



**26° Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR)
49ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPv)**

**AVALIAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS MORNAS COM A INCORPORAÇÃO DE
REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS FRESADOS**

Jeovanesa Régis Carvalho¹; Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena²; Rita Flávia Régis Queiroz³; Yury Ouriques Rodrigues⁴

RESUMO

Com a legislação ambiental cada vez mais rigorosa, o desenvolvimento sustentável tornou-se uma questão importante na indústria da pavimentação. Portanto, a reciclagem de revestimentos asfálticos fresados (RAP) é uma tecnologia amplamente aprovada. No entanto, existem limitações para a utilização de teores mais elevados de RAP nas misturas asfálticas. Pois, o material do RAP contém ligantes asfálticos envelhecidos. Uma das técnicas convencionais para melhorar o desempenho dessas misturas é utilizar o RAP com as tecnologias de Misturas Asfálticas Mornas (MAM), uma vez que as MAMs podem melhorar a baixa trabalhabilidade do RAP a partir da redução da viscosidade do ligante asfáltico envelhecido. Sendo assim, este trabalho analisou o desempenho de duas tecnologias (óleo de girassol, aditivo químico) disponíveis no mercado para a fabricação de MAMs com diferentes porcentagens de material fresado, como forma de viabilizar a reciclagem de RAP em maiores taxas de participação da mistura final. De maneira geral, os resultados indicaram que o aumento do teor de RAP ocasionou o incremento da rigidez das misturas asfálticas recicladas. No entanto, observou-se que o óleo de girassol possibilitou maior redução da rigidez dessas misturas, atuando assim como rejuvenescedores do ligante do RAP. Já o aditivo químico atuou melhorando a adesividade das misturas asfálticas.

PALAVRAS-CHAVE: reciclagem de pavimentos; misturas mornas; misturas asfálticas recicladas mornas.

ABSTRACT

With increasingly stringent environmental legislation, sustainable development has become an important issue in the paving industry. Therefore, Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) is a widely approved technology. However, there are limitations to the use of higher levels of RAP in asphalt mixtures. This is because the RAP material contains aged asphalt binders. One of the conventional techniques for improving the performance of these mixtures is to use RAP with Warm Mix Asphalt (WMA) technologies, since WMAs can improve the low workability of RAP by reducing the viscosity of the aged asphalt binder. Therefore, this work analyzed the performance of two technologies (sunflower oil, chemical additive) available on the market for the manufacture of WMA with different percentages of milled material, as a way of making it possible to recycle RAP at higher participation rates in the final mix. In general, the results indicated that increasing the RAP content led to an increase in the stiffness of the recycled asphalt mixtures. However, it was observed that sunflower oil led to a greater reduction in the stiffness of these mixtures, thus acting as a rejuvenator for the RAP binder. The chemical additive improved the adhesion of the asphalt mixtures.

KEY WORDS: paving recycling; warm mix asphalts; warm mix recycled asphalt.

¹ Universidade Federal de Sergipe - UFS, e-mail: jeovanesaregis@gmail.com

² Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, e-mail: lucenafb@uol.com.br

³ Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, e-mail: flaviarq18@gmail.com

⁴ Universidade de São Paulo - USP, e-mail: yury_ouriques@usp.br



INTRODUÇÃO

Com a legislação ambiental cada vez mais rigorosa, o desenvolvimento sustentável tornou-se uma questão importante na indústria da pavimentação. Misturas asfálticas mornas (MAMs) e a reciclagem de revestimentos asfálticos fresados (RAP) são duas tecnologias amplamente aprovadas. As MAMs podem ser misturadas e compactadas em temperaturas mais baixas para reduzir o consumo de energia e as emissões de gases de efeito estufa (BEHNOOD, 2020). Já o material do RAP pode substituir uma certa proporção de agregados e ligante asfálticos necessários em pavimentos asfálticos recém-construídos, o que pode realizar a reciclagem de recursos e reduzir os custos de produção (GUO *et al.*, 2020; PASETTO *et al.*, 2021; DE MEDEIROS MELO NETO *et al.* 2022).

No entanto, existem limitações para a utilização de teores mais elevados de RAP nas misturas asfálticas. Pois, o material do RAP contém ligantes asfálticos envelhecidos. Uma das principais limitações do uso de RAP em pavimentos asfálticos é o envelhecimento secundário do ligante do RAP durante o processo de aquecimento e mistura na usina de asfalto. Vários métodos foram investigados para compensar essas deficiências e algumas soluções viáveis foram introduzidas. Uma das técnicas convencionais para melhorar a compatibilidade é utilizar o RAP com a tecnologia de MAM (KEYMANESH *et al.*, 2023).

Vários estudos foram realizados para avaliar o efeito das misturas asfálticas recicladas mornas (MARMs) quanto aos aspectos de sustentabilidade relacionados ao uso de alto teor de RAP e a redução da demanda energética com adição de aditivos de MAMs (RAHMAN *et al.*, 2021; GUO *et al.*, 2020; WANG *et al.*, 2021). Os pesquisadores concluíram que a incorporação do RAP na tecnologia MAM pode efetivamente diminuir o envelhecimento secundário dos materiais do RAP durante a produção de misturas asfálticas (ABD, 2017; VISHAL *et al.*, 2020). Temperaturas de produção mais baixas reduzem o envelhecimento secundário das misturas com RAP durante a mistura e a compactação. A redução da viscosidade da MAM permite a aplicação de altos teores de RAP sem impactar negativamente a trabalhabilidade dos pavimentos. Além disso, a combinação do RAP e a MAM pode criar um pavimento sustentável com desempenho equivalente aos pavimentos asfálticos convencionais (HETTIARACHCHI *et al.*, 2019).

As tecnologias de MAMs podem ser classificadas em: aditivos orgânicos, aditivos químicos e a tecnologia de asfalto espumado (CHERAGHIAN *et al.*, 2020). A influência que diferentes aditivos de MAMs (orgânico, químico e asfalto espumado) têm sobre o comportamento de ligantes e misturas asfálticas com alto teor de material fresado ainda não são bem conhecidos. Portanto, diferentes tecnologias de MAMs apresentam diferentes vantagens, o uso de MAM apresenta seis vantagens principais, que podem ser resumidas em vantagens: ambientais, de segurança, econômicas, de pavimentação, de desempenho e de produção (NITHINCHARY, DHANDAPANI & MULLAPUDI, 2024).

Para utilizar com segurança maiores teores de RAP em misturas asfálticas recicladas, mais investigações são essenciais para preencher a lacuna relativa ao desempenho das misturas asfálticas recicladas, especialmente quando se utilizam MAMs como agentes rejuvenescedores. Sendo assim, esta pesquisa tem como objetivo analisar duas tecnologias (óleo de girassol, aditivo químico) disponíveis no mercado para a fabricação de misturas asfálticas mornas com diferentes porcentagens de material fresado, como forma de viabilizar a reciclagem de RAP em maiores taxas de participação da mistura final.



MATERIAIS E MÉTODOS

Este tópico descreve os materiais utilizados nesta pesquisa para compor as misturas asfálticas recicladas mornas e quentes. São apresentados também os procedimentos realizados para avaliar o desempenho mecânico das misturas asfálticas.

Ligante asfáltico

O ligante asfáltico de classificação 50/70 foi utilizado para compor as misturas asfálticas. A escolha deste tipo de ligante foi estabelecida pelo fato deste ser o mais utilizado na Região Nordeste do Brasil. Os procedimentos realizados para caracterizar o ligante asfáltico foram o ensaio de penetração por meio do método de ensaio DNIT 155:2010 – ME, ponto de amolecimento por meio da norma DNIT 131:2010 – ME e viscosidade rotacional por meio da norma NBR 15184:2005. A Tabela 1 os resultados dos ensaios de reologia empírica dos ligantes asfálticos puro e modificados por aditivos de MAMs.

Tabela 1 - Resultados dos ensaios de reologia empírica dos ligantes asfálticos puro e modificados antes e após o procedimento de Rolling Thin Oven Test (RTFO)

Ensaio antes do RTFO					
		Ligante 50/70	Ligante + aditivo químico	Ligante + óleo de girassol	Limites - CAP 50/70 (DNIT 095:2006)
Penetração (0.1 mm)		66,3	59,3	92,8	50 - 70
Ponto de amolecimento (°C)		48,3	50,5	46,2	≥ 46
Índice de susceptibilidade térmica (IST)		-0,97	-0,66	-0,64	(-1,5) a (+0,7)
Viscosidade rotacional (cP)	135 °C	375,00	377,50	295,00	≥ 274
	150 °C	187,50	189,00	152,50	≥ 50
	177 °C	69,25	70,00	67,75	30 a 150
Ensaio após o RTFO					
Penetração (0.1 mm)		29	38,8	55,0	-
Porcentagem de Penetração retida (%)		43,7	65,3	59,3	≥ 55
Ponto de amolecimento (°C)		53,5	54,3	50,3	≥ 46
Variação do ponto de amolecimento (°C)		5,3	3,8	4,1	≤ 8
Viscosidade rotacional (cP)	135 °C	531,3	535,0	476,3	-
	150 °C	255,0	255,5	229,5	-
	177 °C	88,8	88,0	81,8	-
Variação de massa do ligante (%)		0,064	0,062	0,102	≤ 0,5

O procedimento de RTFO simula o envelhecimento de um ligante asfáltico devido a uma combinação de reações de oxidação e volatilização. Após o procedimento de RTFO, verificou-se que os ligantes foram envelhecidos e por isso apresentaram redução da penetração e aumento do ponto de amolecimento. Isto indica que o teor de asfaltenos aumentou, enquanto o teor de aromáticos e resinas diminuiu com o envelhecimento. O aumento do teor de asfaltenos leva o asfalto a tornar-se mais rígido, ou seja, mais duro (JONI *et al.*, 2019). Este aumento da rigidez do ligante asfáltico pode



melhorar a resistência à deformação permanente, porém, pode ocasionar problemas de trincamento e trincas por fadiga (GE *et al.*, 2017).

O ligante 50/70 apresentou a penetração retida inferior ao preconizado por norma, indicando que ele tem maior tendência de oxidação e aumento de rigidez. Enquanto que o óleo de girassol e o aditivo químico atuaram melhorando esta propriedade, atendendo ao especificado por norma com penetração retida superior ao valor mínimo.

Agregados

Os agregados graúdos utilizados nessa pesquisa foram a brita 12,5mm e a brita 19mm. Os agregados miúdos empregados foram areia e pó de pedra. As propriedades físicas dos agregados são apresentadas na Tabela 2, os resultados se encontraram dentro dos limites especificados.

Tabela 2 - Massa específica real e aparente e absorção dos agregados graúdos e miúdo

Teste	Especificação	Limites	Resultados			
			Brita 19mm	Brita 12,5mm	Pó de pedra	Areia
Massa específica real, g/cm ³	DNIT 413:2019 – ME, DNIT 411/2021 – ME	-	2,77	2,78	2,70	2,50
Massa específica aparente, g/cm ³	DNIT 413:2019 – ME, DNIT 411/2021 – ME	-	2,74	2,73	2,56	2,38
Absorção, %	DNIT 413:2019 – ME	≤ 2	0,39	0,60	0,36	0,26
Índice de forma	DNIT 424:2020 – ME	≥ 0,5	0,88	0,74	-	-
Equivalente areia	DNIT 054:1997 – ME	≥ 55%	-	-	56,0%	86,39%
Partículas planas e alongadas, %	DNIT 429:2020 – ME	≤ 5	1,07	1,0	-	-
Partículas fraturadas, %	DNIT 430:2020 – ME	≥ 90	100	100	-	-

O ensaio de abrasão Los Angeles foi realizado nos agregados graúdos. Sendo realizado de acordo com a norma do DNIT-ME 035:1998. A brita 19 mm apresentou um desgaste Los Angeles de 21,01%, valor de acordo com a especificação do DNIT – ME 031:2006, que recomenda valor máximo igual ou inferior a 50%. Portanto, a brita 19 mm utilizada nesta pesquisa atende ao critério estabelecido.

Óleo de girassol

O aditivo orgânico de MAM utilizado foi o óleo de girassol da marca Liza, este foi obtido no comércio local. Baseado no desempenho mecânico apresentado no estudo de Carvalho (2018), foi adotado o teor de 2% de óleo de girassol, adicionado em peso de ligante.

Aditivo químico

O aditivo químico de MAM utilizado foi o WarmGrip® N1, fornecido pela ArrMaz do Brasil Ltda. que pertencente ao grupo ARKEMA. A Tabela 3 apresenta a caracterização física do aditivo químico.



Tabela 3 - Caracterização física do aditivo químico

Propriedade	Descrição
Aspecto, 25° C	Líquido de cor escura
Odor	Amina
Densidade, 25 °C	1,0 kg/L
Viscosidade, 25°C	1.650 cP
Registro, Avaliação, Autorização e Restrição de Produtos Químicos (REACH)	Adequado

Baseado no trabalho de Wargha Filho (2013), foi adotado para este trabalho o teor de 0,4% de aditivo químico adicionado em peso de ligante total na mistura.

RAP

A coleta do RAP foi realizada em um estoque de material fresado localizado no trecho do km 35,7 ao km 42,0 da pista no sentido crescente e decrescente da BR 230, pertencente ao DNIT de Santa Rita-PB. O estoque não apresentava vestígios de outros tipos de materiais como, por exemplo, concreto ou solo.

A extração e recuperação do ligante asfáltico do RAP foi realizada com o objetivo de caracterizá-lo reologicamente. O ensaio de extração foi realizado seguindo as recomendações da norma ASTM D2172:2017. O solvente utilizado foi o tricloroetileno, indicado na norma ASTM D2172:2017 e DNIT 158:2011-ME.

Para separação do ligante do RAP dos agregados dele, foi adotada a metodologia de ensaio de extração do ligante asfáltico baseado no estudo de Gonçalves *et al.* (2019), seguindo a norma ASTM D2172:2017. Além disso, foi realizado a recuperação do ligante do RAP por meio do rotaevaporador, sendo normatizado pela ASTM D 5404:2012. Após a recuperação do ligante foram verificados o teor de ligante médio dos materiais bem como as propriedades do ligante recuperado (PG, penetração, ponto de amolecimento, viscosidade rotacional, MSCR). Para a determinação do valor de PG do ligante do RAP foi utilizado os valores de DSR do ligante envelhecido, onde $G^*/\sin\delta$ é de 2,20kPa, o PG foi obtido apenas para a temperatura alta, e não para a temperatura baixa. Para o ensaio de MSCR, as amostras foram testadas de acordo com a norma ASTM D7405:2020 executados na temperatura de 70°C. A Tabela 4 apresenta a caracterização física do ligante do RAP.

Tabela 4 - Caracterização física do ligante do RAP

Característica	Ligante Do RAP	Norma
Penetração (0,1mm)	5,0	DNIT 155:2010
Ponto de amolecimento (°C)	90,5	DNIT 131:2010
PG (°C)	82	ASTM D 6373:2021
Viscosidade Rotacional 135 °C (cp)	10688	ASTM D4402:2015
Viscosidade Rotacional 150 °C (cp)	3944	
Viscosidade Rotacional 177 °C (cp)	775	
Jnr 0.1 (kPa-1)	0,0094	ASTM D7405:2020
Jnr 3.2 (kPa-1)	0,010	
Jnr diff (%)	7,36	
R0.1 (%)	49,90	
R3.2 (%)	48,90	
R diff (%)	2,01	



O ligante asfáltico oriundo do RAP apresentou uma temperatura máxima de PG de 82 °C. Os elevados valores de viscosidade e o baixo valor de penetração indicam um elevado grau de rigidez. A elevada rigidez que o RAP apresenta, revela a necessidade da utilização de agentes rejuvenescedores do ligante asfáltico do RAP para melhorar o desempenho das misturas com relação ao trincamento por fadiga.

Dosagem das misturas asfálticas recicladas

A pesquisa consistiu em realizar a dosagem da mistura de referência com 0% de RAP e com o ligante asfáltico convencional o CAP 50/70. Para isso, foi realizada a escolha de três composições granulométricas com os agregados disponíveis, uma superior, uma intermediária e uma inferior que se encontram dentro da Faixa C de granulometria do DNIT. Em seguida, foram avaliadas as Misturas Asfálticas Recicladas Quentes (MARQs) com o ligante convencional, variando-se apenas o teor de fresado em 30% e 50%.

As granulometrias das MARQs e das Misturas Asfálticas Recicladas Mornas (MARMs) são iguais quando se mantém constantes as quantidades de fresado durante as dosagens, portanto, não foram realizadas as dosagens para as misturas recicladas modificadas pelos aditivos de MAMs. Foram adotadas como referências os resultados das MARQs.

Foi empregada a metodologia SUPERPAVE para a realização das dosagens das misturas asfálticas. A compactação dos corpos de provas foi realizada por amassamento com o auxílio do compactador giratório segundo a norma ASTM D 6925:2009. O processo de produção do ligante modificado com o óleo de girassol foi realizado conforme as instruções da pesquisa de Carvalho (2018). Onde, o ligante foi inicialmente aquecido a uma temperatura de 135°C sendo mantida a temperatura de mistura constante. O tempo de mistura foi de 20 minutos, o teor de óleo de girassol foi adicionado gradativamente ao ligante, a uma velocidade máxima de 410 rpm no misturador mecânico. Já a mistura do ligante com o aditivo químico seguiu as recomendações de Oliveira (2013) e Wargha Filho (2013), onde a mistura foi submetida à uma rotação de 1.500 rpm por 20 minutos em uma temperatura de 130 °C.

Para as misturas recicladas foi utilizada como parâmetro a curva intermediária que atendeu aos critérios da dosagem SUPERPAVE da mistura de referência. Não houve qualquer processamento ou beneficiamento do RAP para a produção das misturas asfálticas. A Tabela 5 apresenta as proporções de agregados nas granulometrias e as curvas granulométricas finais das misturas com os teores de 0, 30 e 50% de RAP.

Tabela 5 - Proporções de agregados nas granulometrias das misturas recicladas

RAP	Brita 19 mm	Brita 12,5 mm	Areia	Pó de pedra	Filler
0%	15%	35%	6%	42%	2%
30%	14%	26%	3%	25%	2%
50%	9%	23%	3%	13%	2%

Após a escolha das curvas granulométricas, foi realizada a compactação SUPERPAVE visando obter um projeto de mistura com volume de vazios de 4%. Em seguida foi realizado o ensaio para determinação da densidade da mistura por meio do método de Rice Test. As porcentagens dos teores de ligantes novos para as misturas recicladas foram obtidos por meio do teor de ligante do material fresado de 5,6%, obtido na caracterização do RAP. Na Tabela 6 são apresentados os parâmetros volumétricos das misturas asfálticas recicladas: volume de vazios (VV), volume de vazios nos



agregados minerais (VAM), e a relação betume/vazios (RBV). Estes parâmetros permitiram a definição do teor de projeto, o qual foi usado na composição das misturas asfálticas recicladas para a avaliação das propriedades mecânicas. Observa-se que, conforme a Norma da ASTM D2041/D2041M:2019, que as misturas atenderam às especificações.

Tabela 6 - Parâmetros volumétricos das misturas asfálticas recicladas

Mistura	Teor de ligante virgem (%)	Teor de ligante total (%)	%gmm	VAM (%)	VV (%)	RBV (%)
0% (Ref)	5,20	5,2	95,75	14,18	4,0%	71,69
30% RAP	3,72	5,4	95,05	16,24	4,1%	74,76
50%RAP	2,90	5,7	95,07	16,72	4,1%	74,06
Crítérios	-	-	96	13 mín	4,00	65 a 75

Pode-se observar que a quantidade de ligante virgem adicionada às misturas, com base nos vazios de 4%, foi superior ao teor de ligante de 5,2% adicionado na mistura de referência, indicando assim que a ativação do ligante não foi completa. Logo, o ligante presente no RAP atua como “partial blending”, ou seja, apenas uma parcela do ligante do RAP interage com o ligante asfáltico virgem. Assumindo-se que as misturas deveriam ter 5,2% de teor de ligante total, observa-se que a mistura contendo 30% de RAP apresentou uma ativação do ligante do RAP de 96,16%, já a mistura com 50% de RAP apresentou uma ativação 90,38%.

No entanto, apesar da ativação parcial do ligante proveniente do RAP ser provavelmente o principal motivo para as misturas com um teor mais elevado de RAP necessitarem de mais ligante total, a ativação pode não ter sido o único fator. O fato de as misturas com maior teor de RAP conter ligantes mais envelhecidos, faz com que as misturas sejam mais resistentes à compactação, necessitando de um teor de ligante maior. Além disso, a temperatura de compactação também pode ser um fator contribuinte para a menor ativação do ligante do RAP.

Temperaturas de usinagem e compactação

Segundo o NCHRP Report 648 (2010), as temperaturas de usinagem compactação das misturas asfálticas são determinadas dentro das faixas de viscosidade de 170 ± 20 cP e 280 ± 30 cP, respectivamente. Logo, as temperaturas de usinagem e compactação para a MQ0 foram obtidas por meio da curva de viscosidade do ligante virgem CAP 50/70 (153°C). Os agregados virgens foram aquecidos convencionalmente, 10°C acima da temperatura normal do ligante (à 163°C). A mistura não-compactada permaneceu em estufa, à temperatura de compactação por um período de 2 horas antes da compactação, com o objetivo de simular o envelhecimento de curto prazo durante a usinagem.

Devido a elevada viscosidade do ligante extraído do RAP, não é possível determinar uma temperatura de usinagem para o ligante do RAP com as temperaturas ensaiadas. Logo, com base na literatura (GENNESSEAU, 2015; BOHN, 2017), tanto para as MARQs quanto para as MARMs o RAP foi aquecido até atingir a temperatura de 110°C, durante um período de 2 horas, de modo a simular o pré-aquecimento em usinas adaptadas com tambor secador especial para material reciclado.

Para as MARQs, a determinação da temperatura do ligante virgem CAP 50/70 foi obtida pelo ensaio de viscosidade (153°C). Os agregados virgens foram aquecidos convencionalmente, 10°C acima da



temperatura normal do CAP (à 163°C), finalmente essas misturas apresentaram uma temperatura final de compactação de 142°C.

Baseado no trabalho de Wargha Filho (2013), as temperaturas aplicadas para as misturas com os ligantes modificados com óleo de girassol e aditivo químico foram reduzidas em 20°C da temperatura obtida no ensaio de viscosidade, com o objetivo de simular a temperatura de uma típica MAM. A Tabela 7 apresenta as temperaturas utilizadas na produção dos corpos de provas para realização dos ensaios mecânicos.

Tabela 7 - Temperaturas de usinagem e compactação

Temperatura	MARQ	MARM + aditivo químico	MARM + óleo de girassol
RAP	110	110	110
Ligante	153	133	127
Agregados virgens (°C)	163	143	137
Compactação (°C)	142	120	110-120

Caracterização mecânica

Para caracterização mecânica foram realizados os seguintes ensaios mecânicos: Resistência à Tração Indireta por Compressão Diametral (RT) de acordo com a norma do DNIT 136/2018 – ME, Módulo de Resiliência (MR) de acordo com a norma do DNIT 135/2018 – ME e dano por umidade induzida (Lottman Modificado) de acordo com a norma do DNIT 180/2018 – ME.

RESULTADOS

Neste tópico são analisados os efeitos dos aditivos de MAMs sobre as propriedades mecânicas das misturas asfálticas recicladas.

Resistência à tração indireta por compressão diametral

A Figura 1 apresenta os valores médios da resistência à tração por compressão diametral (RT) das misturas estudadas nesta pesquisa.

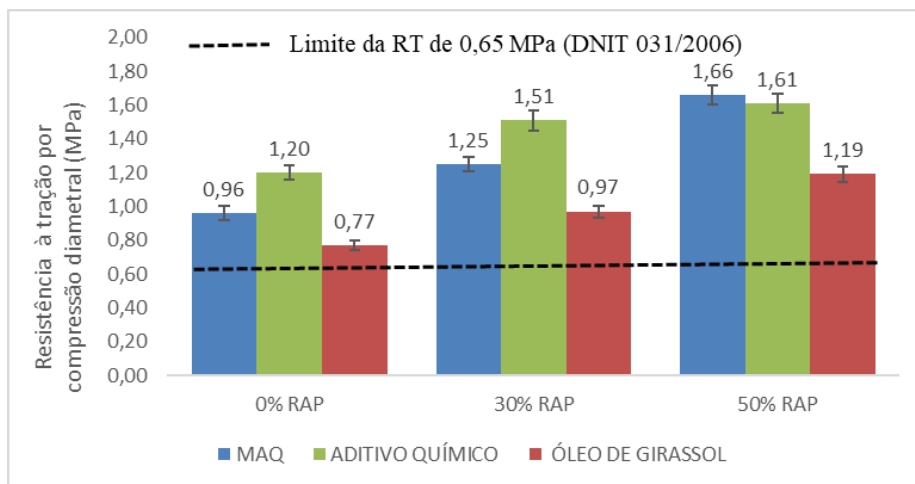


Figura 1 - Resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral



Todas as misturas atenderam ao critério da norma do DNIT - ME 031:2006, de um valor mínimo de 0,65 MPa (a 25°C), em misturas asfálticas destinadas a camadas de rolamento. Verifica-se que a resistência à tração aumentou conforme foi elevado o teor de RAP nas misturas. Uma resposta semelhante foi relatada por outros autores (FAKHRI & AHMADI, 2017; OMRANIAN *et al.*, 2018), onde um aumento no valor de RT foi observado com teor crescente de RAP para misturas asfálticas com e sem aditivos de MAMs.

Entende-se que o aumento do percentual de RAP proporciona um aumento da rigidez das misturas asfálticas recicladas. Isso ocorre devido ao processo de oxidação, o teor de ligante do RAP endurece durante sua vida útil, tornam a rigidez das misturas asfálticas recicladas maior em comparação com as misturas convencionais. Além disso, essa elevação da rigidez pode ser negativa para a mistura, uma vez que o aumento da resistência ocorreu devido ao acréscimo do percentual de ligante oxidado do RAP, que torna as misturas mais frágeis e propensas a trincas por fadiga.

O óleo de girassol reduziu o valor da RT quando comparado com os mesmos teores de RAP das misturas a quente. Os valores de RT mais baixos indicam seu comportamento flexível. Essa redução da RT está associada com a diminuição da temperatura de compactação e que resulta na redução da capacidade de carga das misturas (OMRANIAN *et al.*, 2018). Ainda de acordo com estes autores, esta redução também pode ser atribuída à capacidade que a MAM tem de compensar os efeitos do ligante envelhecido presente no RAP.

No entanto, as misturas modificadas com o aditivo químico nos teores de 0% e 30% de RAP aumentaram os valores da RT quando comparadas com as misturas recicladas a quente. Enquanto que as com 50% de RAP modificadas com aditivo químico apresentaram resistência próximas da mistura a quente. Portanto, pode-se verificar que o aditivo químico não atuou rejuvenescendo o ligante do RAP e as misturas modificadas com esse aditivo.

Módulo de resiliência

A Figura 2 apresenta os resultados dos valores médios do ensaio de módulo de resiliência (MR) a 25°C, referentes à 10% da carga da RT das misturas estudadas nesta pesquisa.

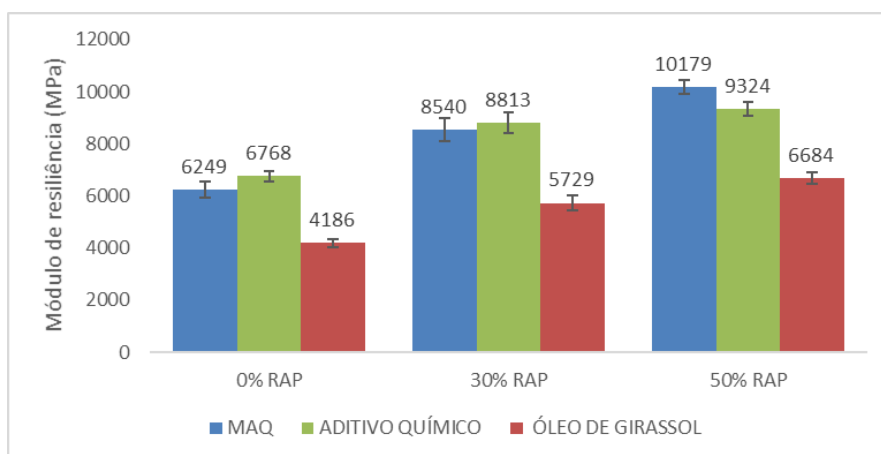


Figura 2 - Resultados do ensaio de MR

Verifica-se a influência do RAP na rigidez das misturas, o módulo de resiliência, assim como a resistência à tração, aumentou com o aumento do teor de RAP nas misturas. O maior aumento da rigidez ocorreu para a mistura com o CAP puro.



Além disso, percebe-se que a adição de ligante do RAP aumentou a rigidez das MARMs. De acordo com Martinho, Picado-Santos & Capitão (2017), esse aumento da rigidez pode tornar as misturas rígidas e quebradiças que afetam negativamente o desempenho em baixas temperaturas das MARMs. Por outro lado, deve-se levar em conta que a taxa de trinca por fadiga e maior suscetibilidade à fratura das misturas asfálticas não é determinada apenas pela rigidez, mas também por parâmetros como valores de módulo resultantes da caracterização viscoelástica, volume de vazios, adesão e coesão da mistura.

Dano por umidade induzida

A Figura 3 apresenta os resultados dos valores de Resistência Retida à Tração (RRT).

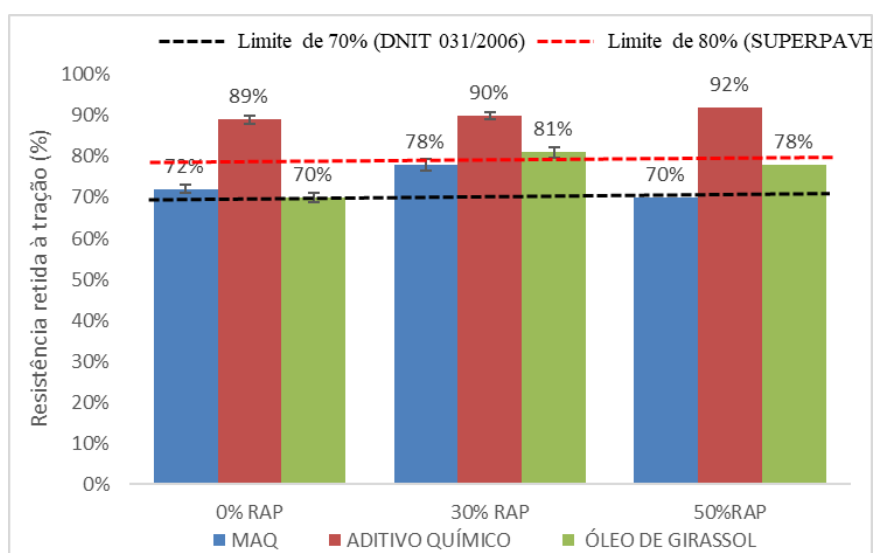


Figura 3 - Resultados do ensaio de dano por umidade induzida

Para a metodologia SUPERPAVE, o valor de RRT mínimo para que a susceptibilidade à umidade da mistura asfáltica seja considerada aceitável é 80%. Já a especificação de serviço do DNIT 031/2006, preconiza uma RRT mínima de 70% para misturas asfálticas. Verifica-se que todas as misturas asfálticas satisfizeram esse critério. Os aditivos de MAMs combinados com os teores de RAP, analisados nesta pesquisa, atuaram melhorando essa propriedade.

Sabe-se que o agregado empregado neste trabalho é o granítico, reconhecido por ter fraca adesividade com o ligante asfáltico. Logo, o aditivo químico, atuou melhorando essa propriedade possibilitando a produção de misturas mais duráveis, especialmente na região Nordeste, onde este tipo de agregado prevalece.

Segundo Goli & Latifi (2020), a resistência retida à tração da mistura asfáltica é uma característica importante que representa as propriedades coesivas e adesivas do ligante e da interface ligante-agregado, portanto, quanto maior a RRT melhor será a resistência à ação deletérea da água. O aumento na resistência à umidade pode ter ocorrido principalmente porque o ligante envelhecido do RAP e os agregados do RAP apresentaram uma ligação mútua mais forte do que o ligante asfáltico virgem e o agregado natural impedindo assim a entrada de água na interface. Além disso, esse aumento da resistência à umidade das misturas asfálticas recicladas pode ter sido devido os agregados reciclados já serem revestidos com ligante asfáltico. Assim, a penetração de água é limitada nas



partículas de RAP, o que as torna mais resistentes à desagregação do que as misturas asfálticas convencionais.

CONCLUSÃO

De maneira geral, o aumento do teor de RAP ocasionou o incremento da rigidez das misturas asfálticas recicladas, esse fato pode ser explicado devido ao acréscimo do teor de ligante oxidado oriundo do RAP. Ao mesmo tempo, a incorporação do RAP proporcionou o acréscimo da resistência ao dano por umidade induzida das misturas asfálticas. Considerando o método de produção de MAM (orgânico, químico) mais adequado para compor misturas asfálticas recicladas, observou-se que o aditivo orgânico (óleo de girassol) possibilitou maior redução da rigidez das misturas asfálticas recicladas, atuando assim como rejuvenescedores do ligante do RAP. No entanto, o aditivo químico atuou melhorando a adesividade das misturas asfálticas, mesmo nas misturas com alto teor de RAP, prolongando a vida útil do pavimento, protegendo-o contra desgaste e danos causados pela umidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABD, DURAI MUAYED (2017). Characterisation of Warm Asphalt Mixtures with Addition of Reclaimed Asphalt Pavement Materials. University of Liverpool.
- BEHNOOD, A. (2020). A review of the warm mix asphalt (WMA) technologies: Effects on thermo-mechanical and rheological properties. *Journal of Cleaner Production*, 120817. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120817
- BOHN, K. A. (2017). *Avaliação de Misturas Asfálticas Recicladas Mornas com Uso de Ligantes Convencional e Modificado por Polímero*. Dissertação de Mestrado. Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil.
- CARVALHO, J. R. (2018). *Estudo do Comportamento do Asfalto Modificado Com Óleo de Girassol Visando à Obtenção de Misturas Mornas*. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, Paraíba, Brasil.
- CHERAGHIAN, G., CANNONE FALCHETTO, A., YOU, Z., CHEN, Y. S., KIM, J, WESTERHOFF, K. H., WISTUBA, MP (2020). Warm mix asphalt technology: An up to date review. *Journal of Cleaner Production*, 122128. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.122128
- DE MEDEIROS MELO NETO O, MINERVINA SILVA I, DE FIGUEIREDO LOPES LUCENA LC, *et al* (2022) Viability of recycled asphalt mixtures with soybean oil sludge fatty acid. *Construction and Building Materials* 349:128728. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128728
- FAKHRI, M., & HOSSEINI, S.A. (2017). *Laboratory evaluation of rutting and moisture damage resistance of glass fiber modified warm mix asphalt incorporating high rap proportion*. *Construction and Building Materials*, 134, 626–640.
- GE, D.; YAN, K.; YOU, L.; WANG, Z. (2017). *Modification mechanism of asphalt modified with sasobit and polyphosphoric acid (PPA)*. *Construction and Building Materials*, v. 143, p. 419- 428.
- GENNESSEAU, M. M. L. (2015). *Avaliação da Durabilidade de Misturas Asfálticas a Quente e Mornas Contendo Material Asfáltico Fresado*. Tese de doutorado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.
- GOLI, H., & LATIFI, M. (2020). *Evaluation of the effect of moisture on behavior of warm mix asphalt (WMA) mixtures containing recycled asphalt pavement (RAP)*. *Construction and Building Materials*, 247, 118526. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118526
- GONÇALVES, B. C. S.; PEREIRA, D. S.; SPECHT, L. P.; PINHEIRO, R. J. B. (2019). *Avaliação da centrífuga rotarex na determinação do teor de ligante e granulometria de diferentes concretos asfálticos*. *Revista Transportes*, v. 28, n. 3, p. 75-90.



GUO, M., LIU, H., JIAO, Y., MO, L., TAN, Y., WANG, D., & LIANG, M. (2020). Effect of WMA-RAP technology on pavement performance of asphalt mixture: A state-of-the-art review. *Journal of Cleaner Production*, 121704. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121704

HETTIARACHCHI, C.; HOU, X.; WANG, J.; XIAO, F. (2019). A comprehensive review on the utilization of reclaimed asphalt material with warm mix asphalt technology. *Construction and Building Materials*. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117096

JONI, H. H., AL-RUBAEE, R. H. A., & AL-ZERKANI MAHDI A. (2019). *Rejuvenation of Aged Asphalt Binder Extracted from Reclaimed Asphalt Pavement Using Waste Vegetable and Engine Oils*. *Case Studies in Construction Materials*, e00279. DOI: 10.1016/j.cscm.2019.e00279

KEYMANESH, MAHMOUD REZA; AMANI, SAEED; OMRAN, ALI TAGHINEZHAD & KARIMI, MOHAMMAD M. (2023). Evaluation of the impact of long-term aging on fracture properties of warm mix asphalt (WMA) with high RAP content. *Construction and Building Materials*. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.132671

NITHINCHARY, J.; DHANDAPANI, BHUVANA PRIYA; MULLAPUDI, RAMYA SRI. (2024). Application of warm mix technology - design and performance characteristics: Review and way forward. *Construction and Building Materials*. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.134915

OLIVEIRA, J. A. (2013). *Avaliação do Desempenho de Misturas Asfálticas Recicladas Mornas em Laboratório e em campo*. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, Brasil.

OMRANIAN, S. R., HAMZAH, M. O., GUNGAT, L., & TEH, S. Y. (2018). *Evaluation of asphalt mixture behavior incorporating warm mix additives and reclaimed asphalt pavement*. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 5(3), 181–196. DOI: 10.1016/j.jtte.2017.08.003

PASETTO, M., BALIELLO, A., GIACOMELLO, G., & PASQUINI, E. (2021). Towards very high RAP content asphalt mixes: A comprehensive performance-based study of rejuvenated binders. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*. DOI: 10.1016/j.jtte.2020.12.007

RAHMAN, MPHAMMAD ASHIQUR; ZAMAN, MUSHARRAF; ALI, SYED ASHIK; GHABCHI, ROUZBEH & GHOS, SAGAR. (2021). Evaluation of mix design volumetrics and cracking potential of foamed Warm Mix Asphalt (WMA) containing Reclaimed Asphalt Pavement (RAP). DOI: 10.1080/10298436.2021.1902522

VISHAL, U.; CHOWDARY, V.; PADMAREKHA, A.; MURALI KRISHNAN, J. (2020). Influence of moisture damage on fatigue of warm mix and hot mix Asphalt mixture. *J. Mater. Civ. Eng.*, 32. DOI: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0003321

WANG, DI; RICCARDI, CHIARA; JAFARI, BABAK; FALCHETTO, AUGUSTO CANNONE; WISTUBA, MICHAEL P. (2021). Investigation on the effect of high amount of Re-recycled RAP with Warm mix asphalt (WMA) technology. *Construction and Building Materials*. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125395

WARGHA FILHO, N. (2013). *Avaliação da influência da redução das temperaturas de usinagem e de compactação no comportamento mecânico de misturas asfálticas mornas*. Dissertação de Mestrado, Petran / UFC – Universidade Federal do Ceará, Programa de Pós-Graduação de Engenharia de Transportes, Fortaleza, CE, Brasil.

WOSZUK, A., & FRANUS, W. (2017). *A Review of the Application of Zeolite Materials in Warm Mix Asphalt Technologies*. *Applied Sciences*, 7(3), 293. DOI: 10.3390/app7030293