Revista COOPEX (ISSN:2177-5052)

Análise comportamental de uma mistura de asfalto reciclado a quente utilizando a glicerina como agente rejuvenescedor

Behavioral analysis of a hot recycled asphalt mixture using glycerin as a rejuvenating agent

Bruna Thalita Alexandre Silva*[1]
Bianca Thamires Alexandre Silva[2]
Flávio Franklin Ferreira de Almeida[3]
José Jefferson da Silva Nascimento [4]

RESUMO O revestimento asfáltico sofre um processo de envelhecimento e quando este perde as condições de serventia, há possibilidade de o pavimento ser fresado, e então reaproveitado, recebendo o nome de RAP, podendo ser utilizado em novos revestimentos mediante a adição de agentes de rejuvenescimento que devolvam ao material as propriedades viscoelásticas. Esta pesquisa visa avaliar o uso da glicerina como agente rejuvenescedor do RAP, constituindo-se em uma opção real e viável para atuar como precursor de produtos com alto valor agregado. A avaliação do comportamento mecânico foi realizada por meio dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral (RT), módulo de resiliência (MR), dano por umidade induzida (Lottman) e desgaste no ensaio cântabro. Os resultados dos ensaios de RT foram satisfatórios, e superiores ao determinado pela norma em todas as composições. Os resultados para o MR das misturas apresentaram aumento tanto com à adição de RAP (30% RAP e 0% glicerina), como pela adição da glicerina (30% RAP e 4% glicerina, 30% RAP e 6% glicerina) em relação a amostra de referência (0% RAP e 0% glicerina). Os resultados obtidos para cântabro indicam que a adição de glicerina aumenta a perda de massa e os resultados do dano por umidade induzida indicaram um aumento na resistência ao efeito deletério da água.

Palavras-chave: Pavimentação, reciclagem a quente, RAP, agentes rejuvenescedores alternativos.

ABSTRACT The asphalt coating undergoes an aging process and when it loses its usefulness conditions, there is the possibility of the pavement being milled, and then reused, receiving the name RAP, and can be used in new coatings through the addition of rejuvenating agents that restore viscoelastic properties to the material. This research aims to evaluate the use of glycerin as a rejuvenating agent for RAP, constituting a real and viable option to act as a precursor to products with high added value. The evaluation of the mechanical behavior was carried out through tensile strength tests by diametral compression (RT), resilience modulus (MR), induced moisture damage (Lottman) and wear in the cantabro test. The results of the RT tests were satisfactory and higher than those determined by the standard in all compositions. The results for the MR of the mixtures showed an increase both with the addition of RAP (30% RAP and 0% glycerin), and with the addition of glycerin (30% RAP and 4% glycerin, 30% RAP and 6% glycerin) in relation to reference sample (0% RAP and 0% glycerin). The results obtained for cantabrim indicate that the addition of glycerin increases mass loss and the results of induced moisture damage indicated an increase in resistance to the deleterious effect of water.

Keywords: Paving, hot recycling, RAP, alternative rejuvenating agents.

DOI: 10.61223/coopex.v15i01.782

[1] ORCID: 0009-0001-0615-2254; Engenheira Civil; Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Aprigio Veloso, 882, 58429-220, Bodocongó, Campina Grande, Paraíba, Brasil; engbrunathalita@gmail.com
[2] ORCID: 0009-0006-5959-7026; Engenheira Mecânica; Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Aprigio Veloso, 882, 58429-220, Campina Grande, Paraíba, Brasil; biancathamires1@gmail.com
[3] Aluno especial do Doutorado no Programa de Pós Graduação em Engenharia de Processos. E-mail: flavioalmeida@fiponline.edu.br
[4] Doutor em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal da Paraíba. Atualmente é PROFESOR TITULAR da Universidade Federal de Campina Grande e também docente e orientador de Doutorado no Programa de pós graduação em Engenharia de Processos. E-mail: jose.jefferson@professor.ufcg.edu.br

INTRODUÇÃO

O pavimento asfáltico é construído para ter determinada vida útil em projeto, levando em consideração que entre outras estruturas de engenharia, é o que apresenta a menor longevidade. Diante disto, sem as devidas manutenções, o mesmo sofre deterioração progressiva, perdendo suas propriedades iniciais e tornando-se duro e quebradiço. Segundo Tonial (2009) o processo de envelhecimento do ligante, sendo ele de origem natural (Cimento Asfáltico Natural – CAN) ou de refinarias (Cimento Asfáltico de Petróleo – CAP), decorre da influência de vários fatores, mas principalmente da temperatura (na usinagem, compactação e vida útil), exposição ao ar (ação do oxigênio) e da sua superfície específica.

A reparação do pavimento por meio de recapeamentos não é viável após certa quantidade de camadas aplicadas e a entre as opções existentes de manutenção a melhor alternativa é a remoção da camada e a sua substituição com um novo revestimento (REIS, 2013). O método mais empregado na remoção desse pavimento antigo é a fresagem, que gera, como resíduo, o material fresado (ZANETTE *et al*, 2016). A reutilização desse material consiste em transformar um pavimento deteriorado em uma estrutura homogênea, dimensionada para receber os esforços do tráfego. Essa reciclagem pode ser a quente ou a frio, no local ou em usina, uma vez que é utilizado todo ou parcialmente os materiais do pavimento existente, diminuindo a quantidade de resíduos gerados (BOHN, 2017).

A vantagem do uso do RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*) nas misturas asfálticas ocorre em função do reaproveitamento do ligante e agregados, sendo este um material envelhecido, mas que constitui uma matéria prima com menor custo (SEGUNDO *et al*., 2016). Nos últimos anos, houve um aumento da reciclagem com enfoque na inclusão de uma maior quantidade de RAP na mistura (ANTUNES, NEVES, FREIRE, 2023; FAN et al., 2023; JING et al., 2023; KEYMANESH et al., 2023). Contudo, de acordo com Gennesseaux (2015) além da heterogeneidade, o aquecimento do RAP para reciclagem em taxas acima de 25% de fresado, é motivo de limitações para o seu uso, pois influencia na perda da durabilidade da mistura asfáltica final. Para taxas elevadas de RAP é necessário o aquecimento dos agregados novos para que transmita o calor ao material fresado e ao asfalto envelhecido, para que assim seja remobilizado. Quanto maior o teor de RAP mais alta será a temperatura a ser empregada, e este fato causa danos de envelhecimento aos materiais virgens, além de provocar um elevado consumo energético para conseguir chegar a essas temperaturas e altos níveis de emissões de gases do efeito estufa (CANCHANYA, 2017).

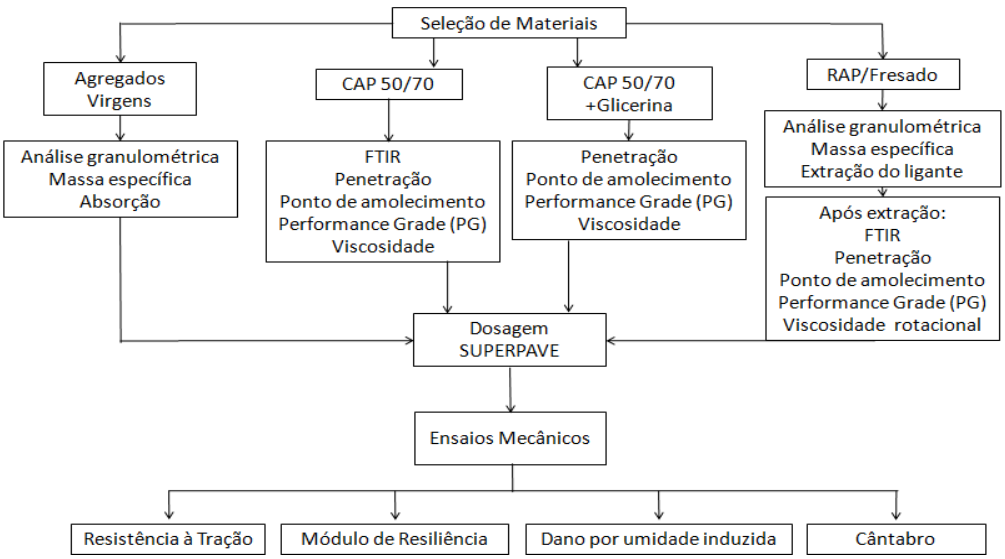
O reestabelecimento de parte das propriedades viscoelásticas do ligante envelhecido pode ser possível adicionando na mistura com RAP agentes rejuvenescedores. Agentes alternativos (óleo de cozinha, óleo de motor, graxa vegetal, óleo de algodão) vêm sendo testados para proporcionar este efeito, figurando uma solução econômica e eficaz relacionada ao reaproveitamento de resíduos de processos industriais e comerciais (OSMARI, 2016). No entanto, materiais não-oleosos também estão sendo avaliados como agentes rejuvenescedores, a exemplo do glicerol, um composto orgânico de função álcool, coproduto da indústria do biodiesel, cujo nome comercial é glicerina (acima de 95% de pureza). Já existe uma patente publicada por Davis *et al*. (2012) demonstrando a utilização de glicerol em misturas com alto teor de materiais betuminosos reciclados.

Nesse contexto, o principal objetivo deste trabalho é avaliar o uso da glicerina como agente rejuvenescedor do RAP, em misturas contendo 0% de RAP e 0% de glicerina, e misturas contendo 30% de RAP, com 4% e 6% de glicerina. A avaliação do comportamento mecânico foi realizada por meio dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral (RT), módulo de resiliência (MR), dano por umidade induzida (Lottman) e desgaste no ensaio cântabro.

1 MATERIAIS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Para demonstração deste estudo, um protocolo foi definido, conforme o fluxograma da Figura 1, apresentando o esquema das etapas desenvolvidas.

Figura 1 – Fluxograma das etapas de realização desta pesquisa



Cada corpo de prova, exceto a amostra de referência, é composto de 30% de material fresado, e há 2 amostras, uma com 4% e outra com 6% de glicerina que foi inserida junto ao ligante virgem CAP 50-70. A Tabela 1 apresenta as nomenclaturas das misturas moldadas.

Tabela 1 – Composição das amostras

Nomenclatura da amostra	**Composição**
AREF	0% RAP + 0% glicerina
ARAP30+0G	30% RAP + 0% glicerina
ARAP30+4G	30% RAP + 4% glicerina
ARAP30+6G	30% RAP + 6% glicerina

1.1 Materiais

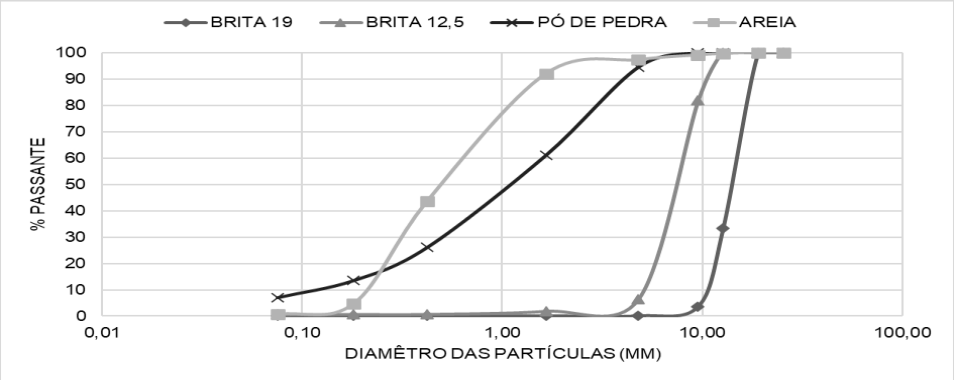
1.1.1 Agregados

Na Tabela 2 pode ser observada as propriedades físicas dos agregados, e na Figura 2 as distribuições granulométricas. O fíler utilizado foi a Cal hidratada CH-1.

Tabela 2 – Caracterização física dos agregados

Ensaio	**Norma**	**Resultados**			
		Brita 19,0 mm	Brita 12,5 mm	Pó de pedra	Areia
Massa específica real (g/cm³)	DNIT 411/2019 DNIT 413/2019	2,668	2,665	2,513	2,626
Massa específica aparente (g/cm³)		2,636	2,616	2,475	2,481
Absorção (%)		0,460	0,706	0,600	0,140
Equivalente areia (%)	DNIT 054/1997	-	-	65	61
Índice de forma	DNIT 086/1994	0,89	0,70	-	-
Abrasão Los Angeles (%)	DNIT 035/1998	19,0	-	-	-

Figura 2 – Distribuição granulométrica



1.1.2 Aglutinante

O ligante virgem utilizado nessa pesquisa foi o 50/70, em que teve suas características determinadas em laboratório, conforme mostra a Tabela 3, onde também estão descritos a caracterização reológica do ligante recuperado.

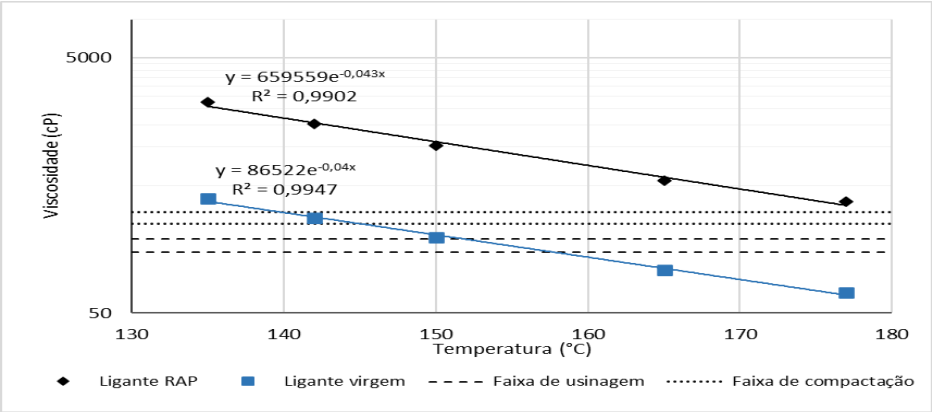
Tabela 3 – Caracterização dos ligantes recuperado e virgem

Ensaio	**Resultado**		
	Ligante Recuperado	Ligante virgem	
		Antes RTFO	Após RTFO
Penetração (mm^{-1}) DNIT 155/10 - ME	16,0	57	33
Penetração retida (%)	-	58,4	
Variação de massa (%)	-	0,4	
Ponto de amolecimento (°C) DNIT 131/10 - ME	71	52	58
Índice de Susceptibilidade térmica	0,54	-0,38	-
Performance Grade (°C) ASTM D6816/11	106	64	-

Viscosidade (cP) NBR 15184/05	**135°C**	2250	395,0	716,0
	142°C	1521	279,3	523,3
	150°C	1030	195,5	408,5
	165°C	550	108,7	131,7
	177°C	372,5	72,0	98,8

De acordo com o NCHRP Report 648 (2010), as temperaturas de usinagem e compactação de misturas asfálticas estão entre as faixas de viscosidade de 170±20 cP e 280±30 cP, no entanto observa-se por meio da Figura 3 que uma temperatura não pode ser determinada para o ligante do RAP.

Figura 3 – Curvas viscosidade versus temperatura para os ligantes virgem e recuperado do RAP



Com isso, as temperaturas de usinagem e compactação do ligante do RAP foi realizada com a equação 1 desenvolvida por Wu *et al.* (2007), apresentadas na Tabela 4, com os valores obtidos no gráfico da Figura 3 para a mistura de referência.

$$lnT_b = W^{0,5} lnT_r + (1 - W^{0,5}) lnT_f \qquad \text{(equação1)}$$

Onde,

T_b é a temperatura ótima relevante da mistura de ligantes;

T_r é a temperatura ótima relevante do ligante do RAP;

T_f é a temperatura ótima relevante do ligante virgem;

W é o teor de RAP na mistura.

Tabela 4 - Temperaturas de usinagem e compactação das misturas de referência e com RAP

Temperatura	**AREF**	**ARAP30**	**Variação tolerável**
Usinagem (°C)	156	175	±3°C
Compactação (°C)	143	163	±3°C

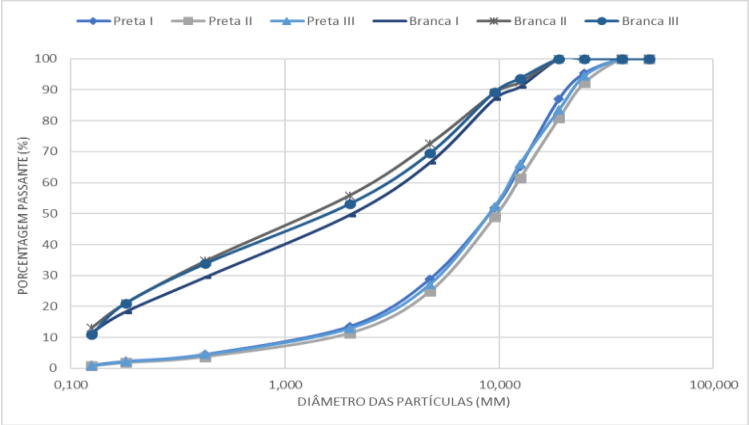
2.1.3 RAP

A determinação da massa específica máxima medida (Gmm) foi realizada com duas amostras, apresentando um valor médio de 2,3g/cm^3 (Tabela 5), em que também está apresentado o teor de ligante determinado após a extração do ligante. Para a extração do ligante do material fresado foi utilizado um extrator de betume do tipo Rotarex, sendo o solvente o tricloroetileno, conforme o procedimento especificado pela norma DNIT-ME 053/1994. Para caracterização granulométrica separaram-se três amostras do material reciclado, onde a análise foi realizada antes (granulometria preta) e após a extração do ligante (granulometria branca), apresentadas na Figura 4.

Tabela 5 – Massa específica máxima medida e teor do ligante

Parâmetro ensaiado		**Norma**	**Amostra**	
			I	II
Massa específica máxima medida (g/cm³)	G_{mmRAP}	AASHTO T 209 2012	2,3	2,3
Teor de ligante (%)	Pb_{RAP}	DNIT-ME 083/98	4,4	

Figura 4 – Granulometria do RAP antes e após extração do ligante



De acordo com a Figura 4, observa-se que as curvas granulométricas são bastantes semelhantes umas às outras, o que permite o enquadramento na faixa I da norma DNIT 035/2018 – microrrevestimento para rodovias com médio volume de tráfego, todavia o teor de ligante especificado pela norma variaria entre 7,5 e 13%, enquanto o obtido foi 4,4%.

Para a realização da caracterização do ligante do RAP, a solução de ligante dissolvida em tricloroetileno foi submetida à rotoevaporação. O equipamento utilizado foi o Rotavapor R-300 Buchi, com bomba de vácuo V-300 e Interface I-30. O balão rotativo foi parcialmente imerso em banho aquecido a 60ºC, até que não houvesse mais condensação de tricloroetileno e, em seguida, a amostra recuperada foi submetida ao vácuo por 5 horas, com temperatura entre 80ºC e 85ºC.

Após o procedimento de recuperação do ligante foi realizado o procedimento de RTFO (*Rolling ThinFilmOven*), para que, caso houvesse solvente residual, fosse removido. Para a avaliação da efetividade do procedimento de recuperação do ligante, foram obtidas 3 amostras representativas:

(i) após a extração no rotarex;

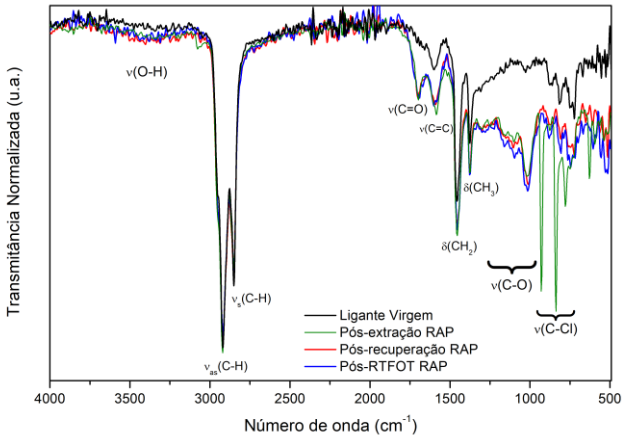
(ii) após a rotoevaporação e estufa a vácuo;

(iii) após o RTFO.

Essas amostras, juntamente com uma amostra de ligante virgem (50/70), foram submetidas ao ensaio de Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR), com o Espectrômetro Bruker Vertex 70, sonda ATR, e faixa de 4000 a 500 cm^{-1}, verificando assim o estado de envelhecimento e a remoção do ligante.

Observa-se no espectro apresentado na Figura 7 que a amostra (i) apresenta picos de transmitância em 780, 845 e 930 cm^{-1}, relativos as ligações C-Cl do solvente. Ao verificar na amostra (ii) que esses picos referentes ao tricloroetileno não são transmitidos, assim como na amostra (iii), pode-se concluir que o método de recuperação do ligante utilizado foi suficiente para retirada do solvente.

Figura 5–Espectro FTIR das amostras



Na Figura 7 ainda é possível observar a presença de picos de hidroxila (O-H) na faixa de transmitância superior a 3000 cm^{-1} (banda leve), de carbonilas de cetonas (C=O) em torno de 1700 cm^{-1} e picos para estiramento simétrico de C-O em éteres e/ou álcoois na faixa entre 1020 e 1300 cm^{-1}, o que indica uma alta oxidação do ligante do RAP em relação ao ligante virgem 50/70.

2.1.4 Glicerina

A glicerina foi selecionada como agente rejuvenescedor a fim de se obter melhorias na trabalhabilidade, durabilidade e resistência. Esta foi adquirida em sua forma líquida, com 99% de pureza.

2.2 Métodos

2.2.1 Mistura do Ligante com a Glicerina

No processo de mistura do ligante a glicerina, foi utilizado um agitador mecânico FISATOM. Ao ligante CAP 50/70 adicionou-se a glicerina no teor máximo utilizado por Davis *et al*. (2014) que é 4% do peso do ligante, e o teor de 6% também foi analisado, por ser um teor que fosse possível observar as mudanças nas misturas sem ser muito próximo do valor de 4%, ou muito distante podendo ter uma mudança brusca em seu comportamento.

A produção do ligante modificado foi baseada em método realizado por Cavalcante (2016), onde o procedimento de mistura do ligante com glicerina iniciou-se com uma temperatura de 130ºC sendo mantida constante, onde gradativamente o teor de glicerina foi incorporado ao ligante, a uma velocidade de 500 rpm no misturador mecânico, por um tempo de mistura de 20 minutos.

2.2.2 Dosagem SUPERPAVE

As misturas foram dosadas segundo a metodologia SUPERPAVE, para nível de tráfego médio e alto, sendo a faixa adotada de revestimento, faixa C do DNIT – ES 031/2006.

Para a amostra de referência AREF foram realizadas três composições granulométricas que correspondem às curvas inferior, intermediária e superior, nos limites da faixa C do DNIT, conforme pode ser observado na Figura 6. Os corpos de prova com o teor de ligante estimado de 6% para as curvas, com os números de giro $N_{inicial}$ (8 giros), $N_{projeto}$ (100 giros) e $N_{máximo}$ (160 giros), compactados em Compactador Giratório SUPERPAVE (CGS), seguindo a norma ASTM D 6925-09. Os parâmetros calculados para a escolha da melhor curva, que foi a intermediária por ser a que mais aproximou dos parâmetros SUPERPAVE, estão apresentados na Tabela 6.

Figura 6 – Curvas granulométricas superior, intermediária e inferior da amostra de referência

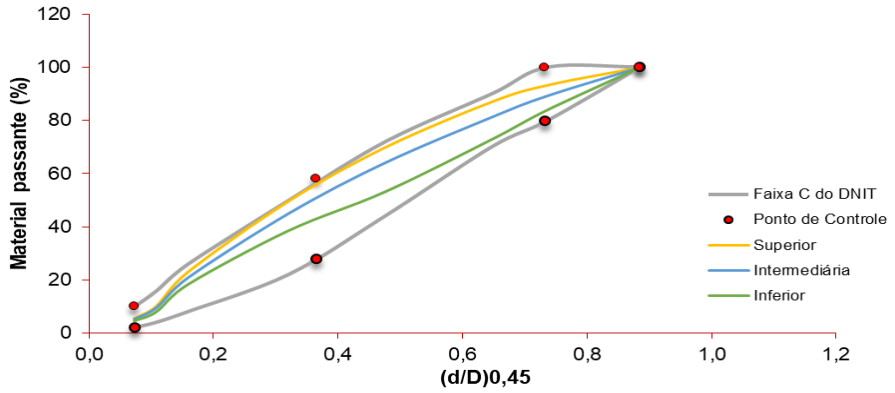


Tabela 6 – Parâmetros volumétricos das curvas superior, intermediária e inferior da amostra de referência

Curva	Teor de ligante (%)	%Gmm			VAM (%)	Vv (%)
		@$N_{inicial}$	@$N_{projeto}$	@$N_{máximo}$		
Inferior	6,0	93,2	98,2	99,1	15,90	1,77
Intermediária	6,0	88,6	96,2	98,3	16,31	3,72
Superior	6,0	89,4	95,1	96,4	17,14	4,8
Critérios SUPERPAVE		<89,0	96,0	<98,0	≥13,0	4,0

As amostras contendo 30% de RAP (ARAP30+0G), 30% de RAP e 4% de glicerina (ARAP30+4G) e 30% de RAP e 6% de glicerina (ARAP30+6G) foram projetadas para que apresentassem composições parecidas com a curva escolhida da amostra de referência. Os percentuais dos materiais nas misturas estão apresentados na Tabela 7, bem como as distribuições granulométricas finais na Figura 7 e os teores e parâmetros volumétricos na Tabela 8.

Tabela 7 – Percentuais finais dos materiais nas misturas

Mistura	RAP (%)	Brita 19,0 mm (%)	Brita 12,5 mm (%)	Pó de Pedra (%)	Areia (%)	Fíller (%)
AREF	0	15,0	17,0	49,0	11,3	1,9
ARAP30+0G	30	13,2	13,2	28,3	9,4	1,9
ARAP30+4G	30	13,1	13,1	28	9,3	1,9
ARAP30+6G	30	13,3	13,3	28,4	9,5	1,9

Figura 7 – Curvas granulométricas finais das amostras de referência e com RAP e glicerina

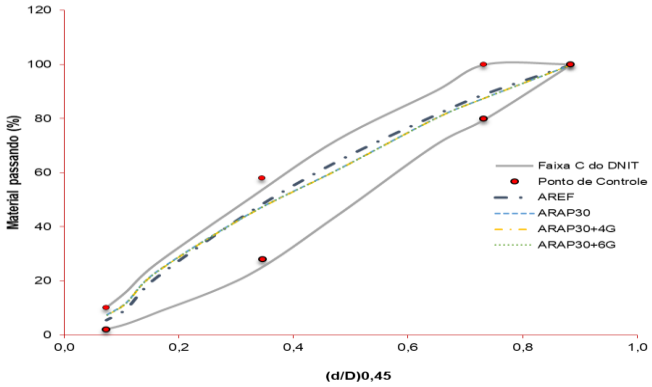


Tabela 8 – Parâmetros volumétricos finais das misturas

Mistura	Teor de ligante		%Gmm	VAM	Vv	RBV	P/A
	Total	Virgem	@$N_{projeto}$	(%)	(%)	(%)	
AREF	5,8	5,8	96,5	19,72	3,9	67,17	0,9
ARAP30+0G	5,3	4,0	96,3	18,02	4,2	64,98	1,2
ARAP30+4G	5,6	4,3	96,0	16,73	4,0	74,10	1,1
ARAP30+6G	5,0	3,7	96,0	15,46	4,0	74,31	1,2
Critérios SUPERPAVE			96,0	≥13,0	4,0	65-75	0,6-1,2

Ao moldar os corpos de prova, foram medidos os parâmetros volumétricos (massa seca, massa submersa e massa saturada superfície seca) para obtenção do melhor teor, sendo o mais próximo do volume de vazios de 4%. As misturas com RAP apresentaram um menor teor de ligante total, podendo ser associada aos agregados da mistura já estarem envoltos com o ligante envelhecido, necessitando assim de uma menor quantidade. Durante a usinagem, o ligante com teor de 4% de glicerina apresentava formação de vapores maior que as demais misturas, o que pode indicar a volatilização da glicerina, evidenciado um maior teor de ligante.

2.2.3 Penetração

O ensaio de penetração foi realizado conforme norma DNIT-ME 155/2010, onde é medida a profundidade, em décimos de milímetros, que uma agulha de massa de 100g, penetra verticalmente, durante 5 segundos, a amostra de ligante numa temperatura de 25ºC. Em cada ensaio foram realizadas 6 medições, sendo descartada a maior e realizando a média das 5 restantes.

2.2.4 Ponto de Amolecimento

O ponto de amolecimento do ligante asfáltico foi realizado de acordo com a norma DNIT-ME 131/2010, sendo este método conhecido como “anel e bola”. O ensaio constitui de uma amostra do ligante em um molde de um anel de latão, onde é suspenso em um banho de água destilada, com temperatura controlada, e uma esfera de aço é colocada sobre o anel. O conjunto é aquecido até que o peso da esfera se desloque junto com a amostra amolecida até tocar numa placa, que fica a 25,4mm, sendo medida a temperatura neste ponto.

2.2.5 Performance Grade (PG)

O ensaio de PG seguiu as instruções da norma ASTM D6816/11, realizada com um reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR), verificando o parâmetro G*/senδ de acordo com a variação de temperatura, iniciando com 46ºC, aumento de 6ºC em 6ºC, sendo o valor do PG dado pela temperatura anterior a falha observada no reômetro. As amostras utilizadas nesse teste foram de ligantes asfálticos puros e modificados por adição da glicerina.

2.2.6 Viscosidade Rotacional

Para determinação da viscosidade rotacional foi utilizado o viscosímetro rotacional Brookfield, realizado conforme a norma NBR 15184/2005. A execução do ensaio constitui de 8 gramas de ligante dentro de uma cubeta, cuja cubeta está inserida em um cilindro (spindle). Foi realizado um torque com uma haste interligada ao cilindro e então o ligante foi aquecido

em temperaturas pré-estabelecidas na norma, de 135ºC, 142ºC, 150ºC, 165ºC e 177ºC. O viscosímetro utilizado foi o modelo DV-III ULTRA, ligado a um controlador de temperatura.

2.2.7 Ensaios Mecânicos

Nesta pesquisa o comportamento mecânico das misturas foi analisado com a realização de ensaios de laboratório, sendo eles, resistência à tração por compressão diametral, módulo de resiliência, cântabro e dano por umidade induzida, conforme normas apresentadas nos próximos tópicos.

2.2.7.1 Resistência a Tração por Compressão Diametral

A resistência a tração por compressão diametral (RT) foi realizada de acordo com a norma do DNIT 136/2010. Para a amostra de referência e para cada teor de glicerina (0%, 4% e 6%), foram moldados corpos de prova com volume de vazios de 4%. Logo após, com uma prensa mecânica, uma carga vertical de compressão, com uma velocidade de 0,8±0,1 mm/s, foi aplicada, gerando uma tensão de tração no plano perpendicular ao diâmetro, até o corpo de prova se romper, sendo a resistência a tração calculada por:

$$\sigma_t = \frac{2F}{\pi DH} \qquad \text{(equação 2)}$$

Onde,

σ_t é a resistência à tração;

F é a carga de ruptura;

D é o diâmetro do corpo de prova;

H é a altura do corpo de prova.

2.2.7.2 Módulo de Resiliência

O ensaio do módulo de resiliência para as misturas estudadas foi realizado conforme a NBR 16018/2011 na prensa hidráulica UTM-25 (*Universal testing machine*), da IPC Global, onde há a aplicação de pulso de cargas com frequência de 1Hz, no plano diametral vertical do corpo de prova. Dois LVDTs (*Linear Variable Differential Transformers*) mediram o deslocamento diametral recuperável. A força aplicada foi correspondente a 10% da resistência à tração e foram ensaiados dois corpos de prova por mistura.

2.2.7.3 Cântabro

Para análise da perda de massa foi realizado o ensaio de cântabro, que consistiu na análise de 3 amostras de cada mistura submetidas ao aparelho de abrasão Los Angeles, sem esferas metálicas, à 300 revoluções, onde é normatizado através da DNIT – ME 383/1999. O desgaste da mistura é calculado pela média dos valores dos corpos de prova, mediante o emprego da Equação 3:

$$A = \frac{P-P'}{P} x100 \qquad \text{(equação 3)}$$

Onde:

A – desgaste da mistura betuminosa;

P – peso do corpo de prova, antes do ensaio;

P' – peso do corpo de prova após o ensaio.

2.2.7.4 Dano por Umidade Induzida (Lottman)

A avaliação do dano por umidade induzida das misturas asfálticas conforme a norma DNIT – ME 180/2018 é realizada por meio de um procedimento de verificação da sensibilidade à água de corpos de prova das misturas, moldados em laboratório, avaliando-se a adesividade agregado-ligante em condições resultantes de saturação e de condicionamento acelerado em presença de água. O comprometimento das propriedades mecânicas se refere à relação entre a resistência à tração das amostras condicionadas e a resistência à tração das amostras em condições normais.

Para a amostra de referência e para cada teor de glicerina (0, 4 e 6%), foram moldados seis corpos de prova, divididos em dois grupos de 3 amostras. Em um grupo as amostras foram parcialmente saturadas e submetidas à temperatura de -18±3,0ºC para congelamento, por um período mínimo de 16h, simulando assim a presença de água na mistura e induzindo a tensões internas. Logo após as amostras foram levadas a um banho aquecidas a 60 ºC, por 24h e depois a temperatura de 25ºC, e então submetidas ao ensaio de resistência à tração (RT'). O outro grupo de amostras que não foram submetidas à saturação e congelamento foram levadas também ao ensaio de RT. A relação entre RT'/RT deve ser maior ou igual a 0,70, indicando a perda de resistência por umidade induzida.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Caracterização do Ligante Modificado

A Tabela 9 apresenta os valores de penetração, ponto de amolecimento, PG e viscosidade do ligante virgem e modificado com os teores de 4% e 6% de glicerina.

Tabela 9 – Caracterização dos ligantes

Ensaio	**Resultado**			
		Ligante Virgem	Ligante Modificado	
			4%Glicerina	6%Glicerina
Penetração (mm^{-1}) **DNIT 155/10 - ME**		57	53	52
Ponto de amolecimento (°C) **DNIT 131/10 - ME**		52	52	52
Performance Grade (°C) **ASTM D6816/11**		64	64	64
Viscosidade (cP) **NBR 15184/05**	**135°C**	395,0	410,0	428,7
	142°C	279,3	290,0	302,1
	150°C	195,5	202,0	209,0
	165°C	108,7	109,3	113,7
	177°C	72,0	71,0	73,5

A adição da glicerina promoveu a redução na penetração do ligante virgem (CAP 50/70), o que indica um aumento da rigidez do CAP modificado na temperatura de 25ºC, sendo verificada essa redução de 7% e 9% nos teores de 4% e 6% de glicerina respectivamente, apresentando ainda valores dentro do especificado pela norma DNIT-ME 095/06 (50 a 70 a 25ºC).

Com a redução da penetração e aumento da viscosidade era esperada uma mudança no ponto de amolecimento, porém o valor não foi alterado, bem como o resultado de PG se manteve o mesmo para os dois teores de glicerina.

O objetivo da adição do agente rejuvenescedor é reduzir à viscosidade do ligante, diminuindo consequentemente a rigidez da amostra final, demonstrando que a glicerina pode não ter o efeito de rejuvenescimento esperado. O gráfico da Figura 8 apresenta a curva de viscosidade *versus* temperatura dos ligantes modificados com a glicerina nos teores estudados.

De forma semelhante, as temperaturas de usinagem e compactação suportadas pelo ligante com 4% de glicerina são de 154°C e 142°C, respectivamente, e as suportadas pelo ligante com 6% de glicerina são 155°C e 143°C, respectivamente. Quando combinadas com as temperaturas do ligante do RAP, apresentadas na Figura 8, por meio da Equação 1, são determinadas as temperaturas de usinagem e compactação das misturas apresentadas na Tabela 10.

Figura 8 – Resultados do ensaio de viscosidade

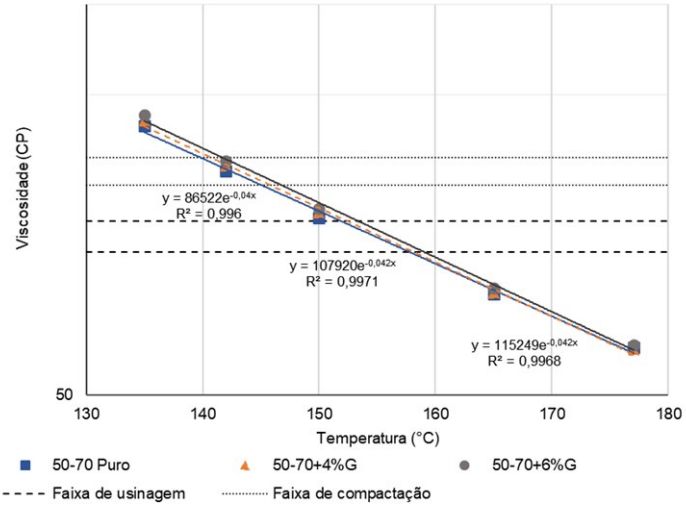


Tabela 10 – Temperaturas de usinagem e compactação das misturas.

Temperatura	**AREF**	**ARAP30**	**ARAP30+4G**	**ARAP30+6G**	**Variação tolerável**
Usinagem (°C)	156	175	174	174	±3°C
Compactação (°C)	143	163	162	163	±3°C

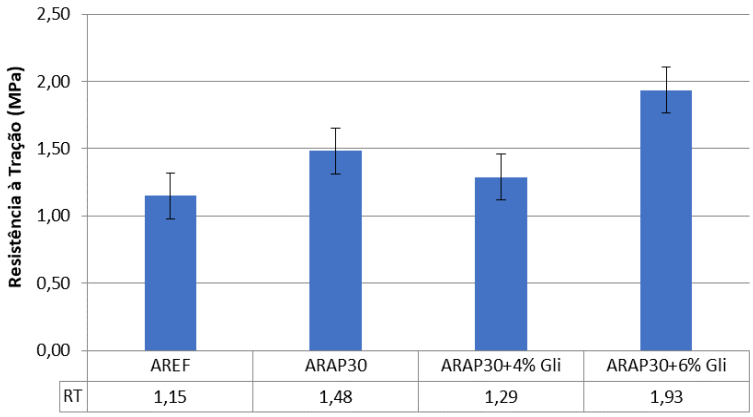
Verifica-se ainda que à medida que a temperatura aumenta a variação de viscosidade entre as amostras diminui. Silva (2011) analisou os efeitos de quatro agentes

rejuvenescedores, sendo três a base de óleo de xisto e um a base de alcatrão, podendo observar que a altas temperaturas as viscosidades tendem a um mesmo valor independente de qual é o agente rejuvenescedor utilizado.

3.2 Resistência à Tração por Compressão Diametral

A Figura 9 apresenta os resultados do ensaio de Resistência à Tração encontrados para a média dos corpos de provas analisados. Observa-se que os valores de RT atenderam ao limite mínimo preconizado pela norma do DNIT – ME 031/2006, que é de 0,65 MPa (a 25ºC) em misturas destinadas a camadas de rolamento.

Figura 9 – Resultados do ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral



A Figura 9 mostra um aumento da resistência quando se adiciona o RAP, em relação a amostra de referência, para ARAP30 há um aumento de 28,7%, de 12,2% para a amostra com 4% de glicerina, e um aumento de 67,8% na mistura com 6% de glicerina.

Ao analisar os efeitos da glicerina como agente rejuvenescedor das amostras, é possível observar que após a sua adição com o teor de 4% aproximou do valor da amostra de referência, ou seja, o RAP tornou a mistura mais rígida, porém o efeito da glicerina ao ligante pode ter comprometido a coesão dos componentes da mistura, resultando nessa redução. Avaliando a amostra com 6% de teor de glicerina pode-se afirmar que houve um aumento significativo na resistência, demonstrando aumento da rigidez nessa amostra.

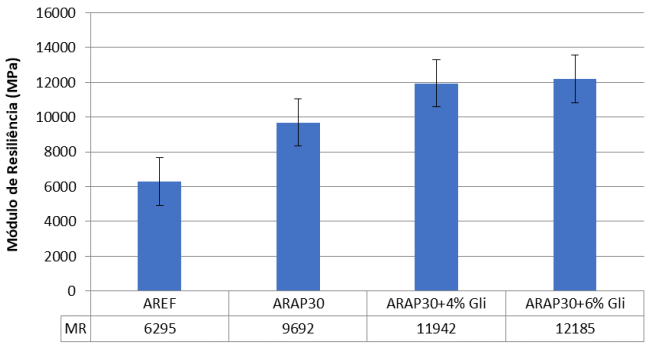
Em Zanette *et al*. (2016) o estudo com o uso de 30% do agente rejuvenescedor AR-5 (produzido a partir do xisto processado) em misturas com 100% de RAP, demonstraram no ensaio de resistência a tração a obtenção de um valor médio de 1,152 MPa. O corpo de prova coletado em campo (mesmo material do RAP), sem adição de agente rejuvenescedor,

apresentou um valor médio de 0,580, ou seja, o uso do agente apresentou um acréscimo de 99%, e além disso, a mistura rejuvenescida também atende ao valor de resistência à tração mínimo exigido pela norma.

3.3 Módulo de Resiliência

A Figura 10 apresenta os valores de MR para cada uma das misturas, a temperatura de 25ºC, referentes a 10% da carga de RT.

Figura 10 – Módulo de Resiliência



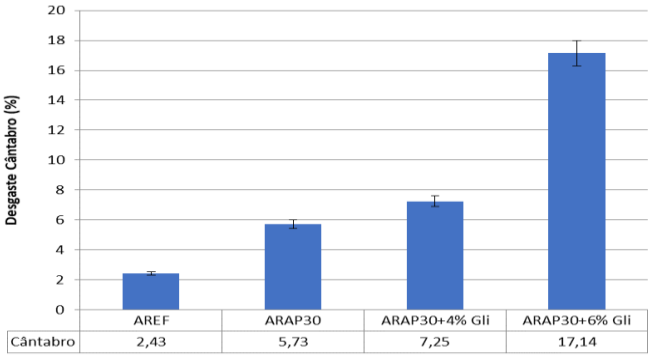
Observa-se que a influência do RAP aumenta a rigidez das misturas, bem como a glicerina. Assim como no ensaio de resistência a tração, o módulo de resiliência aumentou com o teor de RAP. A glicerina também aumentou a rigidez, no entanto entre os teores de 4 e 6% não houve diferença significativa, tal aumento pode ser associado a perda de voláteis devido a presença da glicerina, não influenciando tanto de um teor para outro. A presença do RAP aumentou em 35% a rigidez em relação a amostra de referência, e a glicerina aumentou em 19% e 20% nos teores de 4% e 6% respectivamente, em relação a amostra com 0% de glicerina.

O objetivo da adição do agente rejuvenescedor é reduzir a viscosidade do ligante, diminuindo consequentemente o valor de MR. A glicerina aumentou a viscosidade influenciando diretamente na rigidez das amostras estudadas.

3.4 Cântabro

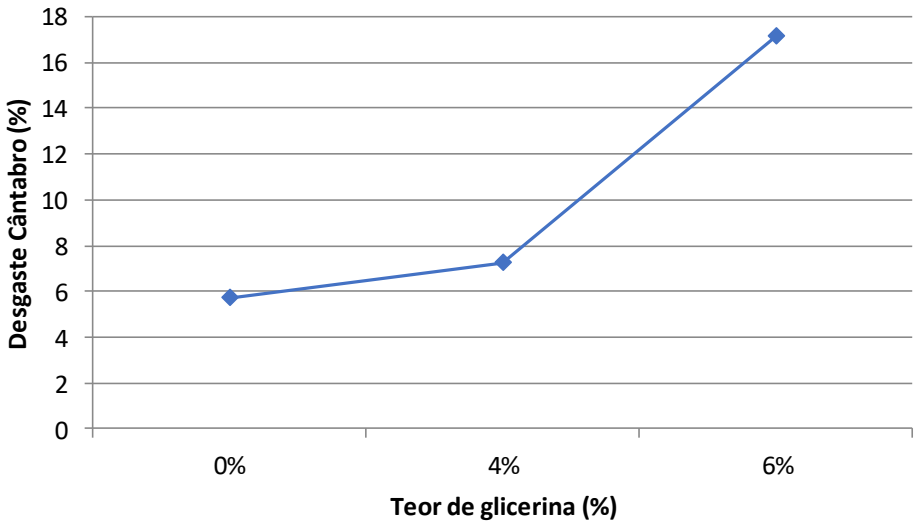
A Figura 11 ilustra os resultados do ensaio de resistência ao desgaste por perda de massa Cântabro.

Figura 11 – Desgaste Cântabro



Nota-se que ao adicionar material fresado, a perda de massa pelo desgaste físico aumenta e, conforme aumenta o teor de glicerina esta perda se intensifica. A glicerina aumenta a tendência ao desgaste, causada pela perda da abrasão que está ligada diretamente a redução da rigidez do ligante modificado, como observada essa redução pelo aumento da penetração e da viscosidade. No entanto, o desgaste por abrasão final apresenta valores individuais inferiores a 20% das médias, seguindo a norma DNIT-ME 383/99. A Figura 12 apresenta os resultados em função do teor de glicerina.

Figura 12 – Resultado do ensaio de perda de massa em função do teor de glicerina



Quanto maior o teor de glicerina na mistura, menor o teor de ligante efetivo na amostra, e menor poder cimentante, diminuindo assim a compatibilidade entre ligante e agregados. A Figura 13 mostra os corpos de prova antes e após o ensaio.

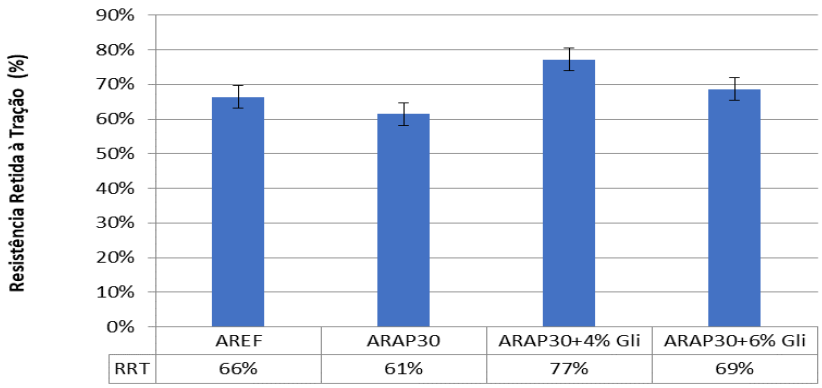
Figura 13- Corpos de prova (a) antes e (b) após o ensaio Cântabro

(a) (b)

3.5 Dano por Umidade Induzida (*Lottman*)

A Figura 14 apresenta os valores médios obtidos da resistência à tração retida das misturas asfálticas estudadas.

Figura 14 – Resultados do dano por umidade induzida



A especificação de serviço DNIT 031/2006 estabelece que para concretos asfálticos o RRT mínimo deva ser de 70%, onde podemos observar que as amostras com glicerina apresentaram sensibilidade a umidade maior que as demais misturas, sendo com o teor de 4% de glicerina, 77%, e o teor de 6%, 69%.

Não houve diferença significativa entre a amostra de referência e a inserção do RAP, demonstrando que o RAP não influencia na resistência a ação deletéria da água. No entanto, os resultados obtidos da amostra com RAP e a adição de glicerina podem ser atribuídos a um ganho de adesão entre a superfície do agregado e o ligante asfáltico na presença de umidade.

4 CONCLUSÕES

A partir dos resultados analisados foi possível concluir que: na caracterização dos ligantes, a penetração apresentou uma redução e a viscosidade um aumento à medida que se aumentou o teor de glicerina, indicando um aumento de rigidez da mistura, demonstrando a não possibilidade de diminuição da temperatura de usinagem e compactação da mistura; a adição da glicerina não alterou o ponto de amolecimento e PG das misturas, demonstrando a insensibilidade da mesma nesses parâmetros; a resistência à tração das amostras com a adição de RAP aumenta e é ainda maior com a adição da glicerina, sendo considerados satisfatórios, e superiores ao determinado pela norma.

No entanto, há uma observação a ser levada em consideração na mistura com o teor de 4% de glicerina, onde houve uma aproximação do valor de RT da amostra de referência, significando que a presença de glicerina pode ter comprometido a coesão dos componentes da mistura, nesse teor, ou que houve a volatilização da mesma no processo de usinagem. os resultados para o MR das misturas apresentaram aumento em relação a adição de RAP, e um aumento ainda maior para a adição da glicerina. Esse aumento de rigidez pode estar relacionado ao aumento da viscosidade com a adição da glicerina influenciou diretamente no aumento da rigidez da mistura, ao tempo de mistura da glicerina e os outros componentes da mistura, ocasionando na perda da eficiência da glicerina na recuperação das propriedades reológicas do material reciclado, e ainda ao efeito de uso de Cal como fíler, onde alguns pesquisadores afirmam contribuir para aumento na rigidez do ligante.

Os resultados obtidos para cântabro indicam que a adição de glicerina aumenta a perda de massa, porém não chega a um limite que possa condenar as misturas, visto que atendem aos requisitos estabelecidos por norma, ou que ainda merece uma atenção no processo de dosagem, bem como em relação ao dano por umidade induzida, onde foi possível observar um aumento na resistência ao efeito deletério da água com a glicerina, estando apenas a amostra com teor de 4% de glicerina acima do limite especificado em norma.

Podemos inferir que o RAP possui um alto potencial na redução de consumo de asfalto, com suas contribuições, tendo aumentado a RT, o MR, pouco aumento no desgaste cântabro e pouca diminuição no dano por umidade induzida, conforme verificado na pesquisa. Por fim, ao avaliar os quatro parâmetros conjuntamente (RT, MR, cântabro e dano por umidade induzida), concluiu-se que a mistura com o teor de 4% de glicerina apresentou um melhor comportamento mecânico, quando comparada as demais misturas. Portanto, a glicerina não é um material adequado para utilização em rejuvenescimento, mas pode ser utilizada com a finalidade de agente corretivo da trabalhabilidade, agindo como agente tenso ativo, reduzindo o atrito na interface dos agregados, e para promoção de aumento a resistência à tração e resistência a ação deletéria da água de uma mistura contendo RAP.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS – **AASHTO T209. Standard Method of Test for Theoretical Maximum Specific Gravity (Gmm) and Density of Asphalt Mixtures**. 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – **ASTM D6816 – Standard Practice for Determining Low-Temperature Performance Grade (PG) of Asphalt Binders**. Washington. 2011.

_____**ASTM D 6825. StandaRd Test Method for Preparation and Determination of the Relative Density of Asphalt Mix Specimens by Means of the Superpave Gyratory Compactor**. Washington. 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **NBR 15184. Materiais betuminosos — Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional.** Brasília. 2005.

_____**NBR 16018. Misturas asfálticas – Determinação da rigidez por compressão diametral sob carga repetida**. Brasília. 2011.

BOHN, K. A..**Avaliação de misturas asfálticas recicladas mornas com uso de ligantes convencional e modificado por polímero**. 254p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2017.

CAVALCANTE, F. P. **Efeito da adição dos óleos de ricinus communis e Linus usitatissimum nas propriedades reológicas do cimento asfáltico de petróleo puro e modificado.** 301p. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2016.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **DNIT ME 411/2009. Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Massa específica, densidade relativa e absorção de agregado miúdo para misturas asfálticas – Método de Ensaio.** Brasília. 2009.

_____**DNIT ME 413/2019. Pavimentação - Misturas asfálticas – Massa específica, densidade relativa e absorção de agregado graúdo para misturas asfálticas – Método de ensaio**. Brasília. 2019.

_____**DNIT ME 054/1997. Equivalente Areia – Método de ensaio**. Rio de Janeiro. 2019.

_____**DNIT ME 086/1994. Agregado – Determinação do índice de forma – Método de ensaio**. Brasília. 1994.

_____**DNIT ME 035/1998. Agregados - Determinação da abrasão "Los Angeles".** Rio de Janeiro. 1998.

_____**DNIT ME 155/2010. Material asfáltico – Determinação da penetração – Método de ensaio**. Rio de Janeiro. 2010.

_____**DNIT ME 131/2010. Materiais asfálticos – Determinação do ponto de amolecimento – Método do Anel e Bola – Método de ensaio.** Rio de Janeiro. 2010.

_____**DNIT ME 053/1994. Materiais betuminosos – percentagem de betume – Método de ensaio**. Brasília. 1994.

_____**DNIT ME 083/1998. Agregados - análise granulométrica – Método de ensaio**. Rio de Janeiro. 1994.

_____**DNIT ES 035/2018. Pavimentação asfáltica – Microrrevestimento asfáltico – Especificação de serviço**. Rio de Janeiro. 2018.

_____**DNIT ES 031/2006. Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico - Especificação de serviço**. Rio de Janeiro. 2006.

_____**DNIT ME 383/1999. Desgaste por abrasão de misturas betuminosas com asfalto polímero - ensaio Cantabro.** Rio de Janeiro. 1999.

_____**DNIT ME 180/2018. Pavimentação - Misturas asfálticas - Determinação do dano por umidade induzida – Método de ensaio.** Rio de Janeiro. 2018.

_____**DNIT ME 136/2010. Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinaçao da resistência à tração por compressão diametral**. Rio de Janeiro. 2010.

GENNESSEAUX, M. M. L. **Avaliação da durabilidade de misturas asfálticas a quente e mornas contendo material asfáltico fresado**. 195p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

OSMARI, P. H. **Caracterização química, reológica e de morfologia superficial de ligantes asfálticos modificados por diferentes agentes rejuvenescedores**. 133p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

SEGUNDO, I. G. R.; BRANCO, V. T. F. C.; VASCONCELOS, K. L. e HOLANDA, A. S..**Misturas asfálticas recicladas a quente com incorporação de elevado percentual de fresado como alternativa para camada de módulo elevado**. Transportes, v. 24, n. 4, 2016.

SILVA, J. P. S. **Avaliação dos efeitos de produtos rejuvenescedores em misturas asfálticas**. Tese (Doutorado). Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2011.

TONIAL, I. A. **Efeito do tempo de transporte da massa asfáltica sobre o envelhecimento do CAP**. Asfalto em Revista, n. 7, Ano 1, p. 17-19, 2009.

ZANETTE, C. C.; MORENO, K. R. e CARPIO J. A. V**.. Uso do agente rejuvenescedor AR-5 na produção de misturas asfálticas 100% recicladas – resistência a tração**. Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental e Sustentabilidade. Vol. 4, p. 2054-2065, 2016.