

Artículo Original

**Análise física-reológica de ligantes asfálticos modificados com óleo de algodão refinado para uso em misturas asfálticas mornas**

**Physical-rheological analysis of asphalt binders modified with refined cottonseed oil for use in warm asphalt mixes**

**Ana Maria Gonçalves Duarte Mendonça<sup>1</sup>, Osires de Medeiros Melo Neto<sup>1,\*</sup>, John Kennedy Guedes Rodrigues<sup>1</sup>, Ivna de Sousa Dantas<sup>1</sup>, Ingridy Minervina Silva<sup>1</sup>, Daniel Beserra Costa<sup>1</sup>, Robson Kel Batista de Lima<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Universidade Federal de Campina Grande. Departamento de Engenharia Civil. Campina Grande-PB, 58429-900, Brasil.

\*Autor de correspondencia: osiresdemedeiros@servidor.uepb.edu.br

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento/No Comercial 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



**Recibido:** 26 febrero 2022 **Aceptado:** 17 abril 2022 **Publicado:** 24 mayo 2022

**Resumo**

A necessidade de um desenvolvimento sustentável e uma maior eficiência energética na área da pavimentação tem impulsionado a busca por temperaturas de mistura e compactação de misturas asfálticas inferiores às convencionalmente utilizadas. Em busca da diminuição da temperatura de pavimentação e menor consumo energético, busca-se substituir misturas asfálticas a quente por misturas mornas. O uso de aditivos oleicos como modificadores do ligante asfáltico pode ser um modificador viável e favorável ao meio ambiente devido à possibilidade de promover reduções na viscosidade do ligante e uma diminuição na temperatura de mistura e compactação. Desta forma, este estudo avaliou as características físicas e reológicas do ligante asfáltico classificado com penetração 50/70 modificado pela adição do óleo de algodão refinado nos teores de 1%, 2%, 3%, 4%, 5% e 6%. As amostras foram analisadas antes e após o procedimento de envelhecimento em curto prazo (Rolling Thin-Film Oven-RTFO), por meio dos ensaios de Penetração, Ponto de Amolecimento, Viscosidade Rotacional, Performance Grade (PG), e Multiple Stress Creep Recovery (MSCR). Os resultados demonstraram que a adição do óleo nos teores estudados possibilitou uma redução das temperaturas de mistura e compactação das misturas asfálticas em até 10°C para o maior teor de óleo adicionado ao ligante asfáltico. O óleo de algodão refinado se apresentou como um bom modificador redutor de viscosidade e de temperatura de trabalho para as misturas asfálticas, onde todos os teores testados foram classificados para uso em rodovias de tráfego padrão.

**Palavras-chave:** Bio-óleo, Modificador, Misturas mornas, Reologia, Óleo de algodão, Ligante asfáltico

**Abstract**

The need for sustainable development and greater energy efficiency in the paving area has driven the search for mixing and compaction temperatures for asphalt mixtures lower than those conventionally used. In search of lowering the paving temperature and lowering energy consumption, it is sought to replace hot asphalt mixes with warm mixes. The use of oleic additives as asphalt binder modifiers can be a viable and environment-friendly modifier due to the possibility of promoting reductions in binder viscosity and a decrease in mixing and compaction temperature. Thus, this study evaluated the physical and rheological characteristics of the asphalt binder classified with 50/70 penetration modified by the addition of refined cottonseed oil at levels of 1%,

2%, 3%, 4%, 5%, and 6%. The samples were analyzed before and after the short-term aging procedure (Rolling Thin-Film Oven-RTFO), by means of Penetration, Softening Point, Rotational Viscosity, Performance Grade (PG), and Multiple Stress Creep Recovery (MSCR). The results showed that the addition of oil at the levels studied made it possible to reduce the mixing and compaction temperatures of the asphalt mixtures by up to 10°C for the highest oil content added to the asphalt binder. Refined cottonseed oil presented itself as a good viscosity and working temperature reducer modifier for asphalt mixtures, where all tested contents were classified for use on standard traffic roads.

**Keywords:** Bio-oil; Modifier, Warm mixtures, Rheology, Cotton oil, Asphalt binder

## 1. Introdução

O pavimento asfáltico é o tipo de pavimento mais utilizado no mundo devido ao excelente desempenho em serviço [1]. O petróleo bruto, como um dos maiores recursos energéticos aplicados no mundo, pode ser refinado em diversos tipos de subprodutos. Uma aplicação significativa dos produtos é o ligante asfáltico, que é utilizado como principal matéria-prima na construção civil, com destaque para a rodoviária [2].

Estudos recentes [3, 4] estão sendo conduzidos para desenvolver ligantes asfálticos alternativos a partir de vários recursos de biomassa para a construção de pavimentos asfálticos flexíveis. Os bio-óleos são geralmente aplicados na indústria de ligantes asfálticos como modificadores (teor abaixo de 10% em substituição ao ligante asfáltico), extensores (teor de 25 a 75% de substituição ao ligante asfáltico) e substituintes (teor de 100% de bio-óleos ao invés do ligante asfáltico) [5].

Os aditivos orgânicos têm hidrocarbonetos de cadeia longa que fornecem valores de baixa viscosidade em altas temperaturas quando adicionados a ligantes asfálticos. Os aditivos químicos facilitam o umedecimento do agregado particulado, modificando e controlando o atrito interno da mistura, o que melhora a trabalhabilidade da massa asfáltica [6]. Os óleos vegetais são materiais indicados, pois são derivados da natureza e têm componentes estáveis [7-9]. No ramo da pavimentação, diferentes misturas asfálticas são utilizadas para construir o pavimento, nomeadas de mistura asfáltica a quente, mistura asfáltica morna e mistura asfáltica a frio [10]. A produção de mistura asfáltica a quente envolve altas temperaturas entre 155 e 165°C, que resulta na geração de gases de efeito estufa, assim como alto consumo de energia. Por outro lado, a mistura asfáltica morna é uma tecnologia que reduz a viscosidade do ligante asfáltico e permite que a mistura asfáltica seja misturada e compactada em temperaturas de até 35 a 55°C abaixo das temperaturas exigidas para misturas asfálticas a quente [11]. Buscando diminuir essas temperaturas, surgem meios que facilitam a obtenção deste objetivo. Segundo Lucena *et al.* [12], destacam-se a adição de aditivos orgânicos ou químicos, emulsões e ligantes sintéticos, que podem diminuir consideravelmente as temperaturas no processo de operação. Sun *et al.* [13] realizaram um estudo com modificação do ligante asfáltico por bio-óleo derivado de óleo de cozinha residual. Os resultados apontaram que a adição desse modificador proporcionou redução do módulo complexo e a rigidez de fluência, e aumento do ângulo de fase. Souza [14] investigou a incorporação do óleo da Mamona em ligante asfáltico classificado com penetração 50/70 para fabricação de misturas mornas com teores de óleo variando de 2 a 9% em peso. Os resultados obtidos apontaram reduções de 10°C nas temperaturas de usinagem e compactação quando adicionou 5% do óleo da Mamona sem comprometimento das propriedades mecânicas. Zeng *et al.* [15] também investigou o óleo de Mamona como redutor de viscosidade para ligantes asfálticos envelhecidos e observou que as temperaturas diminuem com o aumento do conteúdo.

Girimath e Singh [16] avaliaram a incorporação de bio-óleo derivado de biomassa de resíduos de madeira nas propriedades físicas e reológicas do ligante asfáltico. Os teores utilizados foram 2%, 4%, 6%, 8% e 10% de bio-óleo por peso total do ligante. A adição desse modificador proporcionou aumento da penetração, diminuição do ponto de amolecimento e da viscosidade do ligante asfáltico. Os teores de 2% e 4% de bio-óleo satisfizeram as condições estabelecidas em norma.

Nogueira *et al.* [17] avaliaram o uso do óleo e do ácido graxo de algodão em asfalto RAP oxidado. O estudo realizado por eles concluiu que a adição desses agentes acarretou redução da rigidez, sendo benéfico para uso em ligantes asfálticos envelhecidos. Contudo, a depender do teor a ser adicionado de óleo de algodão pode ser benéfico também para ligantes asfálticos convencionais a fim de reduzir a temperatura de compactação e usinagem das misturas asfálticas, incentivando o cultivo deste produto na região Nordeste do Brasil. Por possuir um maior ponto de fusão (comparando-se a outros óleos), o óleo de algodão aguenta maiores temperaturas sem que haja perda em sua qualidade e alterações significativas em suas propriedades.

Melo Neto *et al.* [18] realizaram um estudo comparativo de ligantes asfálticos modificados com óleo de copaíba e óleo de algodão refinado nos teores de 4 e 5% e verificaram uma redução de rigidez maior nos ligantes com incorporação do óleo de algodão, apresentando um grau de desempenho de 52°C para o teor de 5%. Entretanto, a literatura aborda estudos voltados principalmente para a análise de desempenho físico, reológico e mecânico de ligantes asfálticos modificados por bio-óleos. O presente estudo também apresenta esta limitação, mas faz uma breve análise em termos dos custos de produção de misturas asfálticas com o óleo de algodão.

Estudos abordam ligantes asfálticos modificados com diferentes bio-óleos, inclusive o óleo de algodão, mas há lacunas na investigação deste modificador em um mesmo tipo de ligante asfáltico e em uma faixa mais ampla de teores testados. Com base no exposto, este trabalho teve como objetivo avaliar as características físicas empíricas e reológicas de ligantes asfálticos modificados com óleo de algodão refinado em teores de 1%, 2%, 3%, 4%, 5% e 6%.

## 2. Materiais e Métodos

Neste tópico são descritos os materiais e procedimentos realizados durante a fase experimental da pesquisa, de acordo com normas da American Society for Testing and Materials (ASTM).

O ligante asfáltico utilizado na pesquisa foi classificado com penetração 50/70 (AB), fornecido pela empresa JBR Engenharia LTDA, no município de Recife-PE. A escolha deste tipo de ligante asfáltico se justifica por ser o mais utilizado na região Nordeste do Brasil. O óleo de algodão refinado foi obtido no comércio local da cidade de Campina Grande-PB. O óleo de algodão refinado foi utilizado devido à praticidade de sua obtenção no mercado. O óleo refinado é livre de ácidos graxos livres e sais; substâncias voláteis como hidrocarbonetos, aldeídos, cetonas e ésteres de baixo peso molecular; substâncias inorgânicas como sais de cálcio e outros metais, silicatos, fosfatos; e umidade. Esses elementos afetam a estabilidade do produto.

Para efetivação da pesquisa, foram utilizados teores de 1 a 6% de óleo de algodão como aditivo ao ligante asfáltico (AB). Os teores testados foram estabelecidos dentro da faixa de teores dita como modificadores, 1 a 10% [4], abrangendo uma faixa maior de teores testados para fim de comparação. No processo de modificação do ligante asfáltico com o aditivo foi utilizado um agitador mecânico FISATOM, Modelo 722D. A modificação do ligante com o óleo de algodão foi submetida a um aquecimento prévio em estufa a 120°C por cerca de 90 minutos para garantir a fluidez necessária que possibilitasse a homogeneização. O material foi depositado em um béquer e

inserido na manta do agitador mecânico e submetido a uma rotação de 406 rpm para assegurar uma homogeneidade na distribuição do ligante e óleo de algodão refinado. Ao se atingir a temperatura de estabilização (135°C), adicionou-se o aditivo oleaginoso em proporção ao peso do ligante (AB) e aguardou-se 20 minutos para a homogeneização, nos teores de 1, 2, 3, 4, 5 e 6%. Esta metodologia foi baseada em estudos realizados por Souza [14] e Faxina [19]. A Tabela 1 apresenta a descrição das amostras utilizadas na pesquisa e suas respectivas nomenclaturas.

**Tabela 1.** Nomenclatura das amostras utilizadas na pesquisa

Amostras	Nomenclatura
Ligante asfáltico virgem	AB
AB + 1% Óleo de Algodão Refinado	AM1
AB + 2% Óleo de Algodão Refinado	AM2
AB + 3% Óleo de Algodão Refinado	AM3
AB + 4% Óleo de Algodão Refinado	AM4
AB + 5% Óleo de Algodão Refinado	AM5
AB + 6% Óleo de Algodão Refinado	AM6

Após obtenção dos ligantes asfálticos modificados, as amostras foram caracterizadas, antes e após o procedimento de envelhecimento em curto prazo (Rolling Thin-Film Oven-RTFO) (ASTM D2872:2019), por meio dos ensaios de Penetração (ASTM D5M:2020), Ponto de Amolecimento (ASTM D36M-14:2020), Viscosidade Rotacional (ASTM D4402:2015), Performance Grade (PG) (ASTM D6373:2021) e Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) (ASTM D7405:2020).

### 3. Resultados e Discussão

Nesta seção estão apresentados e discutidos os resultados obtidos na fase experimental dos ligantes asfálticos modificados com o óleo de algodão.

#### *Caracterização física empírica dos ligantes asfálticos*

A Tabela 2 apresenta os resultados das caracterizações físicas empíricas para as amostras de ligante. Pode-se observar um aumento na penetração com o aumento da adição do óleo de algodão refinado. Os resultados corroboram com os estudos de Souza [14], Melo Neto *et al.* [18] e Portugal [20] em que a incorporação de óleos ao ligante asfáltico aumentou a penetração. De acordo com a penetração retida pode-se verificar a sensibilidade do ligante ao envelhecimento: quanto maior for a porcentagem de penetração retida menor será a sensibilidade ao envelhecimento. A Resolução ANP Nº 19 (2005) define o mínimo de 55% para esse parâmetro. Observa-se que as amostras com adição de 4% e 5% não se enquadram nos critérios. Ao analisar os dados de ponto de amolecimento com as pesquisas de Souza [14], Melo Neto *et al.* [18] e Portugal [20] observa-se que o fato de ocorrer uma diminuição na consistência do ligante asfáltico com a adição do óleo de algodão refinado já era um resultado a ser esperado. Todas as amostras se enquadraram com os critérios da resolução Nº 19 (2005) da ANP.

De acordo com os resultados da Tabela 2 observa-se que houve uma diminuição da viscosidade do ligante com o acréscimo dos teores do óleo de algodão refinado, principalmente nas temperaturas mais baixas do ensaio. A temperatura ideal do ligante asfáltico para a realização da mistura asfáltica deve se situar em  $0,17 \pm 0,02$  Pa·s quando medida com o viscosímetro rotacional. A Tabela 3 apresenta as temperaturas de mistura encontradas por meio de interpolação para a adição do óleo de algodão refinado.

**Tabela 2.** Caracterização física empírica dos ligantes asfálticos antes e após RTFO

Ensaio		Resultados						Norma	
		AB	AM1	AM2	AM3	AM4	AM5		AM6
Penetração 0,1 mm (100g, 5s a 25°C)		63	86	108	111	148	181	211	ASTM D5M:2020
Ponto de Amolecimento (°C)		50	46	43	43	40	39	37	ASTM D36M-14:2020
Viscosidade Rotacional (cP)	135 °C	406	395	355	325	305	280	270	ASTM D4402:2015
	150°C	202	198	181	168	153	150	143	
	177 °C	75	72	68	64	60	61	56	
Após RTFO									
Penetração 0,1 mm (100g, 5s a 25°C)		47	61	72	71	81	100	125	ASTM D5M:2020
Ponto de Amolecimento (°C)		53	51	50	47	47	45	44	ASTM D36M-14:2020
Aumento do Ponto de Amolecimento (°C)		3	5	7	4	7	6	7	ASTM D36M-14 [17]
Penetração Retida (%)		74	71	66	64	54	54	59	ASTM D5M:2020
Viscosidade Rotacional (cP)	135 °C	567	560	497	450	430	360	377	ASTM D4402:2015
	150°C	275	271	244	225	210	190	197	
	177 °C	95	95	87	82	75	73	75	

**Tabela 3.** Temperatura ideal para mistura asfáltica após a adição do óleo de algodão refinado

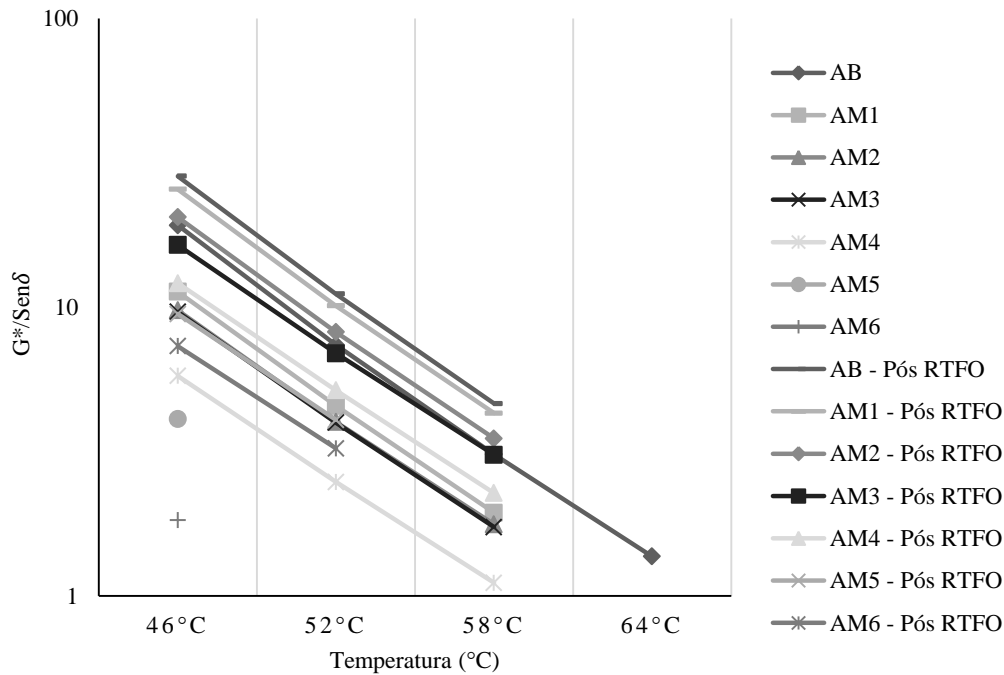
Amostra	Temperatura ideal para a mistura asfáltica
AB	156°C
AM1	154°C
AM2	152°C
AM3	150°C
AM4	148°C
AM5	147°C
AM6	146°C

Os resultados indicam que a adição de óleo de algodão refinado tem grande influência na diminuição da viscosidade do ligante asfáltico e, portanto, na diminuição da temperatura ideal para a mistura asfáltica. Tal efeito proporcionou uma diminuição da temperatura em 10°C para o maior teor de óleo de algodão refinado.

### Análise Reológica

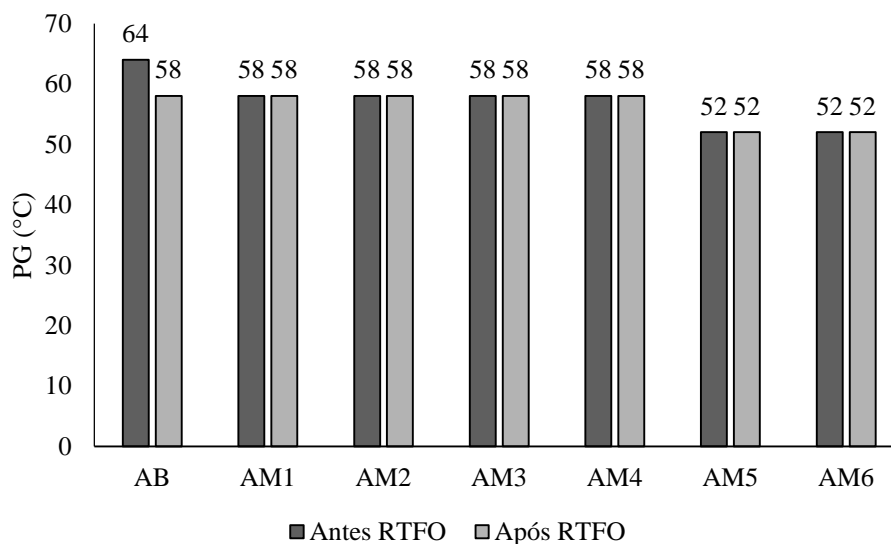
#### Grau de Desempenho (PG)

A Figura 1 apresenta as curvas  $G^*/\text{Sen}\delta$  versus temperatura na faixa de 46°C a 64°C, para os ligantes asfálticos contendo o óleo de algodão refinado antes e após o procedimento de envelhecimento em curto prazo, respectivamente.



**Fig.1** Parâmetro  $G^*/Sen\delta$  versus temperatura antes e após o envelhecimento em curto prazo

Observa-se que o parâmetro  $G^*/Sen\delta$  diminuiu com o aumento do teor de óleo e da temperatura, antes e após o envelhecimento em curto prazo. Após o RTFO as amostras ficaram mais rígidas, com parâmetros  $G^*/Sen\delta$  em torno de duas vezes mais elevados do que antes do procedimento, comportamento observado também nos estudos de Portugal [21] e Melo Neto *et al.* [18]. A diminuição da rigidez com o aumento da temperatura indica um aumento da resistência à fissuração por fadiga. Os resultados obtidos são consistentes com os resultados de ponto de amolecimento e viscosidade rotacional encontrados na literatura. A Figura 2 apresenta os resultados de PG antes e após o envelhecimento em curto prazo RTFO.

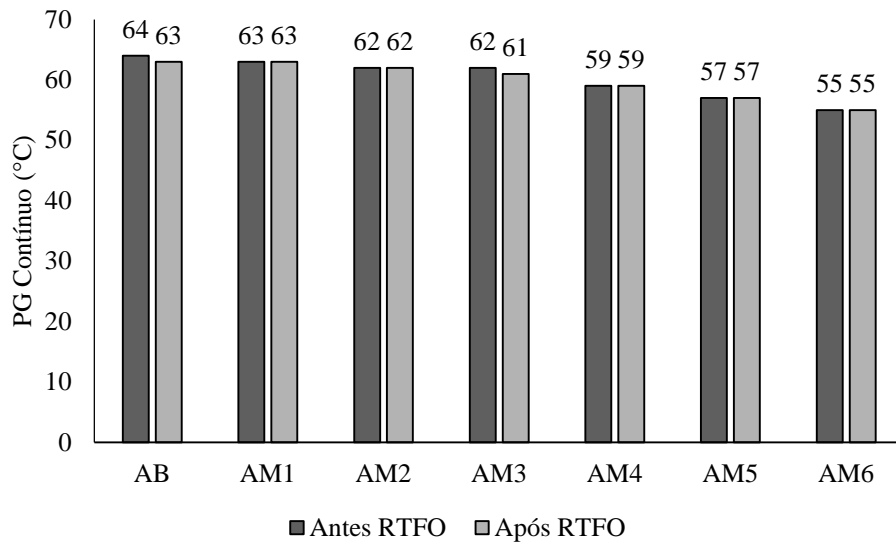


**Fig.2** Grau de desempenho dos ligantes asfálticos puro e modificados com o óleo de algodão refinado antes e após o envelhecimento em curto prazo RTFO

Ao analisar os resultados apresentados na Figura 2, percebe-se que o PG obtido para o CAP 50/70 após o envelhecimento se manteve constante do teor de 1% até a adição de 4% de óleo de algodão



refinado no valor de 58°C. Nos teores de 5% a 6% do agente modificante, o PG diminuiu em uma classe e foi classificado como sendo de 52°C. Portanto, a partir do teor de 5% o ligante modificado perde parte da sua resistência, podendo ser utilizado apenas para locais onde a temperatura do pavimento de rodagem não ultrapasse os 52°C. A Figura 3 apresenta os resultados de PG contínuo antes e após o envelhecimento em curto prazo RTFO.



**Fig.3** Grau de desempenho contínuo do ligante asfáltico modificado com o óleo de algodão refinado antes e após o envelhecimento em curto prazo RTFO

Observando que cada classe do grau de desempenho possui uma amplitude de 6°C, ligantes de diferentes origens podem estar numa mesma classe, porém com diferenças de PG variando em até 6°C. Por isso, destaca-se a importância de se analisar os ligantes de acordo com a sua variação unitária. Esta variante do ensaio de PG possibilita uma análise mais próxima do comportamento dos ligantes asfálticos modificados com o óleo de algodão refinado. Seguindo o especificado na norma ASTM D6373:2021, utilizou-se os valores da temperatura de falha do ligante após o processo de envelhecimento RTFO. A Tabela 4 apresenta as variações de temperatura antes e após RTFO entre o PG e o PG contínuo das amostras, e pode-se notar que a variação do PG tradicional para o PG contínuo ocorre entre 0 a 5°C.

**Tabela 4.** Variação das temperaturas de PG e PG contínuo nas amostras dos ligantes asfálticos

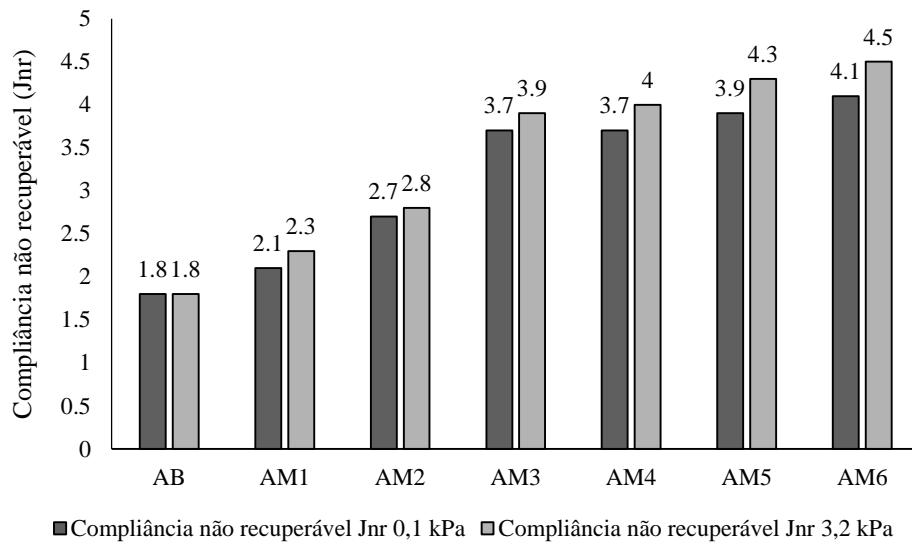
	AB		AM1		AM2		AM3		AM4		AM5		AM6	
	(°C)	(%)	(°C)	(%)	(°C)	(%)	(°C)	(%)	(°C)	(%)	(°C)	(%)	(°C)	(%)
Antes RTFO	0	0,0	5	8,6	4	6,9	4	6,9	1	1,7	5	9,6	3	5,8
Após RTFO	5	8,6	5	8,6	4	6,9	3	5,2	1	1,7	5	9,6	3	5,8

O fato de o PG variar em amplitude de 6°C também implica na determinação de graus de desempenho mais baixos do que o real. Conforme a Tabela 4, pode-se notar que o teor de ligante modificado que apresenta uma menor diferença nessa comparação é o de 4% (AM4), podendo-se afirmar que o seu valor de PG está próximo do seu verdadeiro ponto de falha.

#### Ensaio de fluência e recuperação sob tensão múltipla (MSCR)

A realização do ensaio de fluência e recuperação sob tensão múltipla (MSCR) possibilitou a avaliação do percentual de recuperação (%R - onde é fornecido dados da elasticidade), da compliância não-recuperável (J<sub>nr</sub>-que apresenta dados da suscetibilidade ao acúmulo de deformação permanente,

menores valores de Jnr indicam resistência do ligante a este efeito) e a diferença percentual entre as compliâncias não- recuperáveis (Jnr, diff - a qual fornece dados quanto à sensibilidade ao aumento do nível de tensão). A Figura 4 apresenta os dados do ensaio Jnr realizados na temperatura máxima de PG do ligante asfáltico (64°C).



**Fig.4** Compliâncias Não Recuperáveis dos ligantes puros e modificados

O ensaio de fluência e recuperação sob tensão múltipla (MSCR) permite obter o nível de tráfego suportado pelo ligante e a porcentagem de recuperação do ligante quando submetido a variações de tensões. Quanto maior o valor de Jnr, o material se torna mais suscetível à deformação permanente. Por outro lado, menores valores de Jnr indicam resistência do ligante a este efeito.

A partir da análise dos valores de Jnr, mostrados na Figura 4, pode-se notar que, com a aplicação da tensão de 0,1 kPa e 3,2 kPa, o ligante modificado com óleo de algodão refinado no teor de 1% apresenta valores menores para compliância não recuperável quando comparado aos demais ligantes modificados e o mais próximo dos valores obtidos para o ligante sem aditivo, significando ser o menos suscetível à deformação permanente dentre as amostras analisadas. A adição do óleo de algodão refinado aumentou a suscetibilidade do ligante asfáltico à deformação permanente.

Segundo a AASHTO M320:2017 pode-se fazer a relação entre os valores obtidos para o Jnr a 3,2kPa e a classe de tráfego a qual o ligante se encontra. A Tabela 5 apresenta esta classificação.

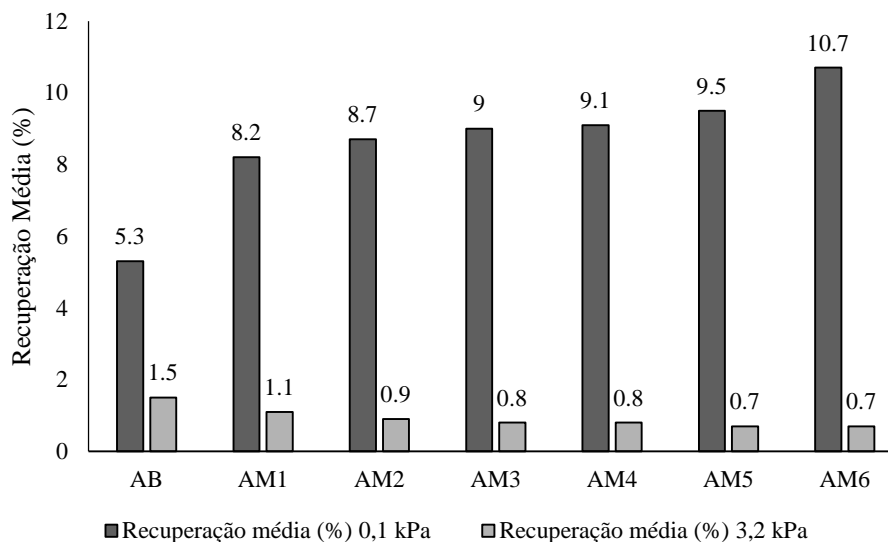
**Tabela 5.** Classificação de nível de carregamento do pavimento com base nos valores de Jnr

Propriedade	JNR (KPA <sup>-1</sup> )	Tipo de Trafego	Numero de passadas em um eixo padrao
Jnr a 3,2 kPa na temperatura máxima de PG	2,0 – 4,5	Padrão (S)	<10 milhões
	1,0 – 2,0	Pesado (H)	>10 milhões
	0,5 – 1,0	Muito pesado (V)	>30 milhões
	0 – 0,5	Extremamente pesado (E)	>100 milhões

É notável que a compliância não-recuperável dos ligantes asfálticos não possui uma mudança brusca entre as tensões de 0,1kPa e de 3,2kPa. De acordo com a classificação da AASHTOO M320:2017, o ligante puro pode ser classificado para tráfego pesado, enquanto que os ligantes adicionados com teores de 1%, 2%, 3%, 4%, 5% e 6% do óleo de algodão refinado são classificados para tráfego padrão.



Melo Neto *et al.* [21] e Mendonça *et al.* [22] apontam em seu estudo que outro parâmetro analisado no ensaio MSCR é a recuperação elástica. Ligantes asfálticos com Jnr elevado, isto é, ligantes que possuem faixa elevada não recuperável, não existe recuperação elástica mínima especificada. A porcentagem de recuperação MSCR (%) pode identificar e quantificar o efeito do aditivo no ligante. Aumento nos valores percentuais deste parâmetro resulta na melhoria de uma modificação do ligante para manter características elásticas em altos níveis de tráfego. A Figura 5 apresenta os valores de recuperação elástica para os ligantes modificados com o óleo de algodão refinado.



**Fig.5** Recuperação elástica a 0,1 kPa e 3,2 kPa para os ligantes puro e modificados

A adição do óleo de algodão refinado promoveu a redução do percentual de recuperação do material no nível de tensão de 3,2 kPa para todas as amostras. Diante das análises dos parâmetros de compliância não recuperável e porcentagem de recuperação elástica, o ligante asfáltico modificado com óleo de algodão refinado apresentou tendência ao aumento do percentual de recuperação a 0,1 kPa para todas as amostras modificadas. Portanto, o ligante asfáltico modificado que apresentou melhores resultados em relação à suscetibilidade à deformação e à recuperação elástica foi a amostra com adição de 6% de óleo de algodão refinado, apresentando capacidade de manter suas características elásticas em altos níveis de tráfego.

Ao considerar a hipótese do uso do óleo de algodão no teor de 6% como modificador do ligante asfáltico para produção de misturas asfálticas é possível inferir o custo de produção de misturas asfálticas por meio de uma dosagem asfáltica. Nos estudos de Cruz *et al.* [23] e Carvalho *et al.* [24] a média de consumo de ligante asfáltico para a produção de misturas asfálticas foi de 5% com agregados graníticos e 6,5% para misturas com agregados lateríticos. Considerou-se um custo médio do litro de óleo de algodão de R\$15,30 e analisou-se o custo para a produção de 1 tonelada de mistura asfáltica a quente segundo uma composição de custo (Usinagem de concreto asfáltico com cimento asfáltico de petróleo 50/70 para camada de rolamento, padrão DNIT faixa C, em usina de asfalto gravimétrica de 150 t/h) disponibilizada pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) do ano de 2021. Para a produção de uma tonelada de mistura asfáltica com agregados graníticos e 5% de ligante asfáltico convencional o custo foi de R\$391,32 e ao modificar o ligante asfáltico com 6% de óleo de algodão o custo passou a ser R\$437,22, ou seja, um aumento de 11,73% no custo de produção. Ao analisar a mesma composição de misturas asfálticas, mas com o uso de agregados lateríticos e um consumo de ligante asfáltico de 6,5% o custo foi de R\$457,60 e ao modificar o ligante com 6% de óleo de algodão o custo passou a ser R\$517,27, um acréscimo de 13,04%. Portanto, por meio da análise de custos para a produção de misturas asfálticas a quente

com o maior teor de óleo de algodão testado pôde-se perceber um aumento nos custos de produção, cabendo ao gestor verificar até em que ponto compensa a modificação do ligante asfáltico ou qual o teor é mais viável economicamente. Além disso, é válido ressaltar que a redução das temperaturas de produção das misturas asfálticas influencia de forma positiva o meio ambiente, minimizando a quantidade de gases poluentes gerados nesse processo industrial.

#### 4. Conclusão

O óleo de algodão refinado apresenta grande percentual de ácido oleico, o que provavelmente aumentou a estabilidade de ligantes asfálticos à oxidação, ou seja, retardou o envelhecimento do ligante asfáltico, tornando-o mais durável. Ao analisar os resultados obtidos por meio do ensaio de viscosidade rotacional, percebeu-se que quanto maior o teor de óleo adicionado ao ligante asfáltico, menor a viscosidade. Por meio de interpolação, encontraram-se as temperaturas ideais para as misturas asfálticas, apresentando redução maior à medida que se aumentou o teor de óleo de algodão, sendo mais significativa com o teor de 6% (10°C). Assim, o óleo de algodão refinado se apresentou como um bom modificador redutor de viscosidade e de temperatura de trabalho para as misturas asfálticas, onde todos os teores testados foram classificados para uso em rodovias de tráfego padrão. Entretanto, é preciso realizar uma análise mais aprofundada dos custos de produção de misturas asfálticas com o óleo de algodão a fim de viabilizar seu uso, assim como um estudo de ciclo de vida dessas misturas.

#### Referências

1. Zhang, X., Zhang, K., Wu, C., Liu, K., Jiang, K., *Preparation of bio-oil and its application in asphalt modification and rejuvenation: A review of the properties, practical application and life cycle assessment*. Construction and Building Materials, 2020. **262**. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120528>
2. Wang, H., Ma, Z., Chen, X., Hasan, M.R.M., *Preparation process of bio-oil and bio-asphalt, their performance, and the application of bio-asphalt: A comprehensive review*. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 2020. **7**: p. 137-151. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2020.03.002>
3. Gao, J., Wang, H., You, Z.; Hasan, M.R.M. *Research on properties of bio-asphalt binders based on time and frequency sweep test*. Construction and Building Materials, 2018. **160**: 786-793. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.048>
4. Wang, C., Xue, L., Xie, W., You, Z., Yang, X. *Laboratory investigation on chemical and rheological properties of bioasphalt binders incorporating waste cooking oil*. Construction and Building Materials, 2018. **167**: p. 348-358. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.038>
5. He, M., Tu, C., Cao, D.W., Chen, Y.J. *Comparative analysis of bio-binder properties derived from different sources*. International Journal of Pavement Engineering, 2017. **20**: p. 792-800. DOI: <https://doi.org/10.1080/10298436.2017.1347434>
6. Ferrotti, G., Ragni, D., Lu, X., Canestrari, F. *Effect of warm mix asphalt chemical additives on the mechanical performance of asphalt binders*. Materials and Structures, 2017. **50**. DOI: <https://doi.org/10.1617/s11527-017-1096-5>
7. Singh, S., Ransinchung, G. *Durability properties of pavement quality concrete containing fine RAP*. Advances in Civil Engineering Materials, 2018. **7**: p. 271-290.
8. Liu, K., Fu, C., Xu, P., Li, S., Huang, M. *An eco-friendliness inductive asphalt mixture comprising waste steel shavings and waste ferrites*. Journal of Cleaner Production, 2021. **283**. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124639>
9. Liu, K., Xu, P., Wang, F., Jin, C., Liu, Q., Pang, H., Xie, H. *The accumulated stress damage and residual life prediction of unreinforced concrete pavement with electric heating pipes*. Construction and Building Materials, 2021. **278**. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cobuildmat.2021.122258>

10. Garber, L.A., Hoel, N.J., *Traffic and highway engineering*, 2001. Pacific Groove.
11. D'Angelo, J., Harm, E., Bartoszek, J., Baumgardner, G., Corrigan, M., Cowser, J., et al., *Warm-mix asphalt: European practice*, 2008. USA: Department Transportation.
12. Lucena, L.C.F.L., Silveira, I.V., Costa, D.B., *Avaliação de ligantes asfálticos modificados com óleo da Moringa Oleífera Lam para uso em misturas mornas*. Revista Matéria, 2016. **21**: p. 72-82. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620160001.0007>
13. Sun, Z., Yi, J., Huang, Y., Feng, D., Guo, C., *Properties of asphalt binder modified by bio-oil derived from waste cooking oil*. Construction and Building Materials, 2016. **102**. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.173>
14. Souza, J.L.S., *Estudo das Propriedades Mecânicas de Misturas Asfálticas com Cimento Asfáltico de Petróleo Modificado com Óleo de Mamona*. Dissertação de M.Sc. Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal de Campina Grande, 2012.
15. Zeng, M., Li, J., Zhu, W., Xia, Y., *Laboratory evaluation on residue in castor oil production as rejuvenator for aged paving asphalt binder*. Construction and Building Materials, 2018. **193**: p. 276-285. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.204>
16. Girimath, S., Singh, D. *Effects of bio-oil on performance characteristics of base and recycled asphalt pavement binders*. Construction and Building Materials, 2019. **227**. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116684>
17. Nogueira, R.L., Soares, J.B.S., Soares, S.A., *Rheological evaluation of cotton seed oil fatty amides as a rejuvenating agent for RAP oxidized asphalts*. Construction and Building Materials, 2019. **223**: p. 1145-1153. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.128>
18. Melo Neto, O.M., Mendonça, A.M.G.D., Rodrigues, J.K.G., Lima, R.K.B., Silvani, C., Silva, I.M. *Rheological study of asphalt binder modified by cotton and copaiba oils*. Revista Cubana de Ingeniería, 2022. **1**: p. 1-11.
19. Faxina, A.L., *Estudo da viabilidade técnica do uso do resíduo de óleo de xisto como óleo extensor em ligantes asfalto-borracha*. Tese de D.Sc., Universidade Estadual de São Paulo, 2006.
20. Portugal, A.C.X., *Avaliação reológica de cimentos asfálticos de petróleo modificados com óleo de soja e de milho*. Dissertação de M.Sc., Universidade Federal de Campina Grande, 2016.
21. Melo Neto, O.M., Ferreiro, A.A., Freire, T.S., Silva, G.C.B., Lucena, L.C.F.L., Sousa Neto, V.F., *Rheological Analysis of Asphalt Binders Modified with Hydrated Lime and Titanium Dioxide Nanoparticles*. International Journal for Innovation Education and Research, 2020. **8**: p. 579-598. DOI: <https://doi.org/10.31686/ijer.vol8.iss11.2787>
22. Mendonça, A.M.G.D., Melo Neto, O.M., Rodrigues, J.K.G., Silvani, C., Lima, R.K.B., *Physicochemical and rheological effects of the incorporation of micronized polyethylene terephthalate in asphalt binder*. Petroleum Science and Technology, 2022. **40**. DOI: <https://doi.org/10.1080/10916466.2021.2007124>
23. Cruz, G.K.A., Melo Neto, O.M., Arruda, S.M., Lucena, L.C.F.L., Ziegler, C.R., Silva, G.C.B., *Influence of particle size selection methods on asphalt mixtures produced with lateritic aggregates*. Construction and Building Materials, 2022. **314**. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125201>
24. Carvalho, F.S.S., Lucena, A.E.F.L., Melo Neto, O.M., Porto, T.R., Porto, T.M.R., *Análise dos parâmetros mecânicos das misturas asfálticas com adição de óxidos metálicos*. Revista Matéria, 2021. **26**. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-70760210003.13020>

### Conflito de Interesses

Nenhum potencial de interesse competitivo foi relatado pelos autores.

### Contribuição dos autores

**Ana Maria Gonçalves Duarte Mendonça.** ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4595-2959>

Elaboração da conceituação, metodologia, supervisão, validação, redação, edição e revisão do manuscrito.

**Osires de Medeiros Melo Neto.** ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2535-0969>

Metodologia, supervisão, validação, redação, edição e revisão do manuscrito.

**John Kennedy Guedes Rodrigues.** ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0340-5567>

Metodologia, supervisão, validação, redação, edição e revisão do manuscrito.

**Ivna de Sousa Dantas.** ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2776-2537>

Metodologia, supervisão, validação, redação, edição e revisão do manuscrito.

**Ingridy Minervina Silva.** ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2538-9166>

Metodologia, supervisão, validação, redação, edição e revisão do manuscrito.

**Daniel Beserra Costa.** ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8362-2582>

Metodologia, supervisão, validação, redação, edição e revisão do manuscrito.

**Robson Kel Batista de Lima.** ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6917-9895>

Redação, edição e revisão do manuscrito.