

Avaliação de misturas asfálticas recicladas mornas com uso de ligantes convencional e modificado por polímero

Kátia Aline Bohn¹, Luciano Pivoto Specht², Chaveli Brondani³, Bethania Machado Correa⁴, Gustavo dos Santos Pinheiro⁵, Karlla Gabriella Eidt⁶, Valdir dos Santos Barboza Junior⁷, Fernando Dekeper Boeira⁸, Deividi da Silva Pereira⁹

¹Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFSM, katia0706bohn@yahoo.com.br

²Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFSM, luspecht@ufsm.br

³Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFSM, chavelib@gmail.com

⁴Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFSM, bethania.machadocorrea@gmail.com

⁵Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFSM, gustavo.snt@hotmail.com

⁶Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFSM, karllagabriella@yahoo.com.br

⁷Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFSM, valdirbarbozajr@gmail.com

⁸Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFSM, fernando.d.boeira@gmail.com

⁹Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFSM, dsp@ufsm.br

Recebido:

18 de junho de 2018

Aceito para publicação:

26 de abril de 2019

Publicado:

30 de abril de 2020

Editor de área:

Francisco Thiago Aragão

Palavras-chaves:

Reciclagem de pavimentos,
Misturas asfálticas recicladas mornas,
Asfaltos modificados por polímeros.

Keywords:

Pavement recycling,
Warm recycled asphalt mixtures,
Polymer modified asphalts.

DOI:10.14295/transportes.v28i1.1740



RESUMO

Com o objetivo de avaliar tecnologias e práticas mais sustentáveis para a área de pavimentação, estudou-se o comportamento de misturas asfálticas recicladas mornas, utilizando ligantes convencional CAP 50/70 e modificado por polímero CAM 60/85-E. Foram ensaiadas quatro misturas asfálticas por ligante: convencional à quente, morna (sem RAP) e morna com 25% e 50% de RAP (em substituição à massa total de agregados virgens). As amostras foram dosadas pela metodologia Superpave e avaliadas quanto às propriedades de resistência, deformabilidade, adesão e coesão. As misturas mornas e convencionais apresentaram comportamento equivalente e o uso de ligante modificado elevou o desempenho das amostras. Houve uma melhora significativa nas propriedades das misturas com o uso de RAP, ressaltando-se o expressivo aumento de Flow Number e os resultados positivos de adesão e coesão, provavelmente, em decorrência do RAP apresentar ligante residual modificado com polímero.

ABSTRACT

In order to evaluate more sustainable technologies and practices for the pavement area, the behavior of warm recycled asphalt mixtures was studied using conventional binders CAP 50/70 and modified by polymer CAM 60/85-E. Four asphalt mixtures were tested by binder: conventional hot mix, warm (no RAP) and warm mixtures with 25% and 50% RAP (replacing the total mass of virgin aggregates). The samples were design by Superpave methodology and evaluated for strength, deformability, adhesion and cohesion. The warm and conventional asphalt mixtures presented equivalent behavior and the use of modified binder increased the performance of the samples. There was a significant improvement in the properties of mixtures with the use of RAP, highlighting the significant increase in Flow Number and the positive results of adhesion and cohesion, probably due to RAP presenting modified residual binder with polymer.

1. INTRODUÇÃO

A preocupação com o meio ambiente cresceu, expressivamente, nas últimas décadas e, assim, o setor rodoviário procura desenvolver novas tecnologias. Ações que visam suprir as necessida-

des atuais dos seres humanos, sem comprometer a capacidade das próximas gerações em atender suas próprias necessidades, são princípios da sustentabilidade, que começam a ser fortemente debatidos. Medidas de maior preservação, com menores emissões de poluentes e minimização das agressões ao meio ambiente, começam a ser adotadas após determinação do Protocolo de Kyoto, em 1997, e do Acordo de Paris, em 2015.

A demanda por rodovias mais duradouras vem sendo pauta de novos estudos, na busca de melhorar a vida útil dos pavimentos diante do aumento do volume de tráfego. Para satisfazer essa solicitação é necessário o uso de melhores materiais, técnicas de projeto aprimoradas e construção eficiente, com controle total da qualidade do pavimento. (KUMAR et al., 2017). Somado-se a isso, a reutilização do material reciclado de pavimento pode ajudar na construção de pavimentos flexíveis, que busquem a economia e a conservação dos recursos naturais. (SINGH; SAWANT, 2016). Nesse sentido, a reciclagem de pavimentos aporta como alternativa a minimizar a quantidade de insumos virgens, necessária em novas misturas asfálticas, dando início aos estudos sobre incorporação desses resíduos em novas camadas de pavimentos. (HUANG et al., 2005; WEST et al., 2009; VALDÉS et al., 2011; ZHAO et al., 2013; MANGIAFICO, 2014; ZAUMANIS et al., 2014; GENNESSEAU, 2015; CENTOFANTE, 2016; BOHN; SPECHT, 2017).

O setor rodoviário busca encontrar métodos para aumentar o teor de Reclaimed Asphalt Pavement - RAP -, conhecido como material reciclado de pavimento, inserido nas misturas asfálticas. (HUANG et al., 2005; PRADYUMA et al., 2013; MANGIAFICO, 2014). Essa demanda é decorrência da triplicação dos custos do ligante asfáltico, ocorrido durante a última década, que se manifesta em um momento de financiamento extremamente difícil para a construção e a manutenção de estradas. Com o método de dosagem Superpave e com o interesse na qualidade dos pavimentos, a quantidade de RAP em misturas recicladas tem sido, em alguns estados americanos, limitada a 20% (DON BROCK; RICHMOND, 2007), a menos que o RAP seja processado. Entretanto o objetivo é incorporar um teor de fresado maior, de pelo menos 25% de RAP, às misturas asfálticas (NCAT, 2015). Embora o uso prático de elevadas quantidades de RAP seja limitado, devido às deficiências em relação ao envelhecimento do ligante do fresado, muitos estudos têm sido realizados por pesquisadores e profissionais, com vistas a procurar maneiras de incorporar a maior quantidade de RAP possível, na busca de melhores benefícios ambientais e econômicos. (WEST et al., 2009; SHIRODKAR et al., 2011; ZHAO et al., 2013; ZAUMANIS et al., 2014).

Para atender às premissas do Protocolo de Kyoto, surge a técnica chamada de Warm Mix Asphalt - WMA - ou mistura asfáltica morna. Essa mistura é produzida a temperaturas intermediárias, que variam de 105°C a 145°C. (D'ANGELO et al., 2008). A redução das temperaturas de usinagem e compactação traz importantes benefícios relacionados ao meio ambiente e à qualidade da pavimentação, pois reduz o consumo energético, emite menos poluentes na atmosfera e reduz a exposição dos trabalhadores aos fumos. Também, diminui o envelhecimento asfáltico, aumenta a possibilidade de se transportar as misturas asfálticas a maiores distâncias entre pista e usina e aplicá-las em locais de clima frio, bem como, conduz a um grandioso benefício, que é a implementação de maiores quantidades de material fresado, devido às menores temperaturas de produção. (PROWELL; HURLEY, 2007; MOTTA, 2011; MEJÍAS SANTIAGO et al., 2012; MOREA et al., 2012).

No intuito de tornar os pavimentos mais sustentáveis, uniu-se a capacidade de inserção de maiores taxas de RAP às tecnologias das misturas mornas, dando origem às misturas asfálticas recicladas mornas, sendo uma das grandes áreas de estudo do ramo rodoviário na atualidade.

Por meio de pesquisas nos países europeus, asiáticos e norte-americanos (HUANG et al., 2005; MOGAWER et al., 2011; SHIRODKAR et al., 2011; GUO et al., 2014; LIZÁRRAGA et al., 2018; SONG et al., 2018), assim como em trabalhos já desenvolvidos na América Latina (VALDES-VIDAL et al., 2018) e, especificamente, no Brasil (OLIVEIRA, 2013; ZUBARAN, 2014; GENNESSEAU, 2015), pode-se perceber que a implementação dessas misturas traz inúmeros ganhos, tanto para o meio ambiente, quanto para empreiteiras e trabalhadores desse setor, mostrando resultados promissores e satisfatórios.

Como aliado ao aumento de desempenho e qualidade das misturas asfálticas também é incentivado o uso de ligantes modificados por polímeros. Esses são de uso recorrente em vias de elevado volume de tráfego, pois melhoram as características reológicas das misturas, principalmente, em temperaturas extremas. (ONOFRE, 2012; HAJJ et al., 2014; ALMEIDA Jr., 2016).

As melhorias dos modificadores de ligante, somadas às características das misturas asfálticas recicladas mornas, podem resultar em amostras com significativos ganhos técnicos de qualidade, em aliança com a maior preservação do meio ambiente. Nesse contexto, o objetivo da presente pesquisa é avaliar o comportamento de misturas asfálticas recicladas mornas utilizando ligante convencional e modificado por polímero, e, a partir de ensaios em laboratório, analisar a influência do teor de fresado nas misturas asfálticas. O ponto-chave é mostrar que misturas asfálticas mornas com alto teor de fresado, acima do usualmente utilizado, podem apresentar comportamento semelhante ou superior aos asfaltos convencionais, largamente utilizados no Brasil.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Oito misturas asfálticas foram alvo de estudo. Utilizaram-se dois ligantes asfálticos virgens: CAP 50/70 e CAM 60/85-E. Para cada ligante asfáltico foram ensaiadas misturas convencionais (misturas de referência a quente), mornas, sem incorporação de fresado, e misturas mornas com taxas de 25% e 50% de RAP.

Os agregados virgens utilizados na pesquisa foram provenientes da Pedreira TRS/Concepa, situada no km 30 da BR-290/RS. Oriundos de origem basáltica, os agregados apresentavam características como: absorção de 1,09% e massa específica aparente de 2,754g/cm³ (DNIT-ME 081/98); perda por abrasão Los Angeles de 9% (DNIT-ME 035/98) e sanidade de 10,36% (DNIT-ME 089/94). O material reciclado apresentava teor de ligante de 5,66% (DNER-ME 053/94, realizado em triplicata) e densidade máxima medida de 2,601g/cm³ (ABNT/NBR 15619/12). Foi utilizado aditivo químico surfactante Evotherm®, acrescido de 0,5% em relação à massa do ligante, para ambos os ligantes estudados. A escolha do teor foi baseada na experiência da fabricante e definida em 0,5%, proporção que atendia às recomendações para ambos os ligantes utilizados na pesquisa.

As temperaturas de trabalho das misturas convencionais foram obtidas com o auxílio do Viscosímetro *Brookfield*. Para o CAP 50/70, foram encontradas temperaturas de 149°C e 137°C, para mistura e compactação, respectivamente. Para o ligante CAM 60/85-E, conforme indicação do fornecedor, foram adotadas as temperaturas de 171°C para mistura e 151°C para compactação. Optou-se por reduzir em 30°C as temperaturas de trabalho das misturas mornas, atendendo às especificações da fabricante do aditivo.

A dosagem seguiu a metodologia Superpave, prescrita pela AASHTO M 323-13, apenas com ressalva quanto à utilização do material fresado, o qual foi inserido como "*black rock*". Nesse

caso, o RAP é considerado um agregado normal dentro da mistura reciclada e não existe nenhum grau de remobilização do ligante envelhecido. Foi estipulado volume de vazios de 4% e fixados 100 giros no compactador giratório (CGS). As curvas granulométricas das misturas foram encaixadas na Faixa C do DNIT-ES 031/06, conforme Figura 1.

Vale frisar que o material fresado foi peneirado na malha #3/8", sendo utilizado apenas o passante nesta peneira. Realizou-se um procedimento padrão de secagem do material, deixando-o por 4 horas na estufa a 60°C. Esse processo foi realizado previamente às moldagens, a fim de eliminar a umidade contida no RAP. Antes das confecções dos corpos de prova dos ensaios, o RAP era aquecido até 110°C, durante 2 a 3 horas, a fim de não ocasionar maior envelhecimento do material.

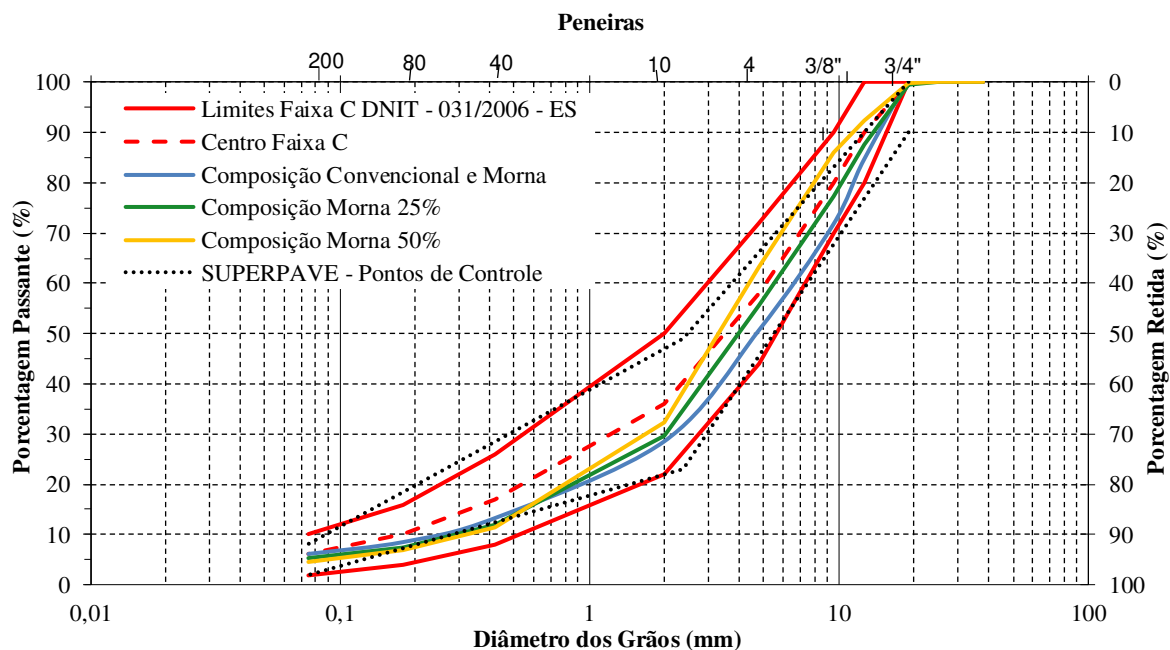


Figura 1. Composições granulométricas das misturas asfálticas em estudo

Foi analisada a propriedade de resistência das misturas por meio dos ensaios de Resistência à Tração por Compressão Diametral (RT), de acordo com a norma DNIT-ME 136/2010, e *Flow Number* (FN), baseado na ABNT/NBR 16505:2016. A deformabilidade foi avaliada com base nos ensaios de Módulo de Resiliência (MR), conforme prescrições das normas DNIT-ME 135/2010, e Módulo Complexo (E^*), executado segundo procedimentos da AASHTO T 342-11. Por fim, para averiguar as propriedades de adesão e coesão foram realizados os ensaios de *Lottman* Modificado ou Dano por Umidade Induzida (DUI), conforme AASHTO T 283-14 e ABNT/NBR 15617:2015, e Resistência ao Desgaste Cântabro, seguindo procedimentos da norma espanhola NLT - 325/86 e das normas brasileiras DNIT-ME 383/99 e DNIT-ES 386/99. Os procedimentos experimentais estão descritos, detalhadamente, em Bohn (2017).

3. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

3.1. Dosagem

Os parâmetros volumétricos e de densificação são apresentados na Tabela 1. Todos os valores são coerentes e válidos de acordo com os limites da metodologia Superpave. Devido à inserção do fresado nas misturas, optou-se por mostrar o teor adicionado (ligante virgem) e o teor total de ligante, soma do teor adicionado com o teor antigo (referente à parcela de ligante existente

no fresado). Dessa forma, mostra-se a perspectiva de fresado como “black rock” e de fresado com mobilização parcial do ligante antigo, respectivamente.

A partir dos dados, é notável perceber que há redução do teor de ligante asfáltico necessário em misturas recicladas, mostrando claramente que o fresado não trabalha como um agregado “black rock”, como adotado na pesquisa. Existe certo grau de reativação do ligante antigo durante o processo de fabricação das amostras, que proporciona grande economia ao processo de produção de misturas asfálticas. A perspectiva de continuidade dos estudos remete à necessidade de caracterização do ligante envelhecido, bem como do grau de reativação de ligante que ocorre nas misturas recicladas.

Tabela 1 – Parâmetros volumétricos e de densificação obtidos com a dosagem Superpave

Mistura	TLA ¹ (%)	TLT ² (%)	VAM (%)	RBV (%)	MEA (g/cm ³)	CDI	TDIm
Mistura Convencional CAP 50/70	5,09	5,09	13,42	70,0	2,450	40	462
Mistura Morna CAP 50/70	4,92	4,92	13,00	69,0	2,455	66	508
Mistura Morna 25% Fresado CAP 50/70	3,63	5,05	15,25	73,5	2,466	60	533
Mistura Morna 50% Fresado CAP 50/70	2,40	5,23	14,75	72,5	2,460	60	560
Mistura Convencional CAM 60/85-E	5,03	5,03	13,48	70,0	2,444	50	510
Mistura Morna CAM 60/85-E	4,82	4,82	12,48	68,5	2,468	55	529
Mistura Morna 25% Fresado CAM 60/85-E	3,22	4,64	13,95	72,5	2,474	54	513
Mistura Morna 50% Fresado CAM 60/85-E	2,37	5,20	14,05	72,0	2,474	53	550

Nota: 1:TLA - Teor de Ligante Adicionado; 2: TLT - Teor de Ligante Total.

3.2. Propriedades de Resistência

3.2.1. Resistência à Tração por Compressão Diametral

Com os resultados de RT, apresentados na Figura 2, é possível afirmar que as misturas mornas não diferem em comportamento das misturas convencionais, provado pela pouca diferença nos valores de resistência. Também, se observa que, à medida que existe um incremento da taxa de RAP, há um aumento da resistência das misturas. Isso já era esperado, visto que existe maior quantidade de ligante antigo, presente nas amostras com maior proporção de fresado, que as torna mais enrijecidas. Em relação aos tipos de ligantes asfálticos, é perceptível a melhora dos resultados quando utilizado CAM 60/85-E. É importante destacar que os corpos de prova utilizados para o ensaio de RT foram, anteriormente, ensaiados para obtenção do seu módulo de resiliência. Dessa forma, mesmo que o ensaio de MR ocorra no regime viscoelástico linear, existe o fenômeno da anelasticidade, que pode ter alterado o resultado da resistência do material, em uma pequena proporção.

As oito misturas avaliadas apresentam valores acima de 0,65 MPa, como estipula a norma DNIT-ES 031/2006, além de todos os resultados serem superiores a 1,2 MPa, apontado pela norma DNIT-ES 385/99 como o máximo exigido para amostras com ligante modificado por polímero. Bernucci et al. (2006) afirmam que, para misturas asfálticas convencionais, os valores típicos situam-se na média de 0,5 e 2,0 MPa. Todas as misturas pesquisadas atendem a esses limites, sendo que as misturas com RAP apresentam valores acima de 2,0 MPa.

Oliveira (2013) avaliou misturas recicladas mornas, encaixadas na Faixa C do DNIT, utilizando aditivo Gemul XT-14®, e obteve como resultados os valores de 0,9, 1,0, 1,5 e 1,5 MPa para a mistura referência e as misturas com adição de 15%, 35% e 50% de fresado, respectivamente. Esses valores, comparados com a presente pesquisa, apresentam-se bem inferiores. Centofante (2016) avaliou misturas com reciclagem a quente e CAP 50/70 (mesmo lote de coleta desta pesquisa), também inseridas na Faixa C, do DNIT. A autora encontrou valores de 1,42, 1,79, 2,08 e 2,36 MPa, respectivamente, para suas misturas CAref, CAF10, CAF20 e CAF30. Esses resultados apresentam maior semelhança com os encontrados para as misturas com CAP 50/70, desta pesquisa.

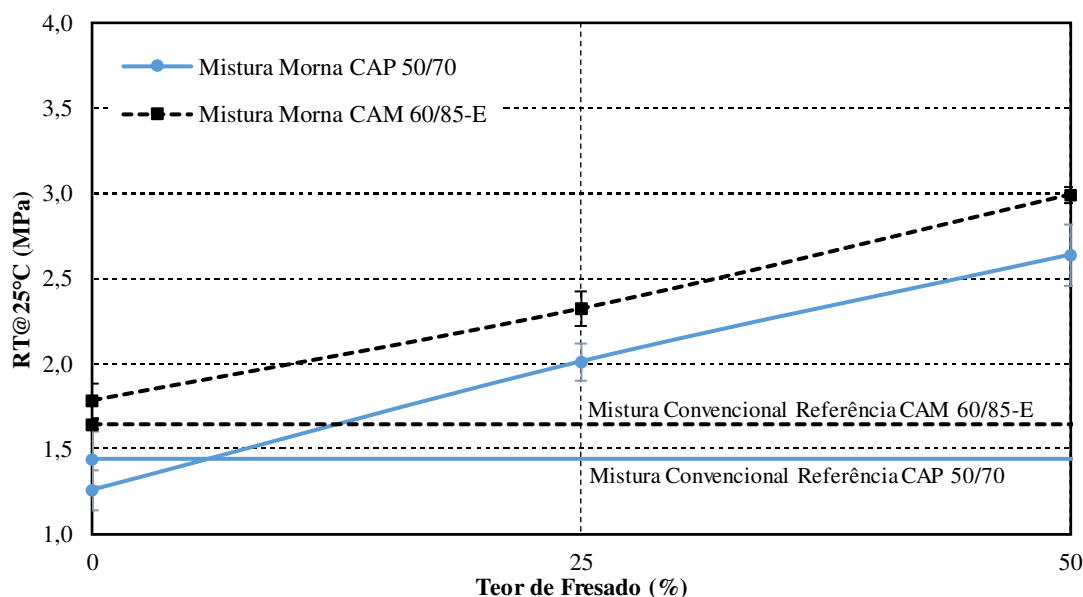


Figura 2. Resultados de RT, a 25°C, em função do teor de fresado

É importante ressaltar que, por meio do ensaio de RT, pode-se realizar uma inferência de desempenho à fadiga das misturas asfálticas. Dessa forma, quanto maior o valor de RT, melhor o indicador de desempenho das amostras ao dano por fadiga. Visto que as misturas com maiores resultados de RT são aquelas que apresentam material reciclado em sua composição e sabido pela literatura que há uma restrição quanto ao uso de fresado devido ao aumento do trincamento à fadiga dos pavimentos (McDANIEL *et al.*, 2007; BEHNIA *et al.*, 2011; DOYLE; HOWARD, 2013; MOGAWER *et al.*, 2013), pode-se dizer que, para este estudo, que utiliza material fresado oriundo de misturas com ligantes modificados CAM 60/85-E tal premissa pode não ser verdadeira.

3.2.2. Flow Number

Analisando-se o ensaio de FN, conforme Figura 3, é possível afirmar que as misturas se comportam de maneira similar, independente da temperatura de mistura e compactação. Quanto à influência do teor de fresado, pode-se averiguar que o incremento desse material proporciona um ganho importante na resistência à deformação permanente. Também se observa a possibilidade de reduzir o gasto na utilização do ligante modificado em novas misturas, apenas utilizando-se uma mistura com ligante convencional incorporada com 50% de RAP. Todavia, vale ressaltar que esse ganho pode ter sido maior, devido ao fresado utilizado na pesquisa ter CAM 60/85-E

em sua composição, elevando os valores de FN das misturas. Quanto aos diferentes tipos de ligantes utilizados, é notável a melhora dos valores nas misturas com CAM 60/85-E, em relação às misturas com CAP 50/70.

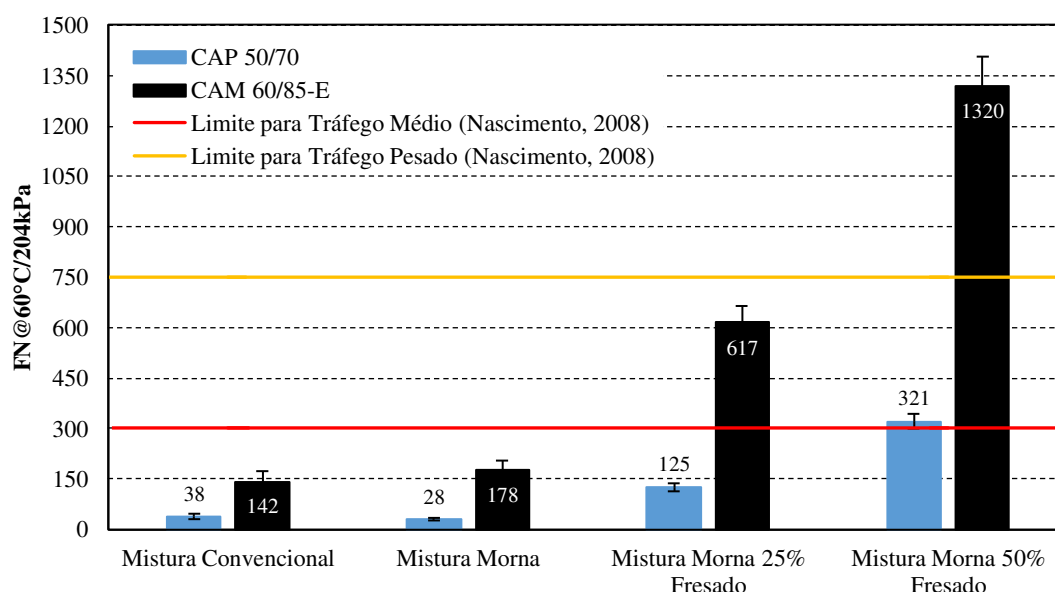


Figura 3. FN das misturas estudadas com os limites mínimos propostos por Nascimento (2008)

Nascimento (2008) estipulou valores mínimos limites para tráfego médio e pesado, de 300 e 750 ciclos, respectivamente. Somente a Mistura Morna 50% Fresado CAM 60/85-E apresenta valor superior a 750 e poderia ser utilizada para rodovias com tráfego pesado. Já as Misturas Morna 50% Fresado CAP 50/70 e Morna 25% Fresado CAM 60/85-E se encaixam dentro do limite estipulado para tráfego médio ($300 < FN < 750$). As demais misturas obtiveram valores inferiores a 300 ciclos. Oliveira (2013), em sua avaliação de uma mistura referência a quente, uma morna e misturas asfálticas recicladas mornas, com adição de 15, 35 e 50% de fresado, alcançou valores de FN na ordem de 75, 59, 65, 63 e 64 ciclos, respectivamente. O referido autor não obteve valores expressivos de FN e não constatou o aumento da resistência à deformação permanente com o aumento do teor de RAP nas misturas, conforme tendência encontrada na presente pesquisa. Porém, as misturas com reciclagem a quente de Centofante (2016) constataram que o incremento da taxa de fresado acarreta o aumento do parâmetro FN das misturas, corroborando com os resultados desta pesquisa. Nesse contexto, pode-se dizer que a influência do teor de ligante envelhecido do RAP torna as amostras mais rígidas e, conseqüentemente, menos suscetíveis a sofrerem deformação plástica.

A literatura tem mostrado que as misturas mornas apresentam valores de FN menores que as misturas convencionais. (BONAQUIST, 2011; RODEZNO *et al.*, 2015). Em Bonaquist (2011), o critério de aceitação do material tem uma redução média de 43% nos valores de FN para misturas WMA em relação às misturas convencionais. Neste trabalho, observou-se que as misturas WMA com CAP 50/70 apresentam redução de 26% em relação às convencionais. Contudo, nas misturas com CAM 60/85-E o comportamento se inverte, com incremento de FN de 25%.

3.3. Propriedades de Deformabilidade

3.3.1. Módulo de Resiliência

Os valores de MR, apresentados na Figura 4, mostram que, à medida que se aumenta a porcentagem de RAP, há um acréscimo de rigidez do material. Os ligantes CAP 50/70 e CAM 60/85-E exibem valores de MR semelhantes, havendo uma leve melhora dos resultados para aquelas com ligante modificado por polímero. A pouca diferença entre os valores encontrados para as misturas mornas e convencionais mostram que não há perda de rigidez ao se trabalhar com essa tecnologia. É importante frisar que o volume de vazios dos corpos de prova ensaiados foi de $4\pm 1\%$ e que a frequência de ensaio foi de 1 Hz (com carregamento de 10 Hz por 0,1 s e descanso de 0,9 s).

O aumento ou a diminuição do MR implica na distribuição de tensões e deformações na estrutura do pavimento. Via de regra, misturas mais rígidas tendem a concentrar em si os esforços cíclicos e necessitam de maior resistência à fadiga para não apresentarem trincamento. (PAPAGIANNAKIS; MASSAD, 2008; MEDINA; MOTTA, 2015).

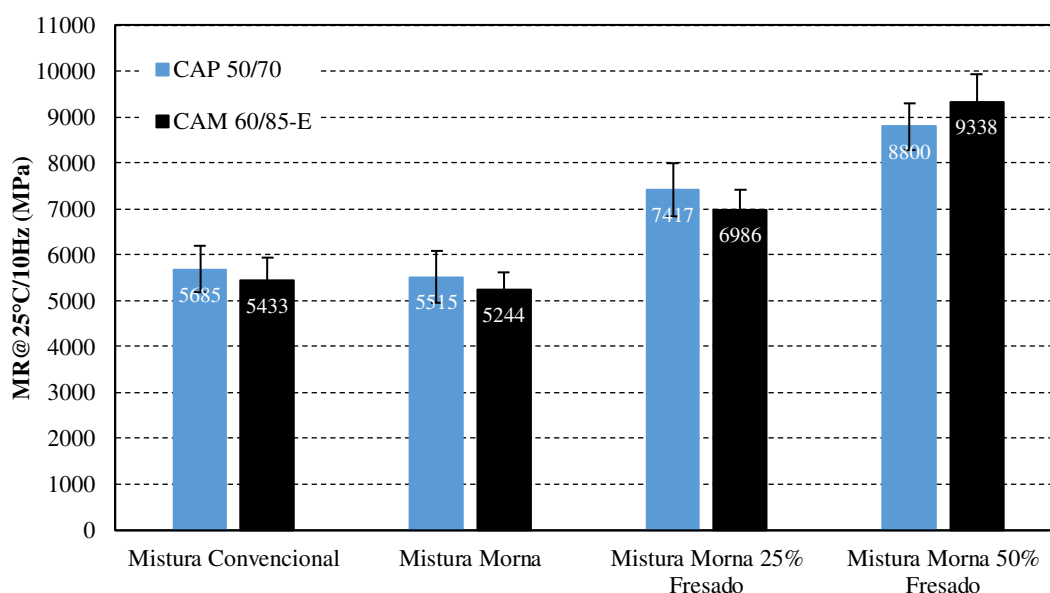


Figura 4. MR a 25°C e 10 Hz das misturas estudadas

Bernucci *et al.* (2006) citam que valores típicos de MR, a 25°C e 10 Hz, estão na faixa de 2000 a 8000 MPa. Todas as misturas estudadas apresentam valores dentro desses limites. As misturas com 50% de fresado mostram resultados superiores a 8000 MPa, o que pode ser explicado pela influência da distribuição granulométrica e pela maior rigidez do material fresado. Essas misturas podem ser aplicadas como base negra, por exemplo, desde que se adequem ao projeto estrutural do pavimento.

Vasconcelos e Soares (2003) avaliaram misturas asfálticas recicladas a quente, com porcentagens de fresado de 10% e 50%, e encontraram resultados de MR menores aos desta pesquisa. Os autores obtiveram valores da ordem de 2680 e 2908 MPa para mistura referência, 2822 e 3031 MPa para misturas com adição de 10% de fresado, e 3163 e 3796 MPa para misturas com adição de 50% de RAP. Já Oliveira (2013), em sua pesquisa sobre misturas recicladas mornas, encontrou 3266, 2672, 3921 e 4786 MPa, respectivamente, para a mistura referência, e para as

amostras com 15%, 35% e 50% de adição de fresado. Ambos os autores obtêm resultados inferiores aos deste estudo, mas constataam que o aumento da rigidez está aliado ao acréscimo da proporção de fresado, assim como apontam os valores desta pesquisa.

3.3.2. Módulo Complexo

Tendo em vista o comportamento termoreológico simples das misturas, a partir dos resultados de módulo dinâmico e ângulo de fase, foram construídas suas curvas mestras, na temperatura de 21°C (Figuras 5 e 6, respectivamente), utilizando-se do princípio da superposição tempo-temperatura (TTSP). (DI BENEDETTO; CORTÉ, 2005; SPECHT *et al.*, 2017). Os dados obtidos foram ajustados ao modelo reológico 2S2P1D, e são apresentados em termos contínuos e não discretos.

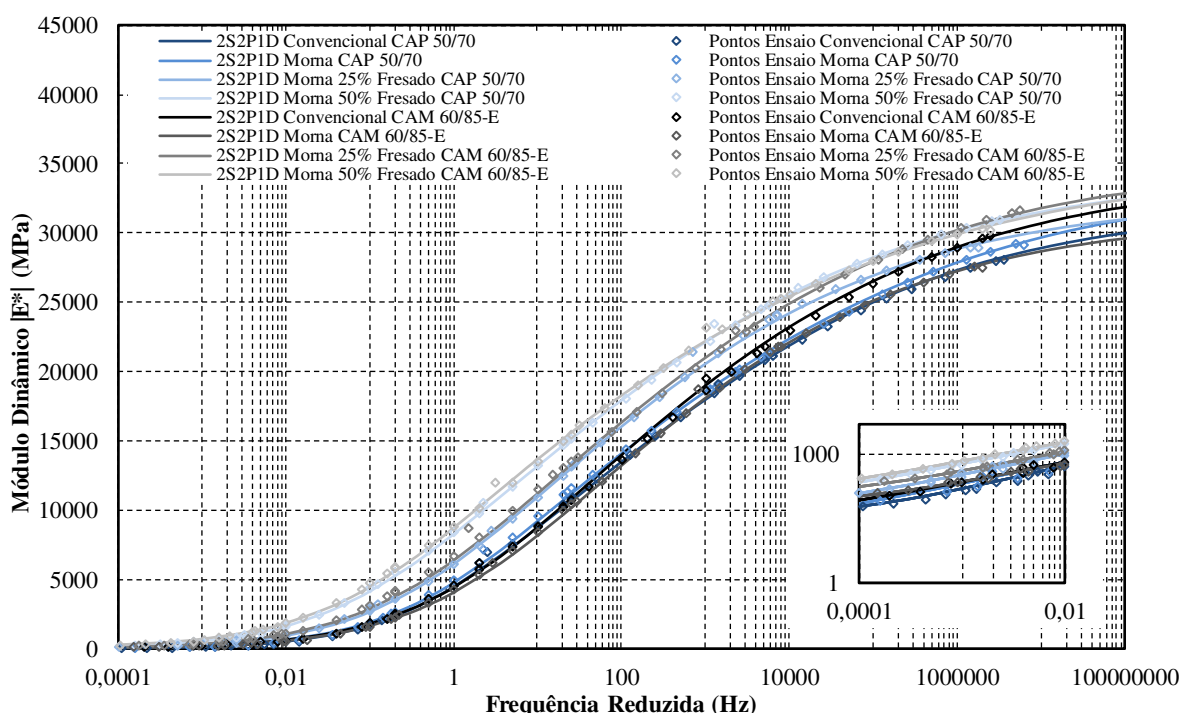


Figura 5. Curvas mestras de Módulo Dinâmico para temperatura de 21°C

Ao observar a Figura 5, é possível verificar que o módulo dinâmico cresce em função do aumento da frequência. Tal crescimento ocorre devido a menor exposição à carga, quando em frequências maiores, isto é, não há tempo para a ocorrência das manifestações de deformações viscosas reversíveis nas misturas asfálticas. Ademais, nas altas frequências, predominam deformações elásticas no material, fazendo com que os módulos atinjam seus maiores valores. Nas baixas frequências, as deformações viscoelásticas costumam se manifestar em sua totalidade, já que o tempo de carregamento é maior, acarretando menores valores de módulo dinâmico e maiores valores de ângulo de fase.

Nas altas frequências, as misturas mornas e convencionais apresentam comportamentos semelhantes. As misturas com 50% de material reciclado, de ambos os ligantes, apresentam maior rigidez por quase todo espectro de frequências, sendo ultrapassadas pela Mistura Morna 25% Fresado CAM 60/85-E nas frequências acima de 10^5 Hz. Uma explicação para a inversão nos resultados, dando superioridade à mistura com 25% de RAP, poderia ser a disposição distinta dos agregados nas amostras. Era esperado que a inserção de fresado aumentasse a rigidez das

misturas asfálticas, assim como, que o valor de rigidez das misturas com ligante modificado sobressaísse àquelas com ligante convencional. O aumento do valor de $|E^*|$ para as misturas com adição de RAP deve-se às características do ligante envelhecido presente nesse material, que exerce grande efeito na sua rigidez.

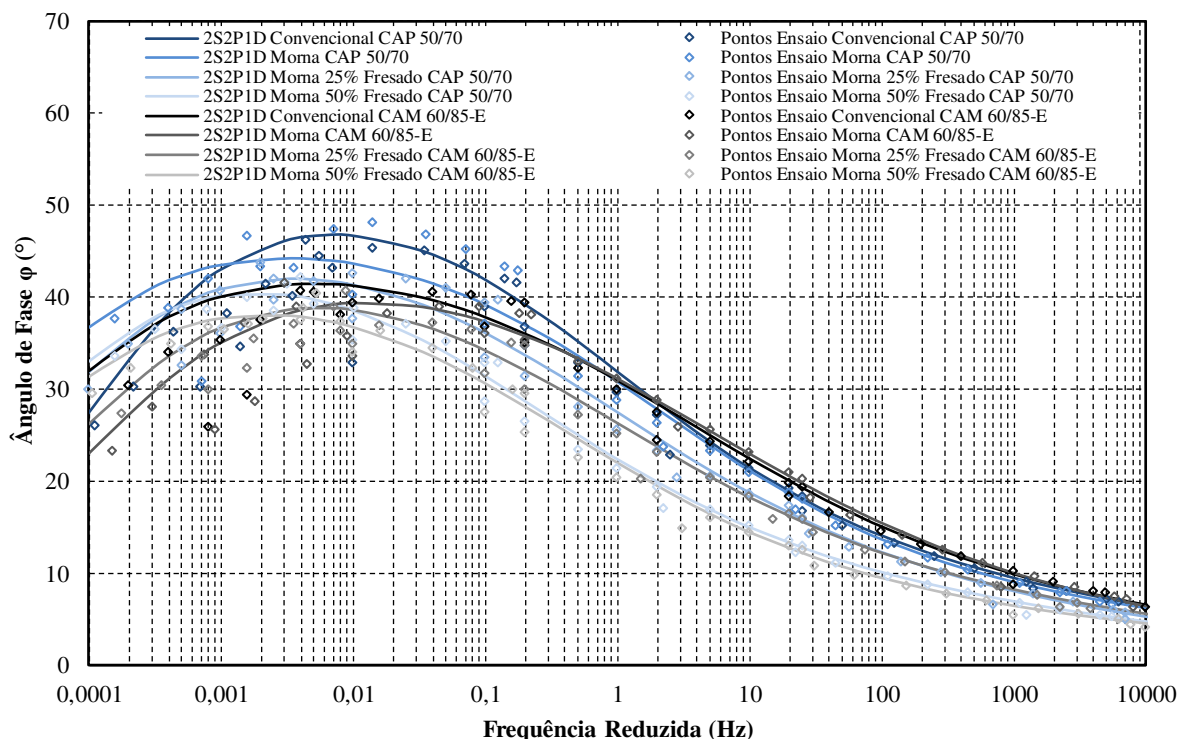


Figura 6. Curvas mestras de Ângulo de Fase para temperatura de 21°C

No estudo de misturas asfálticas recicladas a quente, Centofante (2016) encontrou inversão na ordem de rigidez, e mostrou que a mistura com 10% de fresado adquiriu maior valor de $|E^*|$ que àquela com 20% de RAP em sua composição. Os dados de Basueny *et al.* (2015) também apontam essa inversão, visto que a mistura contendo 25% de adição de material reciclado se apresenta mais rígida em comparação à mistura com 40%. Segundo afirmação dos autores, a adição de fresado aumenta a rigidez da mistura, pois o comportamento das amostras é determinado, principalmente, pelo ligante asfáltico. Essa citação corrobora com os resultados encontrados na presente pesquisa.

Analisando o comportamento em baixas frequências, abaixo de 0,1 Hz, é visível notar que as misturas apresentam menor módulo dinâmico e, conseqüentemente, são menos rígidas nestas condições de temperatura e frequência. As misturas com os maiores valores são aquelas com inserção de 50% de fresado, seguidas pelas misturas com 25% de RAP e por último, com comportamento muito semelhante entre si, as misturas convencionais e mornas. Existe uma pequena superioridade de rigidez para as misturas com ligante CAM 60/85-E em relação àquelas com CAP 50/70, também confirmada por Almeida Jr. (2016). Importante destacar novamente o aumento da rigidez das misturas asfálticas com maior proporção de fresado, afirmando que o ligante envelhecido eleva a rigidez do material, fato também comprovado por Centofante (2016).

Pasche *et al.* (2018) avaliaram a influência do processo de cimentação e dos esforços de compactação nas propriedades viscoelásticas lineares de misturas recicladas cimentadas. Os autores verificaram que o módulo dinâmico cresce em função da frequência. Nas altas temperaturas, Pasche *et al.* (2018) encontraram valores de módulos mais elevados que as misturas asfálticas estudadas por Almeida Jr. (2016) e Centofante (2016), em virtude da cimentação do material.

O ângulo de fase, plotado na Figura 6, é relacionado às propriedades elásticas e viscosas dos materiais asfálticos, sendo um parâmetro frequentemente utilizado para avaliar o efeito da modificação por polímero. Ao analisar as curvas mestras de ângulo de fase, nota-se que os menores valores, em quase todo o espectro de frequência, são apresentados pelas misturas com 50% de RAP, de ambos os ligantes. Ainda, nas frequências mais baixas as misturas com CAM 60/85-E apresentam melhor comportamento, com menor ângulo de fase, ou seja, são mais elásticas mesmo em condições de altas temperaturas e, possivelmente, apresentam maior resistência às deformações permanentes. Quanto ao teor de fresado, pode-se dizer que existe um visível aumento da parcela elástica quando utilizado RAP, em conjunto com ligante modificado por polímero.

3.4. Propriedades de Adesão e Coesão

3.4.1. Lottman Modificado ou Dano por Umidade Induzida

A Figura 7 apresenta os resultados do ensaio, onde é possível observar que existe uma pequena superioridade para as misturas referência a quente, se comparadas às mornas. Há um aumento da RRT (Resistência Retida à Tração) das misturas à medida que é aumentada a porcentagem de RAP. Quanto aos diferentes tipos de ligantes utilizados, nota-se que as Misturas Morna 25% e 50% Fresado com CAP 50/70 apresentam valor de RRT superior às misturas com ligante modificado com polímero.

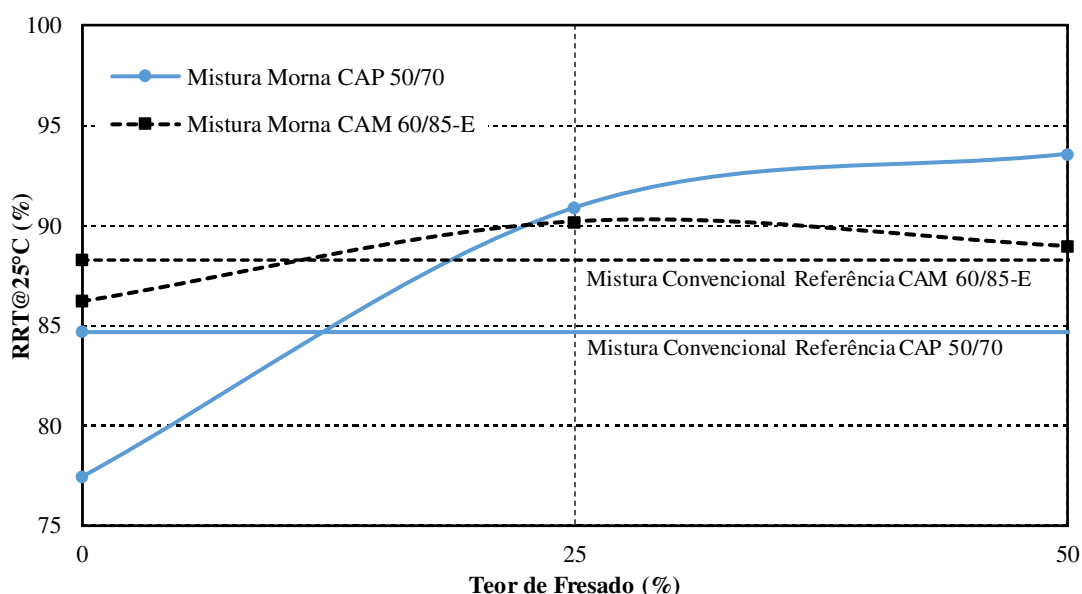


Figura 7. Resultados de RRT do ensaio DUI, realizado a 25°C, em função do teor de fresado

De acordo com a metodologia Superpave, os valores de referência preconizados para RRT devem ser superiores a 80%. Hicks (1991) afirma que a maioria dos departamentos estaduais de transportes norte-americanos utiliza o limite de 70%. Fica patente que todas as misturas

atendem o limite estabelecido por Hicks (1991); porém, os 80%, idealizados pela metodologia Superpave, não são atendidos pela Mistura Morna CAP 50/70, que apresenta resultado 3% abaixo do estipulado.

Centofante (2016) encontrou resultados divergentes do presente trabalho: ao passo em que aumentava a taxa de RAP, os valores de RRT obtidos decresciam. Um dos motivos desse decréscimo poderia ser a proveniência do reciclado utilizado pela autora e, por consequência, do ligante de composição envelhecido (CAP 50/70), já que o fresado desse estudo é composto por CAM 60/85-E. Wargha Filho (2013) avaliou misturas asfálticas mornas, com 0,4% de Gemul®, adicionado a CAP 50/70. O autor obteve RRT de 74% para as misturas com aditivo Gemul®, comparado com 81% para a mistura controle, na qual não ocorreu nenhum tipo de modificação. Esse fato está em concordância com os dados da presente pesquisa, em que a mistura de referência a quente apresenta valor de RRT superior à mistura morna, nas amostras com CAP 50/70.

3.4.2. Resistência ao Desgaste Cântabro

A Figura 8 mostra os valores obtidos para o ensaio Cântabro. Pode-se observar que as misturas convencionais perdem maior proporção de massa que as misturas mornas, mesmo que em pequena escala. Há maior perda de massa, à medida que existe o aumento do teor de fresado, nas misturas com CAP 50/70. O contrário ocorre no caso das misturas com CAM 60/85-E, em que a mistura morna apresenta melhor comportamento, com 4,8% de perda de massa. É notada melhora nos resultados, quando trabalhado com ligante modificado por polímero, se comparado ao convencional.

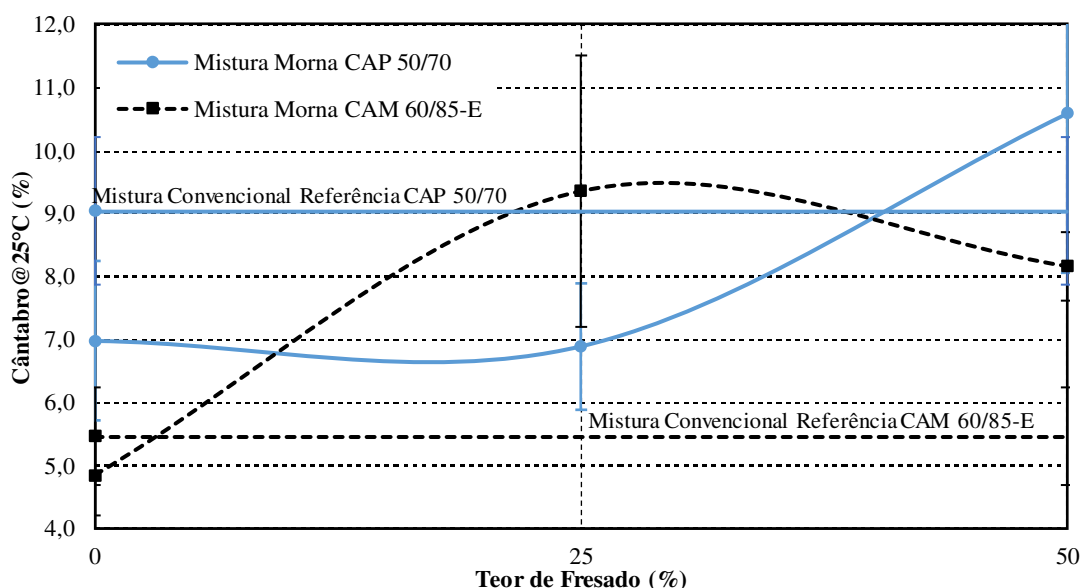


Figura 8. Resultados do ensaio Cântabro, realizado a 25°C, em função do teor de fresado

É possível afirmar, com base na norma DNIT-ES 386/99, que todas as misturas estudadas atendem ao limite máximo de perda de massa de 25% e apresentam coesão apropriada para serem utilizadas como misturas asfálticas. Boeira (2014) encontrou valor de desgaste por perda de massa Cântabro de 5,9%, para misturas com CAP 50/70 e agregados virgens similares a esta pesquisa. Para a Mistura Convencional CAP 50/70, semelhante a do autor, obteve-se desgaste

por abrasão de 9,0%. Centofante (2016) observou que, conforme o incremento da taxa de fresado, os valores de perda de massa, em média, também cresciam, demonstrando que o fresado aumenta a tendência ao desgaste. De modo geral, isso também é notado no presente estudo.

4. CONCLUSÕES

Avaliando-se a propriedade de resistência das misturas fica evidente que, à medida que se aumenta o teor de reciclado incorporado às misturas, há um aumento dos valores de RT e FN. Vale frisar que os resultados encontrados para o ensaio de *Flow Number* apresentaram clara dependência, em relação à quantidade de RAP inserida nas misturas, mostrando o grande ganho de incorporar fresado, com ligante antigo modificado por polímero, para aumentar as propriedades de resistência das misturas asfálticas recicladas mornas.

Quanto à deformabilidade, constatou-se, a partir do ensaio de MR, que as maiores rigidezes foram obtidas nas misturas com as mais elevadas taxas de fresado. Os dados do ensaio de Módulo Complexo expõem que as misturas com ligante modificado apresentaram uma maior parcela elástica, quando comparadas às misturas com ligante convencional. O aumento do teor de fresado diminuiu a parcela viscosa das amostras e maiores proporções de RAP, combinadas com CAM 60/85-E, aumentaram a rigidez das misturas asfálticas estudadas, tanto nas baixas, como nas altas temperaturas.

Os resultados para a propriedade de adesão e coesão demonstraram, com clareza, por meio do ensaio DUI, que o efeito do polímero contido no RAP proporcionou melhor desempenho quanto à adesividade, melhorando a RRT das misturas asfálticas, à medida que foi aumentada a taxa de fresado. Esse fato confirma a reatividade do ligante, presente no material reciclado de pavimento. O ensaio de resistência ao desgaste Cântabro ratificou o já averiguado pela literatura, de que a inserção de RAP aumenta o desgaste à abrasão das misturas asfálticas. Apesar de apresentarem maior desgaste, as misturas atendem aos critérios das normas e não mostram ser empecilho para seu emprego, apenas um ponto a ser observado, em projetos que irão para aplicação.

Os ensaios realizados demonstram que as misturas asfálticas recicladas mornas apontam como misturas aliadas à preservação dos recursos minerais e, com menores taxas de emissão de poluentes, ao meio ambiente; além de se mostrarem tecnicamente viáveis. As melhores propriedades de resistência, deformabilidade e adesão e coesão são, de maneira geral, apresentadas pelas misturas com 25% e 50% de fresado incorporado. É notável concluir que a utilização de RAP, passante na peneira #3/8 e composto de ligante envelhecido CAM 60/85-E, trouxe inúmeros benefícios para as misturas asfálticas estudadas. É, sem dúvida, uma expressiva contribuição para futuras pesquisas e aplicações práticas, tais como corredores de ônibus, bases asfálticas e camadas de pavimentos perpétuos. Conforme demonstram os resultados, é possível produzir misturas asfálticas recicladas mornas com propriedades semelhantes ou superiores às misturas convencionais a quente; usualmente, utilizadas no Brasil.

É importante destacar que os ganhos ambientais são de grande proporção, trazendo o conceito de sustentabilidade para o ramo da pavimentação, à medida que se reutiliza o RAP em novas misturas, sendo possível maximizar essa taxa de reutilização, com o uso de misturas mornas. Entretanto, ainda existem desafios a serem vencidos; ligados, principalmente, à resistência relacionada à fadiga do material e sua integração ao projeto estrutural, bem como à implementação prática dessas misturas em campo.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à ANP/Petrobras pela infraestrutura laboratorial, e a CAPES e ao CNPq pelas bolsas disponibilizadas.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA Jr., P. O. B. Comportamento mecânico de concretos asfálticos com diferentes granulometrias, ligantes e métodos de dosagem. 217p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.
- BASUENY, A. et al. Laboratory Evaluation of Complex Modulus and Fatigue Resistance of Asphalt Mixtures with RAP. 8th RILEM International Symposium on Testing and Characterization of Sustainable and Innovative Bituminous Materials, v. 11, 2015. DOI: 10.1007/978-94-017-7342-3.
- BEHNIA, B. et al. Effects of recycled asphalt pavement amounts on low-temperature cracking performance of asphalt mixtures using acoustic emissions. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, v. 2208, p. 64-71, 2011. DOI: 10.3141/2208-09.
- BERNUCCI, L. et al. Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros. 504f. 1ª Reimpressão. Rio de Janeiro: Petrobras: ABEDA, 2006.
- BOEIRA, F. D. Estudo do comportamento de concretos asfálticos com diferentes tipos de agregados e cales. 148p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.
- BOHN, K. A. Avaliação de misturas asfálticas recicladas mornas com uso de ligantes convencional e modificado por polímero. 254p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2017.
- BOHN, K. A.; SPECHT, L. P. Avaliação do comportamento viscoelástico e da deformação permanente de mistura asfálticas recicladas mornas com uso de ligantes convencional e modificado por polímero. In: Anais do XIX Congresso Ibero-Latinoamericano del Asfalto - CILA. Medellín. Anais [...] 2017.
- BONAQUIST, R. NCHRP 9-43: Mix design practices for warm mix asphalt. Second International Warm Mix Conference, St. Louis, Missouri, 2011.
- CENTOFANTE, R. Estudo laboratorial da utilização de material fresado em misturas asfálticas recicladas a quente. 152 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.
- D'ANGELO, J. et al. Warm-Mix Asphalt: European practice. International Technology Scanning Program. Virginia: Federal Highway Administration, 2008.
- DI BENEDETTO, H.; CORTÉ, J. F. Matériaux routiers bitumineux 2: Constitution et propriétés thermomécaniques des mélanges. Paris: Hermes-Lavoisier. 2005.
- DON BROCK J.; RICHMOND J. L. Milling and recycling. Technical Paper T-127, ASTEC. INC., Chatanooga, USA, 2007.
- DOYLE, J. D.; HOWARD, I. L. Rutting and moisture damage resistance of high reclaimed asphalt pavement warm mixed asphalt: loaded wheel tracking vs. Conventional methods. Road Materials and Pavement Design, v. 14, p. 148-172, 2013. DOI: 10.1080/14680629.2013.812841.
- GENNESSEAU, M. M. L. Avaliação da durabilidade de misturas asfálticas a quente e mornas contendo material asfáltico fresado. 195p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.
- GUO, N. et al. Laboratory performance of warm mix asphalt containing recycled asphalt mixtures. Construction and Building Materials, v. 64, p. 141-149, 2014. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.04.002.
- HAIJ, E. Y. et al. Influence of warm mix additive on mechanistic, economical, and environmental attributes of a polymer-modified asphalt mixture. Advanced Civil Infrastructure Materials, v. 3, n. 1, p.88-106, 2014. DOI: 10.1520/acem20130099.
- HICKS, R. G. Moisture damage in asphalt concrete. 91p. National Cooperative Highway Research Program. Synthesis of Highway Practice 175, Transportation Research Board, Washington, 1991.
- HUANG, B. et al. Laboratory Investigation of Mixing Hot-Mix Asphalt with Reclaimed Asphalt Pavement. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, n. 1929, p. 37-45, 2005. DOI: 10.1177/0361198105192900105.
- KUMAR, R. et al. Effect of warm mix additives on creep and recovery response of conventional and polymer modified asphalt binders. Construction and Building Materials, v. 138, p. 352-362, 2017. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.02.019.
- LIZÁRRAGA, J. M. et al. Short-term performance appraisal of half-warm mix asphalt mixtures containing high (70%) and total RAP contents (100%): From laboratory mix design to its full-scale implementation. Construction and Building Materials, v. 170, p. 433-445, 2018. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.051.
- MANGIAFICO, S. Linear viscoelastic properties and fatigue of bituminous mixtures produced with Reclaimed Asphalt Pavement and corresponding binder blends. Tese (Doutorado) - l'École Nationale des Travaux Publics de l'État. 2014.
- McDANIEL, R. et al. Investigation of properties of plant-produced RAP mixtures. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, v. 1998, p. 103-111, 2007. DOI: 10.3141/1998-13.
- MEJÍAS SANTIAGO, M. et al. Evaluation of Warm Mix Asphalt Technologies for use on Airfield Pavements. Washington, D.C., 2012.
- MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. Mecânica dos Pavimentos. 3ª Edição. Editora Interciência, Rio de Janeiro, 2015.
- MOGAWER, W. S. et al. Evaluation of high RAP-WMA asphalt rubber mixtures. Road Material and Pavement Design, v. 14, p. 129-147, 2013. DOI: 10.1080/14680629.2013.812846.
- MOGAWER, W. S. et al. Performance characteristics of asphalt rubber mixtures containing RAP and warm mix asphalt technology. Proceedings of the 2nd International WarmMix Conference, St. Louis, MO. October, 2011.

- MOTTA, R. S. Estudo de misturas asfálticas mornas em revestimentos de pavimentos para redução de emissão de poluentes e de consumo energético. 229p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica de São Paulo, São Paulo, 2011.
- MOREA, F. et al. 2012. Rheological properties of asphalt binders with chemical tensoactive additives used in warm mix asphalts (WMAs). *Construction and Building Materials*, v. 29, p.135-141, 2012. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.10.010.
- NCAT – National Center for Asphalt Technology. Technical Reports. Disponível em: <http://www.ncat.us/info-pubs/technical-reports.html>. Acesso em: 16 de set. 2015.
- NASCIMENTO, L. A. H. Nova Abordagem da Dosagem de Misturas Asfálticas Densas com Uso do Compactador Giratório e Foco na Deformação Permanente. 204p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio de Janeiro, 2008.
- OLIVEIRA, J. A. de. Avaliação do desempenho de misturas asfálticas recicladas mornas em laboratório e em campo. 139p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.
- ONOFRE, F. C. Avaliação do comportamento mecânico de misturas asfálticas produzidas com ligantes asfálticos modificados por ácido polifosfórico e aditivos poliméricos, enfatizando a resistência à deformação permanente. 160f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.
- PAPAGIANNAKIS, A. T.; MASSAD, E. A. *Pavement design and materials*. 542p. Hoboken: John Wiley & Sons, 2008.
- PASCHE, E. et al. Avaliação da rigidez de misturas recicladas cimentadas: Abordagem elástica e viscoelásticas. *Transportes*, v. 26, n. 1, p. 94-107, 2018. DOI:10.14295/transportes.v26i1.1342.
- PRADYUMNA, T. A. et al. Characterization of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) for Use in Bituminous Road Construction. 2º Conference of Transportation Research Group of India – Procedia – Social and Behavioral Sciences, 2013.
- PROWELL, B. D.; HURLEY, G. C. *Warm-mix asphalt: Best Practices. Quality Improvement, Series 125*. Lanham: NAPA. 2007.
- RODEZNO, M. C. et al. Flow Number Test and Assessment of AASHTO TP 79-13 Rutting Criteria: Comparison of Rutting Performance of Hot-Mix and Warm-Mix Asphalt Mixtures. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 2507, p. 100-107, 2015. DOI:/10.3141/2507-11.
- SPECHT, L. P. et al. 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. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.05.037.
- SHIRODKAR, P. et al. A study to determine the degree of partial blending of reclaimed asphalt pavement (RAP) binder for high RAP hot mix asphalt. *Construction and Building Materials*, v. 25, n. 1, p. 150-155, 2011. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.06.045.
- SINGH, D.; SAWANT, D. Understanding effects of RAP on rheological performance and chemical composition of SBS modified binder using series of laboratory tests. *International Journal of Pavement Research and Technology*, v. 9, n. 3, p. 178-189, 2016. DOI: doi.org/10.1016/j.ijprt.2016.06.002.
- SONG, W. et al. Influence of warm-mix asphalt technology and rejuvenator on performance of asphalt mixtures containing 50% reclaimed asphalt pavement. *Journal of Cleaner Production*, v. 192, p.191-198, 2018. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.04.269.
- VASCONCELOS, K. L.; SOARES, J. B. Projeto de Misturas de Concreto Betuminoso Reciclado a Quente com Diferentes Teores de Material Fresado. In: *Anais do XII Congresso Ibero-Latinoamericano del Asfalto - CILA. Anais [...] 2003*.
- VALDÉS, G. et al. Experimental study of recycled asphalt mixtures with high percentages of reclaimed asphalt pavement (RAP). *Construction and Building Materials*, v. 25, p. 1289-1297, 2011. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2010.09.016.
- VALDES-VIDAL, G. et al. Performance evaluation of warm mix asphalt involving natural zeolite and reclaimed asphalt pavement (RAP) for sustainable pavement construction. *Construction and Building Materials*, v. 174, p.576-585, 2018. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.04.149.
- WARGHA FILHO, N. Avaliação da influência da redução das temperaturas de usinagem e de compactação, no comportamento mecânico de misturas asfálticas mornas. 110p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.
- WEST, R. et al. Testing of Moderate and High Reclaimed Asphalt Pavement Content Mixes. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, n. 2126, 2009. DOI: 10.3141/2126-12.
- ZAUMANIS, M. et al. Influence of six rejuvenators on the performance properties of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) binder and 100% recycled asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, v. 71, p.538-550, 2014. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.08.073.
- ZHAO, S. et al. Comparative evaluation of warm mix asphalt containing high percentages of reclaimed asphalt pavement. *Construction and Building Materials*, v. 44, p. 92-100, 2013. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.03.010.
- ZUBARAN, M. Avaliação do comportamento de misturas asfálticas recicladas mornas em laboratório e usina de asfalto. 151p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.