318, 2008.

FAXINA, A. L. **Estudo em laboratório do desempenho de concreto asfáltico usinado a quente empregando ligante do tipo asfalto-borracha**. 2002.338p. Dissertação (Mestrado em Transportes) Escola de Engenharia de São Carlos- EESC. Universidade de São Paulo. São Carlos.

FHWA **Crumb Rubber Modifier – Design Procedures and Construction Practices**. Workshop Notes. U.S. Department of Transportation. Federal Highway Administration. Publication N° FHWA-SA-93-011, 1993.

HUANG, Y.H., **“Pavement Analysis and Design.”** 2nd edition. Prentice-Hall, Englewood Cliffs. 2004.

KANDHAL, P. S. **Moisture susceptibility of HMA mixes: identification of the problem and recommended solution**. NCAT - National Center for Asphalt Technology. Auburn, report n.92-6. 1992.

MAHMOUDI, Y. et al. **Tridimensional linear viscoelastic properties of bituminous mixtures produced with crumb rubber added by dry process**, Road Materials and Pavement Design, 2020.

NAVARRO, F. J et al. **Rheological characteristics of ground tire rubber-modified bitumens**. *Chemical Engineering Journal*, 89(1–3), 53–61, 2002.

ODA, S.; FERNANDES JUNIOR, J. L. **Resultados da avaliação de asfalto-borracha através de ensaios tradicionais e de ensaios da especificação Superpave**. In: XIV CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES. Gramado. *Anais*. p.577-589. 2000.

PINHEIRO, J. H. M. **Incorporação de borracha de pneu em misturas asfálticas de diferentes granulometrias (processo úmido seco)**, Dissertação de Mestrado em Transportes, Universidade Federal do Ceará, CE, Brasil, 2004.

ROCHLANI, M. et al. **Investigating the performance-related properties of crumb rubber modified bitumen using rheology-based tests**, *International Journal of Pavement Engineering*, 2020

SOARES, R. A.; ASSIS, E. M. **O uso da Borracha de Pneus na Pavimentação como uma Alternativa Ecologicamente Viável**. 2008. 15 p. Universidade Católica de Salvador, Salvador, BA, 2008.

SOUSA, J.M.D. et al. **Caracterização laboratorial preliminar de misturas asfálticas modifica com borracha reciclada de pneus e convencional para projetos de recuperação de rodovias do DER/DF.** In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 32. Brasília. 2000. Anais. Brasília, Associação Brasileira de Pavimentação. V1, p. 224-234, 2000.

SPECHT, L. P., et al. **Utilização de Borracha Reciclada como Agregado de Concreto Asfáltico: Avaliação Laboratorial,** XVI Encontro de Asfalto, IBP, Rio de Janeiro, 2002.

SPECHT, L. P.; BABADOPULOS, L. F. A.; BENEDETTO, H.; SAUZEAT, C.; SOARES, J. B. **Application of the theory of viscoelasticity to evaluate the resilient modulus test in asphalt mixes.** CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS, v. 149, p. 648-658, 2017.

READ, J., WHIEOAK, D. **The Shell Bitumen Handbook.** Fifth Edition, 2003.