

ANÁLISE DO LIGANTE MODIFICADO POR POLÍMERO REATIVO/NÃO-REATIVO E ÁCIDO POLIFÓSFÓRICO NA DEFORMAÇÃO PERMANENTE EM MISTURAS ASFÁLTICAS

Mirtes Aila Rodrigues de Carvalho
Priscila Maria Sousa Gonçalves Luz
Christian Rafael Ziegler
Conrado Cesar Vitorino Pereira da Silva
Daniel Beserra Costa
Jonny Dantas Patrício
Cacildo de Medeiros Brito Cavalcante
John Kennedy Guedes Rodrigues
Universidade Federal de Campina Grande

RESUMO

A deformação permanente é um dos defeitos mais presentes nos pavimentos asfálticos brasileiros, diminuindo o conforto e segurança dos usuários além de provocarem aumento nos custos operacionais. Uma alternativa para melhorar a resistência e durabilidade desses pavimentos é o uso em conjunto de polímeros reativos/não-reativos e ácido polifosfórico nos ligantes asfálticos pois essa combinação pode proporcionar melhores resultados que seu uso individual. O objetivo dessa pesquisa é avaliar a deformação permanente de misturas asfálticas com uso de ligantes modificados por polímero reativo/não-reativo associados ao ácido polifosfórico como catalizador em diferentes teores. Para isso foram realizados os ensaios de Módulo de Resiliência e o ensaio uniaxial de carga repetida. Os resultados mostraram que as misturas asfálticas produzidas com os ligantes modificados são uma boa opção para um revestimento de alta qualidade adequado para uso em regiões com temperaturas elevadas, pois apresentaram maiores resistências à deformação permanente.

Palavras chaves: Ligantes Modificados. Deformação Permanente. Módulo de Resiliência. Flow Number.

ABSTRACT

The permanent deformation is one of the most present defects in Brazilian asphalt pavements, reducing the comfort and safety of users, besides causing an increase in operating costs. An alternative to improve the strength and durability of these floors is the joint use of reactive / non-reactive polymers and polyphosphoric acid in asphalt binders since this combination can provide better results than their individual use. The objective of this research is to evaluate the permanent deformation of asphalt mixtures with the use of binders modified by reactive / non-reactive polymer associated with polyphosphoric acid as catalyst at different levels. For this, the Resilience Module and Flow Number tests were performed. The results showed that the asphalt mixtures produced with the modified binders are a good option for a high-quality coating suitable for use in regions with high temperatures, as they showed higher resistance to permanent deformation.

Key words: Modified Binders. Permanent Deformation. Resilience Module. Flow Number.

1. INTRODUÇÃO

A deformação permanente e o trincamento por fadiga são os tipos de defeitos mais encontrados em pavimentos asfálticos brasileiros. No caso da deformação permanente, o defeito pode ocorrer devido o surgimento de dois fenômenos: (i) a consolidação das camadas do pavimento ou (ii) algum problema relacionado ao projeto ou à execução da mistura asfáltica (ONOFRE, *et al.*, 2013). A deformação permanente nos revestimentos asfálticos pode ser identificada por depressões longitudinais nas trilhas de roda que aumentam com a solicitação das cargas repetidas impostas pelo tráfego de veículos (MAHMOUD & BAHIA, 2004). Em regiões de clima tropical, como o Brasil onde as temperaturas dos pavimentos asfálticos chegam a atingir 60°C, esse defeito é bastante observado. Diante dessa situação, percebe-se a relevância de pesquisas que procurem materiais ou combinações que retardem e/ou amenizem este defeito.

O mecanismo da deformação permanente pode ser enfrentado por meio da mistura asfáltica que apresente a escolha adequada de agregados e da granulometria e a elaboração de um projeto estrutural que limite a atuação das tensões atuantes no subleito a intervalos de valores admissíveis e seguros, além da adição de modificadores no ligante asfáltico que pode aumentar a resistência da mistura asfáltica à deformação permanente (DOMINGOS & FAXINA, 2015). Nessa perspectiva os ligantes asfálticos modificados com polímeros tem sido muito utilizados pela indústria de pavimentos e estes modificadores compreendem desde os antioxidantes e as fibras de poliéster e polipropileno até os conhecidos como a borracha moída de pneu, o copolímero de estireno-butadieno-estireno (SBS) e a borracha de estireno-butadieno (SBR) (GAMA *et al.*, 2016).

Segundo Gama *et al.* (2016) um dos polímeros mais utilizados na modificação de ligantes asfálticos são os referenciados como Terpolímeros Reativos e Etileno (RET) como o POLIMUL S-74 (Metacrilato de Glicidila – GMA). Esses tipos de materiais ao serem adicionados ao ligante asfáltico provocam reações químicas, ao contrário dos polímeros não-reativos, onde a mistura é apenas física. Segundo Jasso *et al.* (2015) quando misturado o polímero reativo com o ligante asfáltico, há evidência de ocorrência de ligações químicas covalentes entre grupos reativos destes polímeros com o ligante asfáltico. Com isso a separação de fase nesse tipo de mistura dificilmente ocorrerá.

Os polímeros não reativos são a segunda principal categoria de polímeros mais utilizados para modificação do ligante asfáltico (POLACCO *et al.*, 2015). Neste grupo existem os polímeros termoplásticos como o polietileno (PE), polipropileno (PP), polietileno de alta densidade (HDPE) e polietileno de baixa densidade linear (LLDPE) que são conhecidos por seu baixo custo quando comparado aos polímeros elastômeros termoplásticos e podem ser utilizados como modificador ligante asfáltico de forma individual ou como co-modificador (POLACCO *et al.*, 2005). Estes materiais propiciam um aumento da rigidez, podendo resultar em maior resistência a deformação permanente, mas, seu uso como modificador individual pode apresentar limitações como a separação de fase entre polímero e ligante quando misturado e estocado dependendo do teor utilizado (CARVALHO, 2018).

O ácido polifosfórico (PPA) também pode ser utilizado como um modificador do ligante asfáltico sendo bastante solúvel em compostos orgânicos como é o caso do ligante asfáltico e, quando diluído em água transforma-se gradativamente em ácido ortofosfórico. O teor desse material e os efeitos da sua incorporação ao ligante asfáltico dependem da composição química do material de base o que está ligado ao petróleo de origem (BAUMGARDNER, 2012). No entanto, o uso do PPA não está restrito apenas a modificação do ligante de forma individual, é possível utilizá-lo como catalizador de ligantes modificados por terpolímeros reativos funcionando como um acelerador químico entre o terpolímero reativo e o ligante (CARVALHO, 2018) e sua presença provoca uma diminuição do teor de polímero e auxilia o material modificado a atingir os critérios da especificação SUPERPAVE (BUNCHER & D'ANGELO, 2012).

Dessa maneira, esse estudo tem o objetivo principal de avaliar a resistência a deformação permanente de misturas asfálticas de elevado desempenho com o uso combinado dos polímeros reativos do tipo metacrilato de glicidila, não reativo do tipo polietileno de alta densidade e o ácido polifosfórico na modificação do ligante asfáltico convencional (50/70) e realizar uma

comparação dos resultados encontrados com o ligante convencional sem modificação e com o ligante AMP 55/75.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

Modificadores do ligante asfáltico

Nesta pesquisa ocorreu a incorporação de três materiais no ligante asfáltico fornecidos pela PRANA Petroquímica Ltda.:

- Ácido Polifosfórico (PPA) a 116%;
- Terpolímero Reativo (RET) de Etileno Acrilato de Metila e Metacrilato de Glicidila (EMA-GMA), com teor de GMA de 6%, comercialmente denominado Polimul S74®;
- Polietileno de Alta Densidade (HDPE), comercialmente denominado Polimul SX-500 ®.

A quantidade desses materiais adicionados ao ligante puro 50/70 foi determinada de acordo com estudo de Gama *et al.* (2016). A Tabela 1 mostra as porcentagens de cada material incorporado assim como a nomenclatura utilizada durante o estudo para cada ligante asfáltico.

Tabela 1: Nomenclatura e porcentagens dos ligantes utilizados

Grupos	Polimul S74	Polimul SX 500	PPA 116 %	Ligante Asfáltico 50/70	Ligante Asfáltico AMP 55/75
A	-	-	-	100%	-
B	-	-	-	-	100%
C	1,80%	0,30%	0,15%	97,75%	-
D	1,80%	0,30%	0,30%	97,60%	-
E	1,80%	0,30%	0,50%	97,40%	-

As propriedades físicas dos ligante puro e modificado foram obtidas a partir da realização dos ensaios no Laboratório de Engenharia Civil (LEP) e os resultados dos ensaios de penetração (DNIT-ME 155/2010), ponto de amolecimento (DNIT-ME 131/2010), viscosidade rotacional (NBR 15184/2004) e recuperação elástica (DNIT-ME 130/2010) encontram-se na Tabela 2.

Tabela 2: Propriedades físicas dos ligantes puro e modificado

Ensaio	Ligante					
	A	B	C	D	E	
Ponto de Amolecimento (°C)	48,75	58,60	66,50	69,00	74,00	
Penetração (0,1 mm)	64,0	51,5	47,0	47,0	41,5	
Recuperação Elástica (%)	2,0	81,0	87,0	86,4	87,0	
Viscosidade Rotacional (cP)	135 °C	480	980	2000	2480	2850
	150°C	290	492	970	1010	1250
	177°C	110	190	330	350	380

De acordo com os resultados do ensaio de penetração verificou-se que os ligantes modificados apresentaram valores menores de penetração em comparação com o ligante convencional com valores aceitáveis conforme a ANP n°32 para ligantes elastoméricos 50/85-E. Para os ligantes modificados com S75, SX500 e PPA essa redução foi ainda mais expressiva, verificando que com o aumento da adição dos teores de PPA ao ligante modificado com SX500 e S74, houve uma tendência de aumento da rigidez. A redução desse parâmetro pode indicar uma resistência a deformação permanente assim como ao fissuramento devido ao aumento de rigidez (TOPAL, 2010).

Para o parâmetro de ponto de amolecimento os ligantes modificadora apresentaram um aumento da temperatura em relação a amostra A, sendo assim mais resistentes ao aumento de temperatura indicando melhoras nas propriedades em elevadas temperaturas. Diante destes resultados e segundo especificações da ANP todos os ligantes modificados podem ser classificados como elastoméricos 60/85-E com exceção do ligante modificado B que apresentou ponto de amolecimento menor que o mínimo estabelecido que é 60°C. Segundo Polacco *et al.* (2015) a adição do polímero não reativo SX500 aumenta a rigidez do ligante e tem como consequência disso o aumento da resistência a deformação.

Segundo Gama *et al.* (2016) a perda de elasticidade de ligante modificados com Polimul S74; Polimul SX-500 e ácido polifosfórico em teores diversos ocorre devido à perda de componentes voláteis que ocorre durante o processo de envelhecimento e devido a reação química entre o Polimul S74 e o ligante quando submetidos a temperaturas elevadas. Assim, no ensaio de recuperação elástica confirmou-se que foi dito pelos autores onde as amostras com adição do polímero não reativo, polímero reativo e ácido polifosfórico produziram ligantes de maior elasticidade do que as amostras A e B formadas por ligantes já comercializados em grande escala no Brasil.

Para os valores de viscosidade verificou-se aumento da viscosidade das amostras em todas as temperaturas ensaiadas. Observou-se que o aumento do teor de ácido polifosfórico (PPA 116%) ocasionou aumento da viscosidade do ligante convencional modificado por S74 e SX500. Para Yan *et al.* (2013) e Gama *et al.* (2016) o aumento do teor de PPA ocasiona um aumento da quantidade de asfaltenos e diminuição de resinas em ligantes asfálticos, o que pode explicar a elevação da viscosidade já que os asfaltenos são responsáveis pelas propriedades reológicas dos ligantes. Para Polacco *et al.* (2004) o significativo aumento da viscosidade ocorreu devido as características de reação continuada que possuem os terpolímeros reativos quando misturados ao ligante asfáltico

Agregados

Neste estudo foram utilizados para a preparação das misturas asfálticas os agregados: brita 19mm, brita 12,5mm e pó de pedra, todos de origem granítica, além de areia e cal hidratada (fíler). As propriedades físicas destes foram encontradas por meio da realização dos ensaios de análise granulométrica dos agregados (DNIT-ME 083/98); massa específica do agregado graúdo e miúdo (DNIT-ME 081/98 e DNIT-ME 084/95, respectivamente); abrasão Los Angeles (DNIT 035/98 - ME); equivalente areia (DNIT-ME 054/97) e índice de forma (DNIT-ME 086/94). Os resultados destes ensaios estão apresentados na Tabela 3, e granulometria dos agregados graúdos e miúdos na Figura 1.

Tabela 3: Propriedades físicas dos agregados

Agregado	Massa Específica Real (g/cm ³)	Massa Específica Aparente (g/cm ³)	Abrasão Los Angeles (%)	Equivalente Areia (%)	Índice de Forma
Brita 19 mm	2,76	2,73	23,20%	-	0,78
Brita 12,5 mm	2,75	2,71	25,40%	-	0,72
Areia	2,40	2,37	-	62,96%	-
Pó de Pedra	2,49	2,48	-	56,93%	-

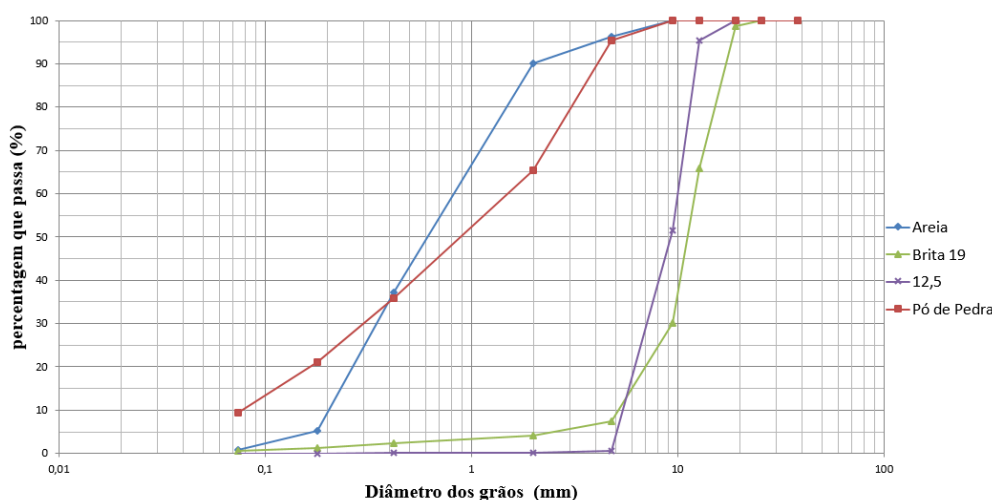


Figura 1: Curva granulométrica dos agregados

2.2 Métodos

As misturas do ligante com os materiais modificadores foram realizadas em um agitador mecânico de baixo cisalhamento com rotação de 500 rpm, de acordo com procedimentos previamente estabelecidos em Gama *et al.* (2016). O ligante asfáltico foi aquecido a uma temperatura de 160°C. A ordem de adição dos modificadores ao ligante 50/70 seguiu também a metodologia utilizada por Gama *et al.* (2016) onde primeiramente foi adicionado o Polimul S74 com duração de mistura de 1h, logo em seguida foi acrescentado o Polimul SX 500 e misturado por um período de 30 minutos e por último adicionou-se o PPA 116 % agitado por um tempo de 30 min. Após o processo de mistura, os ligantes com adição dos modificadores foram submetidos a um processo de cura realizado em estufa a 160°C por 12 horas, para simular o processo industrial de espera para aplicação em campo (PÉREZ-LEME *et al.*, 2006; JASSO *et al.*, 2015; GAMA *et al.*, 2016).

Os agregados foram enquadrados na faixa granulométrica “C” estabelecida pelo DNIT, de acordo com as suas composições, obedecendo aos critérios de pontos de controle e zona de restrição da metodologia SUPERPAVE. Foram realizadas cinco dosagens: uma para cada amostra de ligante utilizado. Na primeira fase na dosagem Superpave foi escolhida a composição granulométrica, feitas com agregados disponíveis. A curva de projeto escolhida foi a curva inferior, pois foi a que mais se aproximou dos parâmetros exigidos pela metodologia SUPERPAVE. Na segunda fase foi escolhido o teor de ligante para cada tipo de mistura

asfáltica de modo a atender as especificações da dosagem SUPERPVA, onde para as amostras A, B, C, D e E foram encontrados os teores de 4,4%, 4,65%, 4,65%, 4,87%, 5,0%, respectivamente.

Após a dosagem foram moldados os corpos de prova das cinco amostras para a realização dos ensaios de Módulo de Resiliência e Flow Number com a intenção de verificar a interferência dos materiais adicionados na resistência à deformação permanente.

Módulo de resiliência

O ensaio de Módulo de Resiliência é um ensaio de carga repetida e serve para analisar o quanto os materiais que compõem as camadas do pavimento se deformam utilizando o comportamento tensão-deformação para realizar essa análise. Este ensaio é normatizado pela ABNT 16018/2011 que determina a medição das deformações reversíveis instantâneas geradas por condições cíclicas de carregamento e descarregamento nos corpos de prova.

Para a realização deste ensaio foi utilizado um equipamento formado por um sistema pneumático de carregamento com controle do tempo e frequência de aplicação da carga, um sistema de medição do deslocamento axial do corpo de prova e um software para coleta e análise de dados. Com esses equipamentos foram aplicados ciclos em compressão diametral usando uma carga no valor igual a 10% da força da RT. Esses ciclos, para os materiais viscoelásticos, são responsáveis por representar o efeito oriundo da passagem dos pneus dos veículos.

Ensaio uniaxial de carga repetida

O Ensaio uniaxial de carga repetida é um teste que mede a deformação permanente de misturas asfálticas onde é feita a simulação de aplicação de cargas repetidas de veículos pesados sobre a estrutura do pavimento. Para Bundy (2012) as execuções de cargas repetidas são mais indicadas para simular o tráfego contínuo de veículos pesados sobre o pavimento, já que os ensaios que utilizam cargas estáticas não representam as deformações permanentes mostradas em campo.

O parâmetro *Flow Number*, obtido no ensaio, retrata a quantidade de ciclos aplicados ao corpo de prova no momento em que se começa a verificar o cisalhamento a volume constante, isto é, o número de ciclos de cargas tolerados pelo pavimento até a fluência. O ensaio é preconizado pela norma DNIT-ME 184/2018, onde os corpos de prova para realização deste ensaio mediam 150mm de altura, diâmetro de 100mm e volume de vazios de $7\% \pm 0,5$. O ensaio consiste na aplicação de cargas repetidas de 204kPa em corpos de prova condicionados a uma temperatura de 60°C.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Ensaio de Módulo de Resiliência

Na Figura 2 são apresentados os resultados do parâmetro de módulo de resiliência, obtidos para todas as misturas estudadas com os ligantes puro e modificados.

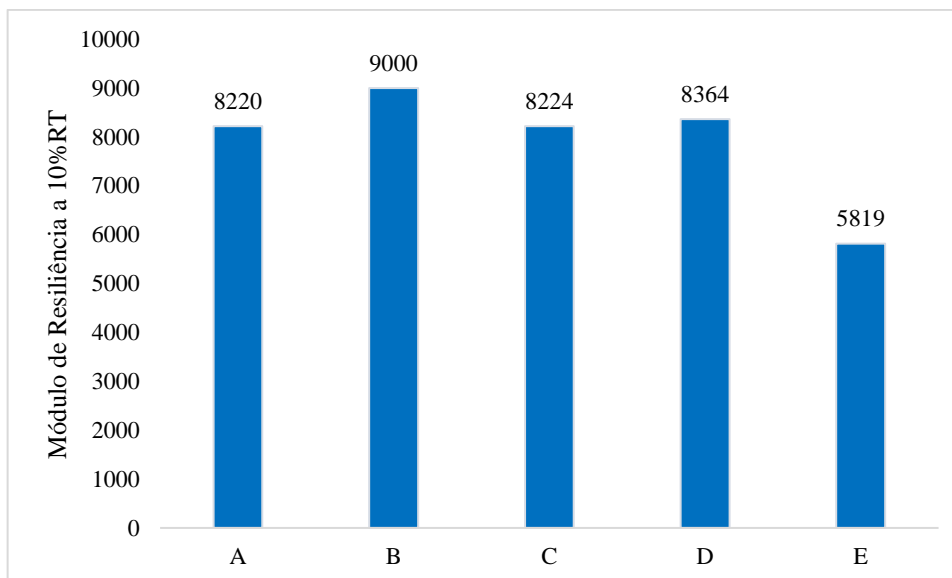


Figura 2: Módulo de Resiliência

Com os resultados obtidos foi possível observar na Figura 1 que o módulo de resiliência das misturas com os ligantes modificados foi próximo dos resultados obtidos na mistura com o ligante puro. Isso mostra que todos os ligantes apresentaram basicamente a mesma rigidez quando submetidos a carregamentos leves a temperatura de 25°C.

Segundo Brown *et al.* (2010), o módulo de resiliência de misturas asfálticas faz referência ao módulo de elasticidade deste material. Desta forma quanto mais rígido o material for, maior será o MR. No entanto ligantes muito rígidos e que não têm elasticidade, podem resultar ao pavimento uma vida de fadiga menor. Por essa razão para entender melhor o efeito da rigidez e resistência das amostras, é preciso se aprofundar no estudo das misturas por meio de outros ensaios como o ensaio módulo dinâmico e deformação permanente.

3.2 Ensaio uniaxial de carga repetida

O ensaio determina o valor do Flow Number (*FN*) que é usado como um indicador de desempenho para a deformação permanente, resistência da mistura ou como comparativo da resistência ao cisalhamento de várias misturas asfálticas, o *Flow Number* indica o ciclo onde a taxa de deformação plástica é mínima. Quanto maior o FN menores serão as deformações sofridas pelo revestimento e menor a tendência de formação de trilhas de roda (WITCZAK *et al.*, 2002). Os resultados de FN para às misturas de ligante puro e modificados estão apresentados na Tabela 4 e na Figura 3 encontra-se os valores de FN.

Tabela 4: Ensaio *Flow Number* das misturas asfálticas

Ligante Asfáltico	Código	Número de Ciclos	Deformação Acumulada (<i>microstrains</i>)	<i>Flow Number</i>
CAP 50/70	A	564	50095	131
CAP 55/75	B	2480	50127	695
1,8 S74 + 0,3 SX + 0,15 PPA	C	10000	8678	5253
1,8 S74 + 0,3 SX + 0,3 PPA	D	10000	9429	9739
1,8 S74 + 0,3 SX + 0,5 PPA	E	10000	11211	6436

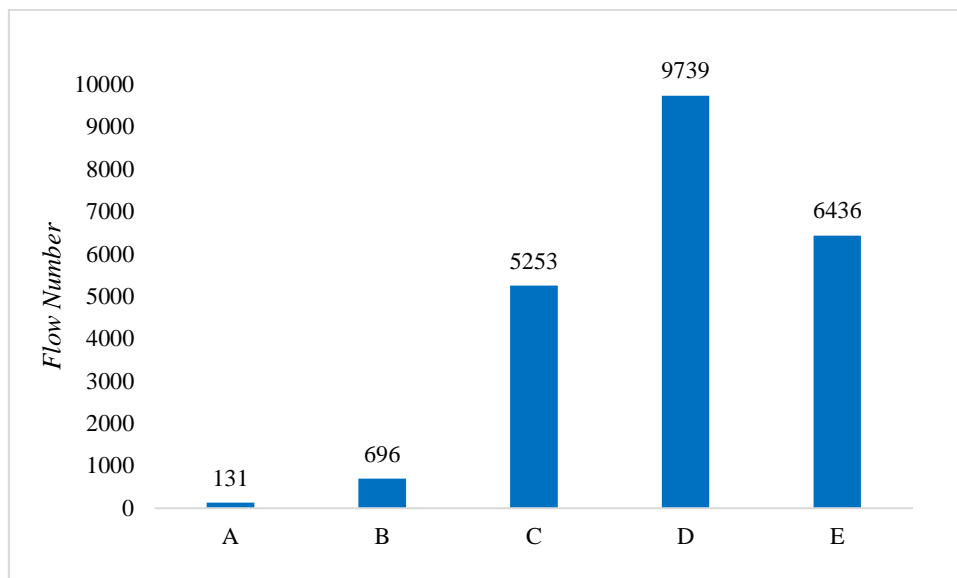


Figura 3: *Flow Number*

O FN da mistura com o ligante puro (A) foi de 131, atingido à 564 ciclos, à mistura B de ligante modificado 55/75 apresentou uma deformação plástica de 695 com aplicação de 2480 ciclos. Já às amostras com ligantes C, D e E apresentaram respectivamente 5.253; 9.739; 6.436 de FN e deformações permanentes de 8.678; 9.429 e 11.211 *microstrans* atingidas e ensaio finalizado, pois alcançaram o número máximo de 10.000 ciclos.

Na Tabela 5 estão expostos os critérios utilizados por Nascimento (2008) que classifica o volume de tráfego de acordo com o FN mínimo exigido para classificar os níveis de tráfego em médio, pesado e extremamente pesado.

Tabela 5: Valores mínimos de *Flow Number* para diferentes níveis de tráfego

Pesquisa	Médio	Pesado
Nascimento (2008)	300	700

Observou-se que a maior resistência a deformação permanente foi a encontrada na mistura D, onde a mesma apresentou um FN 23 vezes maior que o mínimo sugerido para o tráfego pesado, um FN 74 vezes maior que o FN do ligante puro e 14 vezes superior ao modificado com SBS encontrado no mercado.

Notou-se que a amostra A pode ser classificada como resistente ao tráfego médio, as amostras B, C, D e E podem ser classificadas para tráfegos pesados, apresentando elevada resistência à alta temperatura. Segundo Gama *et al.* (2016) isto ocorre devido ao efeito elastomérico do polímero Polimul S74 que junto ao Polimul SX500 e ao PPA como catalizador, aumentam a resistência a deformação. As misturas com os modificadores utilizados nesta pesquisa, apresentaram de forma consistente baixa deformação acumulada diante de elevado número de ciclos, com valores significativamente maiores do que a mistura com o ligante puro.

No resultado do ensaio com os ligantes convencional e modificados apresentado anteriormente, observou-se que a modificação do ligante asfáltico com variados teores de polímero reativo, com o polímero não reativo e o ácido polifosfórico, conferiram uma melhoria da resistência a deformação plástica do ligante asfáltico. Com isso foi possível observar a semelhança no

comportamento frente à deformação permanente de cada uma das misturas, com os diferentes ligantes modificados. O efeito semelhante em misturas asfálticas do tipo C, D e E quando comparados a mistura A e B, submetidos à alta temperatura a rigidez e a elasticidade foi mantida devido aos modificadores utilizados, fazendo com que estas amostras ao aliviar os esforços aplicados permaneçam flexíveis.

4. CONCLUSÕES

Com os resultados encontrados durante toda a pesquisa foi possível verificar a eficiência da modificação do ligante convencional 50/70 com Polimul S74, Polimul SX500 e Ácido Polifosfórico. Essa modificação contribuiu para o aumento da rigidez e das propriedades elásticas, além de garantir uma melhor performance em altas temperaturas. Assim fica entendido que o ligante modificado aplicado em mistura asfáltica submetida a elevada temperatura aumenta a vida de serviço do pavimento.

A modificação do ligante puro contribuiu significativamente para a resistência a deformação permanente. Nas condições de ensaio utilizada as misturas asfálticas com ligantes modificados não apresentaram deformação permanente. Confirmando que o ligante modificado com o polímero reativo (S74), não reativo (SX500) e ácido polifosfórico (PPA116%) nas proporções analisadas é altamente resistente a deformação permanente. Dessa maneira a mistura asfáltica com esses modificadores pode ser uma boa opção para aplicação em regiões de temperaturas elevadas, como a do Nordeste brasileiro, onde a principal preocupação é com a deformação permanente.

De maneira geral com essa pesquisa foi possível identificar que as misturas asfálticas confeccionadas com os ligantes modificados com o Polimul S74, Polimul SX500 e Ácido Polifosfórico são uma boa opção para lugares em que é preciso um revestimento asfáltico de alta qualidade e resistência a deformação permanente, devido à dificuldade para interromper o tráfego de veículos.

REFÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT (2011) *NBR 16018 – Materiais asfálticos - Misturas asfálticas – Determinação da rigidez por compressão diametral sob carga repetida*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo.
- ABNT (2004) *NBR 15184 – Materiais betuminosos – Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo.
- ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE PETRÓLEO. (2007) *ANP. N°32. Especificações dos cimentos asfálticos de petróleo modificados por polímeros SBS*.
- BAUMGARDNER, G.L. et al., (2005) Polyphosphoric acid modified asphalt: proposed mechanisms. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists Long Beach*, v.74, p. 283-305.
- BROWN, E. R., KANDHAL, P. S., ROBERTS, F. L., KIM, Y. R., LEE, D., KENNDY, T. W. (2010) *Hot mix asphalt materials, mixture design, and construction*. 3 ed. NAPA Reserch and Education Foundation. Lanham, Maryland.
- BUNCHER, M.; D'ANGELO, J. A. (2012) Establishing a Baseline of Knowledge Through 2005 by Reviewing AI IS-220: Polyphosphoric Acid Modification of Asphalt. *Transportation Research Circular*, n. E-C160, p. 12-13.
- BUNDY, J (2012). *Avaliação do comportamento mecânico de misturas asfálticas morna*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). COPPE - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- CARVALHO, M. A. R. (2018) *Estudo das Propriedades Mecânicas de Misturas Asfálticas com CAP 50/70 Modificado por Polímero Reativo/Não-Reativo e Ácido Polifosfórico*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, PB. 2018.

- DNIT (1994) ME 086/94 – *Agregado – determinação do índice de forma*. Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes, Rio de Janeiro.
- DNIT (1995) ME 084/95 – *Agregado miúdo – determinação da densidade real*. Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte, Rio de Janeiro.
- DNIT (1997) ME 054/97 – *Equivalente areia*. Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte, Rio de Janeiro.
- DNIT (1998) ME 035/98 – *Agregados: Determinação da abrasão “Los Angeles”*. Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte, Rio de Janeiro.
- DNIT (1998) ME 081/98 – *Determinação da absorção e da densidade do agregado graúdo*. Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte, Rio de Janeiro.
- DNIT (1998) ME 083/98 – *Agregados – Análise Granulométrica*. Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte, Rio de Janeiro.
- DNIT (2010) ME 130/2010 - *Determinação da Recuperação Elástica de Materiais Asfálticos pelo Ductilômetro*. Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes. Rio de Janeiro.
- DNIT (2010) ME 131/2010 – *Material asfáltico – Determinação do ponto de amolecimento – Método anel e bola*. Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte, Rio de Janeiro.
- DNIT (2010) ME 155/2010 – *Material asfáltico – Determinação da penetração*. Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte, Rio de Janeiro.
- DNIT (2018) ME 184/2018 – *Misturas asfálticas – Ensaio uniaxial de carga repetida para determinação da resistência à deformação permanente*. Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte, Rio de Janeiro.
- DOMINGOS, M. D. I.; FAXINA, A. L. (2013) Avaliação do comportamento fluência-recuperação de ligantes asfálticos modificados com SBS e ácido polifosfórico. *Revista Transportes*, v. 21, n. 1, p. 51-58.
- DOMINGOS, M. D. I.; FAXINA, A. L. (2015) Comportamento fluência-recuperação de ligantes asfálticos modificados com copolímero SBR e ácido polifosfórico. *Revista Transportes*, v. 23, n. 2, p. 65-84.
- GAMA, D. A.; ROSA, J.M.; DE MELO, T. J. A.; RODRIGUES, J. K. G. (2016) Rheological studies of asphalt modified with elastomeric polymer. *Construction and Building Material*, v. 106, p. 290-295.
- JASSO, M.; HAMPL, R.; VACIN, O.; BAKOS, D.; STASTNA, J.; ZANZOTTO, L. (2015) Rheology of conventional asphalt modified with SBS, Elyaloy and polyphosphoric acid. *Fuel Processing Technology*.
- MAHMOUD, A.F.F.; BAHIA, H. (2004) *Using the Gyrotory Compactor to Measure Mechanical Stability of Asphalt Mixtures, Wisconsin Highway Research Program*. Projeto Número 0092-01-02.
- NASCIMENTO, L. A. H. (2008) *Nova Abordagem da Dosagem de Misturas Asfálticas Densas com Uso do Compactador Giratório e Foco na Deformação Permanente*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). COPPE – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ.
- ONOFRE, F. C.; CASTELO BRANCO, V. T. F.; SOARES, J. B.; FAXINA, A. L. (2013) Avaliação do efeito de ligantes asfálticos modificados na resistência à deformação permanente de misturas asfálticas densas. *Revista Transportes*, v. 21, n. 3, p. 14-21.
- PERES-LEME, a., MARTINEZ-BOZA, F.J., ATTANE, P., GALLEGOS, C. (2006) Destabilization mechanism of polyethylene-modified bitumen. *Journal of Applied Polymer Science*, v. 110, n. 1, p. 260-267.
- POLACCO, G.; STASTNA, J.; VLACHOVICOVA, Z.; BIONDI, D.; ZANZOTTO, L. (2004) Temporary Networks in Polymer-Modified Asphalts. *Polymer Engineering and Science*. V. 44, n.12.
- POLACCO, G.; BERLINCIONI, S.; BIONDI, D.; STASTNA, J.; ZANZOTTO, L. (2005) Asphalt modification with diferent polyethy lene-based polymers. *European Polymer Jornal*, v. 41, p. 2831 – 2844.
- POLACCO, G.; FILIPPI, S.; MERUSI, F.; STASTNA, G. (2015) A review of the fundamentals of polymer-modified asphalts; Asphalt/polymer interactions and principles of compatibility. *Advances in Colloid and Interface Science*, v. 224, p. 72-112.
- TOPAL, A. (2010) Evaluation of the properties and microstructure of plastomeric polymer modified bitumns. *Fuel Processing Technology*, v 91, n. 1, p. 45-51.
- WITCZAK, M. W.; KALOUSH, K.; PELLINEN, T. et al. (2002) *Simple performance test for Superpave mix design*. National Cooperative Highway Research Program – NCHRP Report 465, Washington, D. C., EUA.
- YAN, K.; ZHANG, H.; XU, H. (2013) Effect of polyphosphoric acid on physical properties, chemical composition and morphology of bitumen. *Construction and Building Materials*, v. 47, p. 92-98.

Mirtes Aila Rodrigues de Carvalho (mirtesaila@gmail.com)
Priscila Maria Sousa Gonçalves Luz (priscilaluz55@gmail.com)
Christian Rafael Ziegler (crziegler1@hotmail.com)
Conrado Cesar Vitorino Pereira da Silva (cesar.vtr@hotmail.com)
Daniel Beserra Costa (daniel.beserra@gmail.com)
Jonny Dantas Patrício (jonny_dantas@hotmail.com)
Cacildo de Medeiros Brito Cavalcante (cacildomedeiros@gmail.com)
John Kennedy Guedes Rodrigues (profkennedy@hotmail.com)
Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Campina Grande
Rua Aprígio Veloso, 882 – Campina Grande, PB, Brasil.