

ESTUDO DAS PROPRIEDADES REOLÓGICAS DO LIGANTE ASFÁLTICO MODIFICADO POR ADIÇÃO DE LIGNINA

Nataliene Silva dos Santos ¹
Rita Flávia Régis Queiroz ²
Jeovanesa Régis Carvalho ³
John Kennedy Guedes Rodrigues ⁴

RESUMO

A degradação dos revestimentos asfálticos pela ação do tráfego e intempéries tem levado ao desenvolvimento de pesquisas na busca de novas tecnologias visando melhorar qualidade e durabilidade dos pavimentos asfálticos. Os polímeros sintéticos são materiais largamente empregados na pavimentação em virtude do melhor desempenho que proporcionam, comprovados através de estudos de laboratório e quando testados em campo. Contudo, o mundo caminha na busca de soluções sustentáveis e portanto, de materiais que proporcionem melhores propriedades ao ligante asfáltico e sejam ambientalmente viáveis, a exemplo de produtos aproveitados de processos industriais. A lignina é um polímero natural produzida em milhões de toneladas ao ano como um subproduto da indústria de papel e celulose, extraída da madeira como um licor negro. O objetivo dessa pesquisa foi avaliar as propriedades reológicas do ligante asfáltico modificado pela adição da lignina nos teores de 1,0%, 1,5%, 2,0%, 2,5% e 3,0%. Foram realizados Ensaio Reológico Convencionais (Penetração, Ponto de Amolecimento e parâmetro Índice de Susceptibilidade Térmica) e Ensaio Reológico Fundamentais (Viscosidade Rotacional, Grau de Performance – PG e Fluência e Recuperação sob Tensões Múltiplas-MSCR). Os resultados mostraram maior resistência às deformações permanentes, às variações de temperatura e ao envelhecimento proporcionados pela lignina. Embora todos os teores tenham apresentado propriedades superiores ao ligante asfáltico puro, o teor de 3,0% de lignina obteve o melhor desempenho. Portanto, a lignina como agente modificador do ligante asfáltico apresentou um bom desempenho em relação às propriedades reológicas e mostrou-se uma alternativa e ambientalmente viável.

Palavras-chave: Ligante asfáltico, lignina, propriedades reológicas.

INTRODUÇÃO

No Brasil, de forma semelhante a outros países, as rodovias necessitam de constantes avaliações e renovações devido às deteriorações que ocorrem principalmente no pavimento asfáltico. Essas deteriorações possuem origem em defeitos de projeto, má execução durante o processo construtivo, utilização de materiais de baixa qualidade para atender às solicitações

¹ Mestre pelo Curso de **Engenharia Civil e Ambiental** da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, natalienesslim@hotmail.com;

² Mestranda do Curso de **Engenharia Civil e Ambiental** da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, flaviarq18@gmail.com;

³ Doutoranda do Curso de **Engenharia Civil e Ambiental** da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, jeovanesaregis@gmail.com;

⁴ Doutor pelo Curso de **Engenharia de Transportes** da Universidade de São Paulo - USP, profkennedy@hotmail.com.

do projeto e as condições climáticas (CRAVO, 2016). Para otimizar as propriedades a modificação das misturas asfálticas com polímeros tem sido amplamente realizada. Além disso os aditivos proporcionam economia, pois melhoram o desempenho do pavimento asfáltico e levando ao aumento da sua vida útil.

Em conjunto com a busca por modificadores que elevem o desempenho do pavimento asfáltico existe a preocupação com a sustentabilidade, com isso há uma tendência na busca de tecnologias que utilizem modificadores naturais como óleos vegetais de mamona, algodão, soja, milho e moringa (SOUZA et al. 2012, SILVEIRA et al., 2014; CAVALCANTE, 2016; CARVALHO, 2018), e do oriundos do reaproveitamento processos industriais como é o caso de estudos pioneiros à partir da adição de lignina.

A lignina é obtida em larga escala como um subproduto da indústria do papel e celulose (SANTOS, 2008) e só é menos abundante nas plantas do que a celulose. Apesar de não possuir estrutura inteiramente conhecida, apresenta-se como um constituinte da madeira cuja presença é fundamental para a rigidez das células e tecidos (CABANÉ et al., 2004; TAIZ e ZEIGER, 2009). De acordo com Longue Júnior & Colodette (2013) esse setor industrial não está mais produzindo apenas papel e celulose, mas fazendo um melhor aproveitamento das matérias-primas, dentre as quais está a lignina que é recuperada durante o processo de fabricação. A mesma pode ser aproveitada como fonte de energia através da queima que ocorre na própria indústria, sendo esta sua destinação final principal, contudo ainda existe um grande excedente desse material que é apenas descartado (OLIVEIRA, 2015). Para evitar o descarte inadequado no ambiente estão sendo investigadas alternativas para seu emprego, gerando ainda renda extra aos fabricantes de papel.

As moléculas de lignina possuem uma estrutura molecular formada por monômeros que não se repetem regularmente e unidas por diversas ligações químicas (CORRERIA, 2011). Devido à falta de regularidade na repetição dos monômeros, as ligninas apresentam-se diferentes dependendo da sua posição, da espécie e idade da planta. Ela é um composto aromático complexo, com estrutura macromolecular semelhante aos componentes do CAP (BOTARO et al., 2006). Essa semelhança também é observada entre o asfalto e os polímeros, e esse fator é essencial para a compatibilidade entre os dois materiais e assim obter um desempenho superior do asfalto, podendo trazer melhorias a suas propriedades reológicas.

A reologia é o estudo do fluxo e deformação dos materiais em termos de elasticidade e viscosidade. O comportamento reológico do ligante asfáltico está associado a diversos fatores, como grandes variações de temperatura, carregamentos do tráfego, estar sujeito a diferentes frequências de carregamento, o envelhecimento que leva a modificações na sua estrutura

química, dentre outros (SOBREIRO, 2014). O estudo da reologia para os pavimentos asfálticos tem por finalidade encontrar relacionar deformação, tensão, tempo de aplicação de carga e temperatura (BRINGEL, 2007). O estudo dessas propriedades é indispensável para compreender o comportamento do ligante quando submetido às tensões do tráfego e variações de temperatura.

Portanto, o objetivo dessa pesquisa é avaliar o comportamento reológico do CAP 50/70 modificado pela adição de lignina. Pretende-se à partir desse estudo reduzir os gastos do ligante modificado com polímeros que apresenta custos elevados, evitar a disposição da lignina como resíduo em locais inapropriados e tornar o ligante modificado mais sustentável, uma vez que o agente modificador é um material renovável.

METODOLOGIA

Materiais

- **Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP):** O CAP utilizado nessa pesquisa foi classificado por penetração como CAP 50/70 e foi doado pela empresa foi doado pela Empresa JBR Engenharia LTDA.
- **Lignina:** foi obtido um licor negro contendo a lignina do Laboratório de celulose papel da Universidade Federal de Viçosa (UFV) em Minas Gerais. O processo para obter a lignina utilizada nesse estudo é descrito à seguir.

Para obtenção da lignina propriamente dita, será descrito a seguir o procedimento de precipitação utilizado a fim de separar do licor negro a fração do material destinado à esta pesquisa.

Métodos

Obtenção da lignina

A lignina obtida estava contida em um licor negro, para extração e utilização na presente pesquisa foram realizadas três etapas:

- correção de pH adicionando ácido clorídrico até o material ser enquadrado em uma classificação próxima de 7;
- filtração à vácuo que foi realizada utilizando filtro de papel em um funil de Büchner acoplado a um Kitassato, e uma mangueira conectada a uma bomba a

vácuo. Dessa forma quando o material passava pela aparelhagem, a diferença de pressão causava a sucção do líquido restando o sólido no filtro;

- secagem em estufa à temperatura de 60°C que foi realizada no material sólido e seco que restou no filtro, em seguida foi destorroado no almofariz e passado na peneira N°7 apresentando por fim consistência em pó.

Todo o procedimento descrito foi realizado no Laboratório de Engenharia Química da UFCG. As etapas anteriormente descritas são apresentadas na Figura 1.

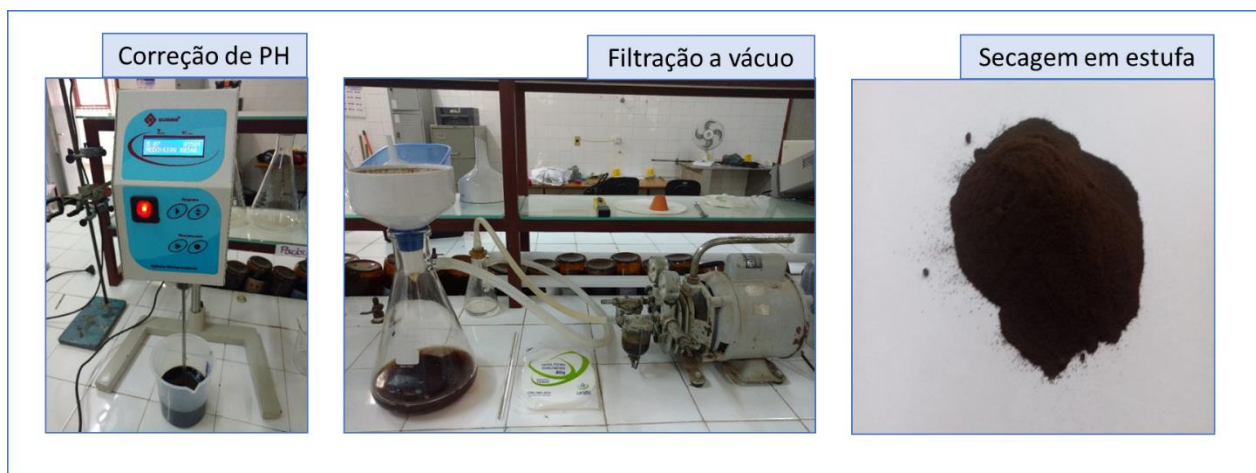


Figura 1: Etapas para obtenção da lignina utilizada na pesquisa

Realização das misturas

As misturas foram realizadas entre o CAP convencional 50/70 e a lignina nos teores em peso de 1,0%; 1,5%; 2,0%; 2,5% e 3,0%. As misturas foram preparadas no misturador mecânico FISATOM modelo 722 com especificações de: 2000 rpm de rotação, durante 30 minutos e a 160°C. O procedimento de mistura é ilustrado na Figura 2.



Figura 2: Procedimento de mistura

Procedimento de envelhecimento a curto prazo (RTFO)

O procedimento RTFO simula o efeito do envelhecimento a curto prazo que ocorre devido à usinagem, transporte, distribuição e compactação da mistura asfáltica no pavimento. O procedimento foi realizado na temperatura $163 \pm 0,5^\circ\text{C}$, em que amostras de 35g de ligante asfáltico foram colocadas em frascos de vidro em um sistema giratório de uma estufa. As amostras recebiam injeções de ar a uma vazão de 4000 ± 200 ml/min, e o ensaio teve duração total de 85 minutos. O procedimento é regido pela norma *American Society for Testing and Materials – ASTM D2572-97(2010)*, e após a sua conclusão foram realizados ensaios reológicos novamente para verificar o efeito do envelhecimento nos ligantes estudados.

Ensaio reológicos convencionais

Foram realizados ensaios reológicos convencionais com o ligante convencional (CAP 50/70) e os ligantes modificados com adição de lignina, em amostras antes e após o envelhecimento RTFO. As normas que regem os ensaios são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Normas dos ensaios reológicos convencionais

REOLOGIA CONVENCIONAL	
ENSAIO	NORMA
Penetração	DNIT 155/2010
Ponto de amolecimento	DNIT 131/2010

Ensaio reológico especiais

Foram realizados também ensaios reológicos especiais baseados na metodologia SUPERPAVE para as amostras de ligante convencional (CAP 50/70) e ligantes modificados com adição de lignina, em amostras antes e após o envelhecimento à curto prazo RTFO. Esses ensaios são descritos à seguir.

Viscosidade Rotacional

O ensaio de Viscosidade Rotacional é regido pela norma ABNT NBR 15184:2007. A viscosidade é medida através do torque necessário para girar uma haste de prova (spindle) imersa na amostra de amostra de ligante asfáltico. O ensaio é realizado em três temperaturas 135°C, 150°C e 177°C e o equipamento foi o viscosímetro Brookfield, modelo DV-III ULTRA, acoplado a um controlador de temperatura THERMOSEL conforme a Figura 3. Além disso foram utilizados o spindle nº21 para a amostra do CAP convencional e um spindle nº 27 para as amostras de CAP modificadas pela lignina.

Grau de Desempenho – PG

Através do reômetro de cisalhamento dinâmico, de modelo Discovery Hybrid Rheometer - DHR 1 conforme a Figura 3, foram caracterizadas as propriedades viscoelásticas das amostras de ligante asfáltico, onde foram medidos os parâmetros Módulo Complexo (G^*) e Ângulo de Fase (δ) que indicam, respectivamente, rigidez e elasticidade. Então foi determinado o Grau de Desempenho (PG) do ligante regido pela norma ASTM D 6373-16, o PG é obtido pela temperatura na qual o parâmetro $G^*/\text{sen}\delta$ é superior a 1,0 KPa para o ligante antes do envelhecimento e superior a 2,2 KPa depois do envelhecimento RTFO.



Figura 3: Reômetro de cisalhamento dinâmico

Fluência e recuperação sob tensões múltiplas – MSCR

O ensaio é normatizado pela ASTM D7405-15 e foi realizado para as amostras envelhecidas pelo RTFO na máxima temperatura de PG para obter os parâmetros compliança não-recuperável – Jnr e porcentagem de recuperação – R(%). No ensaio são realizados 20 ciclos de 10 segundos, nos níveis de tensão de 100 e 3200 Pa. Em cada ciclo é aplicado o carregamento de fluência de 1 segundo seguido por um período de relaxamento de 9 segundos. O equipamento utilizado foi o reômetro oscilatório Discovery HR-1 hybrid rheometer.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ensaio de Reologia Convencional

Penetração

O ensaio de penetração é um indicativo mede do ligante à temperatura de 25°C e é um indicativo da rigidez do pavimento. Na Figura 4 são apresentados os resultados de penetração das amostras de CAP convencional e modificado, antes e após o envelhecimento RTFO.

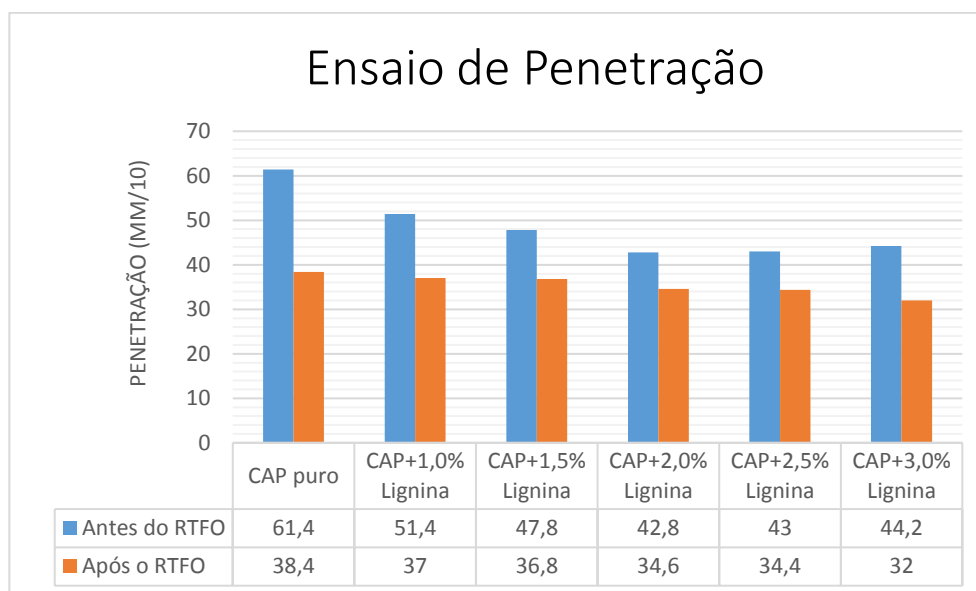


Figura 4: Resultados do ensaio de penetração

Por meio dos resultados é possível observar que a adição da lignina reduziu a penetração dos ligantes antes e após o envelhecimento RTFO. Essa redução é um indicativo empírico de aumento na rigidez e da resistência às deformações permanentes.

A resolução ANP nº 19/2005 para esse parâmetro estabelece o intervalo de penetração entre 50 e 70 décimos de milímetro, e esses valores são utilizados para classificação do ligante. O ligante convencional se apresentou dentro do intervalo estabelecido em norma, contudo os ligantes modificados não estão dentro do intervalo pois houve redução nos valores de penetração, contudo isso não compromete sua utilização.

Através dos resultados observa-se uma redução nos valores de penetração nos ligantes envelhecidos indicando maior rigidez, de acordo com Bulovatic et al. (2014) essa elevação da rigidez se deve ao aumento de asfaltenos devido ao processo de envelhecimento, que modifica sua composição química. Comparando os resultados antes e após o envelhecimento RTFO

O envelhecimento RTFO é avaliado através do parâmetro Porcentagem de Penetração Retida – PPR, que avalia a sensibilidade aos fatores que causam o envelhecimento. O parâmetro é obtido pela razão entre os dados de penetração antes e após o RTFO, e de acordo com a ANP nº 19/2005 o valor mínimo é de 55%, assim quanto maior o parâmetro maior a resistência do ligante à oxidação. A Figura 5 ilustra os resultados para a mostra de CAP convencional e modificadas.

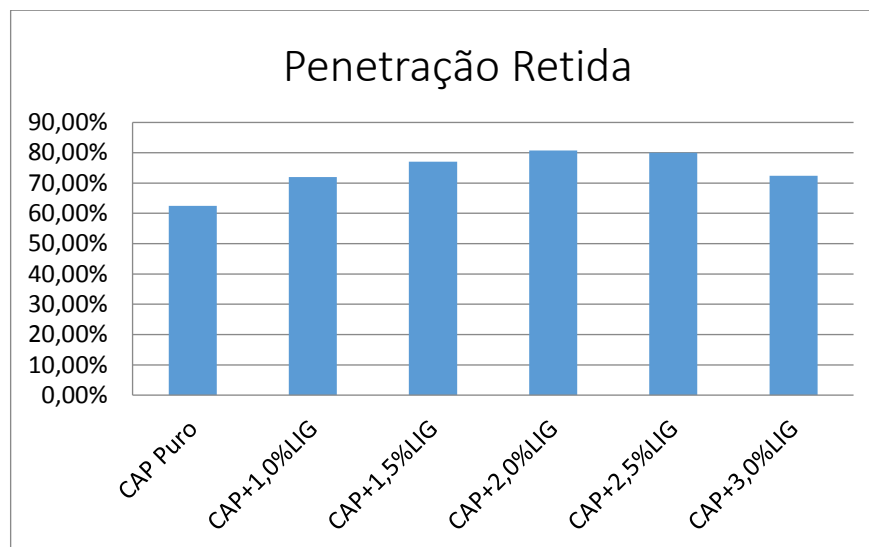


Figura 5: Resultados de Porcentagem de Penetração Retida

À partir dos valores observados percebe-se que a modificação do ligante asfáltico com a lignina proporcionou uma resistência ao envelhecimento superior ao ligante convencional 50/70. Para todos os ligantes modificados a penetração retida foi superior a 70%, com destaque para a modificação de CAP 50/70 + 2,0% de Lignina que obteve o melhor resultado (81%). Botaro et al. (2006) estudou a adição dos teores entre 1,0 e 6,0% de lignina obtida do bagaço da cana-de-açúcar na obtenção de CAP 20 e os resultados mostraram a tendência de

ganho de resistência a partir da redução dos valores de penetração, corroborando com os resultados encontrados.

Ponto de Amolecimento

O Ponto de amolecimento é uma medida empírica da consistência do ligante, em que determina-se a temperatura na qual o material adquire uma certa condição de escoamento. Esse parâmetro é um indicativo se o ligante asfáltico é capaz de manter suas propriedades em temperaturas elevadas e apresenta maior resistência à deformação permanente. Os resultados para os ligantes puro e modificados, antes e após o envelhecimento RTFO, são apresentados na Figura 6.

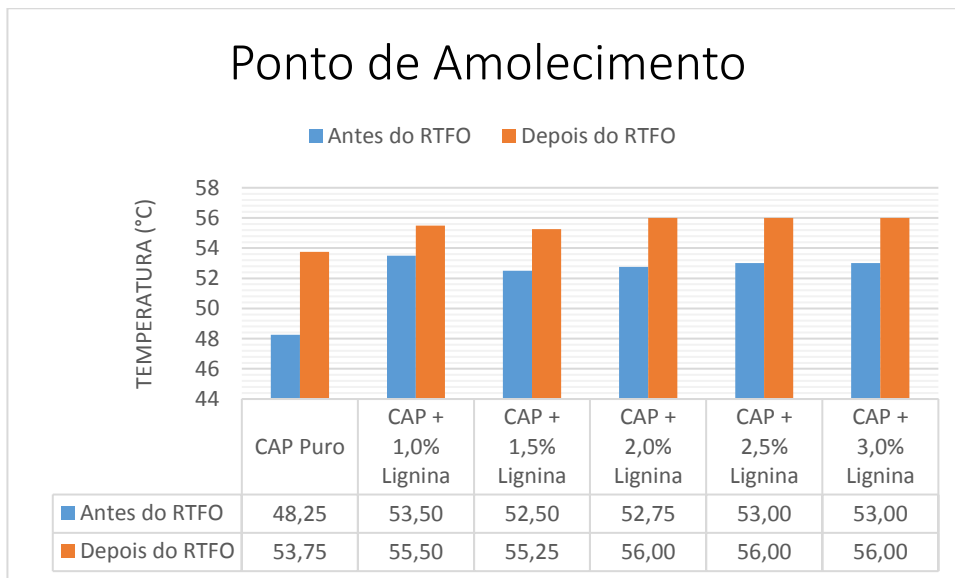


Figura 6: Resultados de Ponto de Amolecimento

Com base nos resultados obtidos, a modificação do ligante asfáltico 50/70 com o aditivo proposto levou ao aumento do ponto de amolecimento, com tendência de acréscimo para maiores teores de lignina. O acréscimo as temperaturas de ponto de amolecimento é um resultado desejado, segundo Bulatovic (2014) um ligante asfáltico que apresenta maior ponto de amolecimento é menos susceptível às temperaturas e deformações permanentes, sendo capaz de manter suas propriedades mesmo em temperaturas mais elevadas.

A resolução ANP nº 19/2005 estabelece que a temperatura mínima de ponto de amolecimento do CAP 50/70 é 46°C, portanto os ligantes puro e modificado apresentaram-se dentro desse limite. O envelhecimento à curto prazo RTFO é avaliado em termos de variação de ponto de amolecimento antes e após o RTFO, assim é analisada a sensibilidade do ligante aos fatores que causam seu envelhecimento. A resolução ANP nº 19/2005 também estabelece

a maior diferença de ponto de amolecimento, que não deve exceder 8°C, portanto todos os ligantes ensaiados encontram-se dentro do limite estabelecido conforme observa-se na Figura 7.

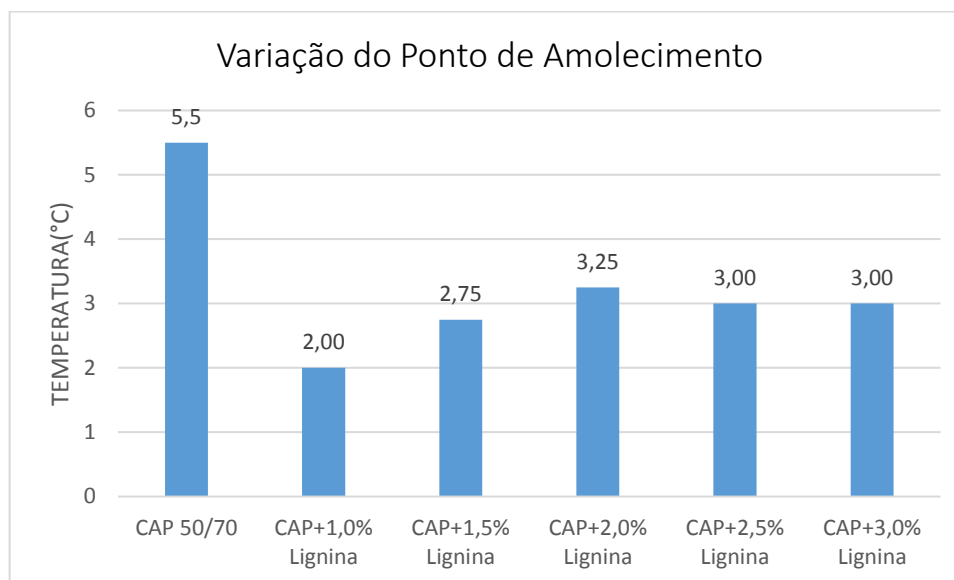


Figura 7: Variação de Ponto de amolecimento antes e após o RTFO

Através dos resultados foi possível perceber uma menor variação dos pontos de amolecimento nos ligantes modificados, esse parâmetro é um indicativo da menor sensibilidade do ligante ao envelhecimento, e portanto, maior resistência à oxidação promovida pela lignina.

Índice de Susceptibilidade Térmica

À partir dos valores obtidos na Penetração e Ponto de Amolecimento calculou-se o Índice de Susceptibilidade Térmica (IST) conforme é apresentado na Tabela 2. Esse parâmetro indica a sensibilidade do ligante à variação de temperatura, a norma DNIT 095/2006 define que a faixa de valores do IST para o CAP 50/70 é entre (-1,5) a (+0,7). De acordo com Bernucci et al.(2008) valores de IST maiores do que (+1,0) indicam asfalto oxidado e menores do que (-2,0) indicam asfaltos muito sensíveis às variações de temperatura.

Tabela 2: Valores de Índice de Susceptibilidade Térmica - IST

AMOSTRAS	IST
CAP 50/70	-1,16
CAP+1,0% Lignina	-0,29
CAP+1,5% Lignina	-0,69
CAP+2,0% Lignina	-0,88
CAP+2,5% Lignina	-0,81
CAP+3,0% Lignina	-0,75

Observa-se que todos os ligantes atenderam as especificações de valores apresentados em norma, os ligantes modificados apresentaram valores de IST maiores em relação ao ligante base (CAP 50/70) indicando uma elevação na rigidez proporcionada pela lignina, assim os ligante modificados se mostraram menos sensíveis ao efeito da variação de temperatura.

Ensaio de Reologia Fundamental

Viscosidade Rotacional

A viscosidade do ligante asfáltico está relacionada com a sua capacidade em envolver os agregados na mistura e a sua trabalhabilidade durante o transporte e usinagem em campo, sendo possível então determinar as temperaturas de usinagem e compactação. Os resultados de viscosidade à 135°C, 150°C e 177°C antes e após o envelhecimento são apresentados na Figura 8.

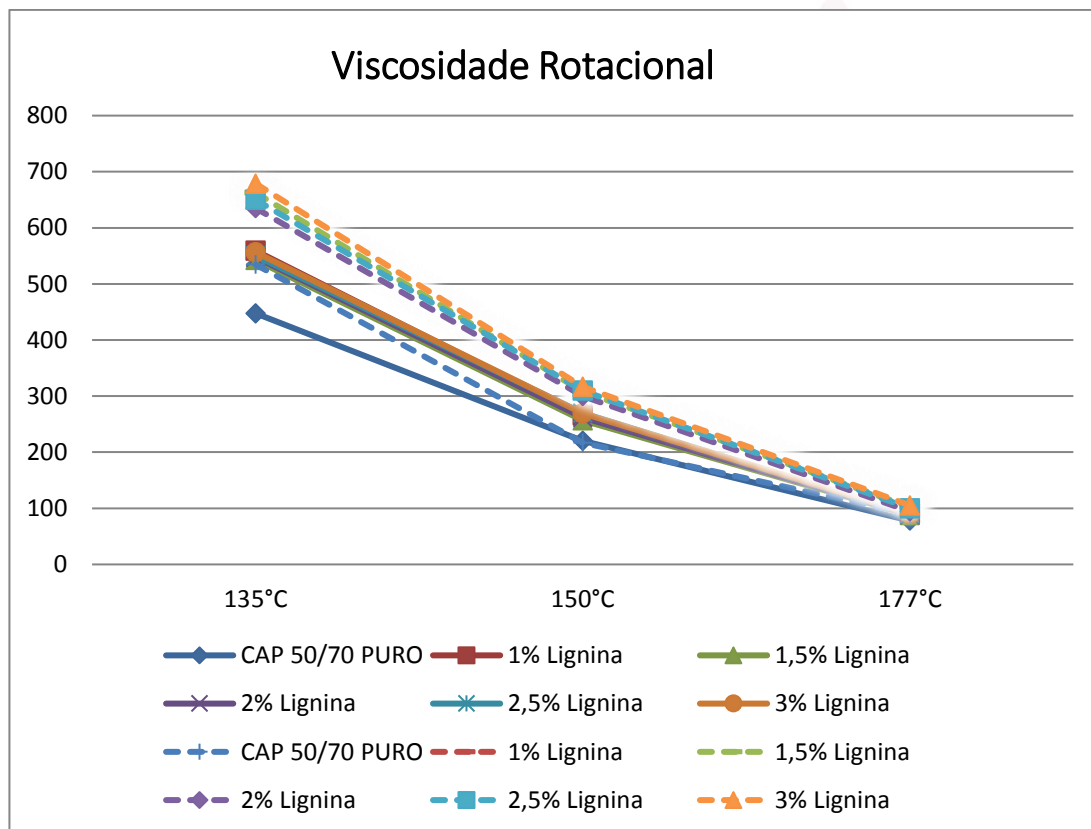


Figura 8: resultados de viscosidade dos ligantes puro e modificados, antes e após o envelhecimento RTFO

As linhas contínuas representam os resultados dos ligantes puro e modificados antes do envelhecimento RTFO, e as linhas pontilhadas os resultados após esse envelhecimento. Observando primeiramente os ligantes antes do envelhecimento, percebe-se um aumento significativo da viscosidade para os ligantes modificados, e esse aumento é tanto maior quanto o teor de lignina, especialmente as menores temperaturas (135°C e 150°C), indicando maior rigidez proporcionada pelo aditivo. O teor de 3,0% merece destaque, foi o teor que apresentou os maiores valores de viscosidades nas três temperaturas ensaiadas.

Ao comparar os ligantes antes e após o envelhecimento RTFO, observa-se que os ligantes asfálticos envelhecidos apresentam maiores viscosidades, conforme já esperado devido ao aumento da rigidez originado pela oxidação que o envelhecimento gera no asfalto. Os ligantes envelhecidos apresentam a mesma tendência observada anteriormente, viscosidades das amostras modificadas pela lignina significativamente maiores do que o ligante puro, e viscosidades crescentes para maiores teores do modificador. O teor de 3,0% mais uma vez merece destaque, foi o teor dentre os ligantes envelhecidos que apresentou maiores viscosidades.

A Resolução ANP nº 19/2005 estabelece em relação aos valores de viscosidade os limites mínimos de 264 cP na temperatura de 135°C, 112 cP na temperatura de 150°C e o intervalo de 28-114 cP para a temperatura de 177°C, todos os limites foram obedecidos pelos ligante ensaiados.

Grau de Desempenho (PG)

Na Figura 9 são apresentados os resultados do Grau de Performance (PG) para os ligantes antes e após o envelhecimento RTFO.

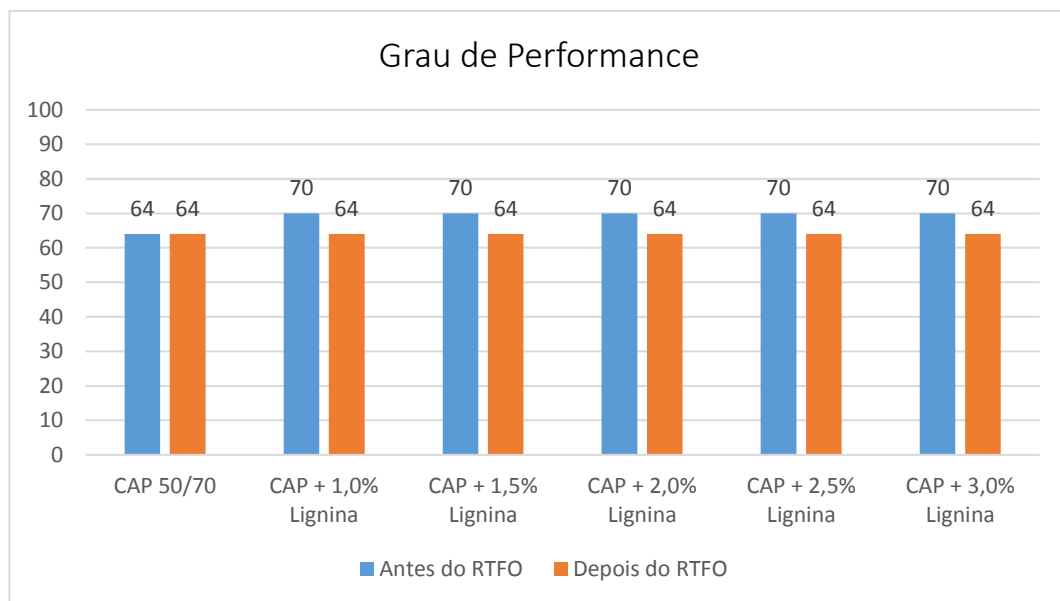


Figura 9: Grau de Performance - PG dos ligantes puro e modificados

Através dos resultados é possível perceber que os teores de lignina incorporados ao ligante asfáltico elevaram o grau de desempenho em relação ao ligante puro antes do envelhecimento, contudo nas amostras envelhecidas os valores de PG dos ligantes com adição de lignina não apresentaram variação em relação ao ligante puro.

O ensaio foi realizado considerando apenas as temperaturas máximas (PG máximo) devido ao clima tropical do Brasil, onde dificilmente um pavimento no território brasileiro será submetido a temperaturas inferiores a zero. O Grau de Performance é obtido tendo como valor mínimo 1,0 KPa antes do envelhecimento RTFO e 2,2, KPa após o envelhecimento, de acordo com a especificação SUPERPAVE.

Nas Figuras 10 e 11 são apresentados o parâmetro $G^*/\text{sen } \delta$ antes e após o envelhecimento RTFO respectivamente, obtido também através do ensaio de PG. Além de indicar a máxima temperatura de desempenho do ligante asfáltico, esse parâmetro representa a resistência à deformação permanente em relação à elasticidade.

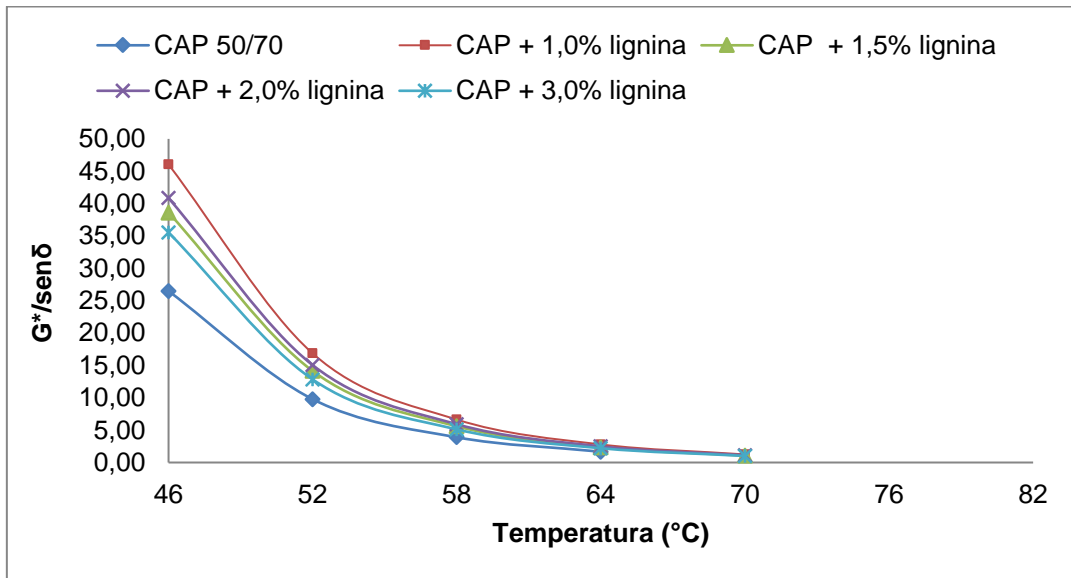


Figura 10: Parâmetro $G^*/\text{sen } \delta$ antes do envelhecimento RTFO

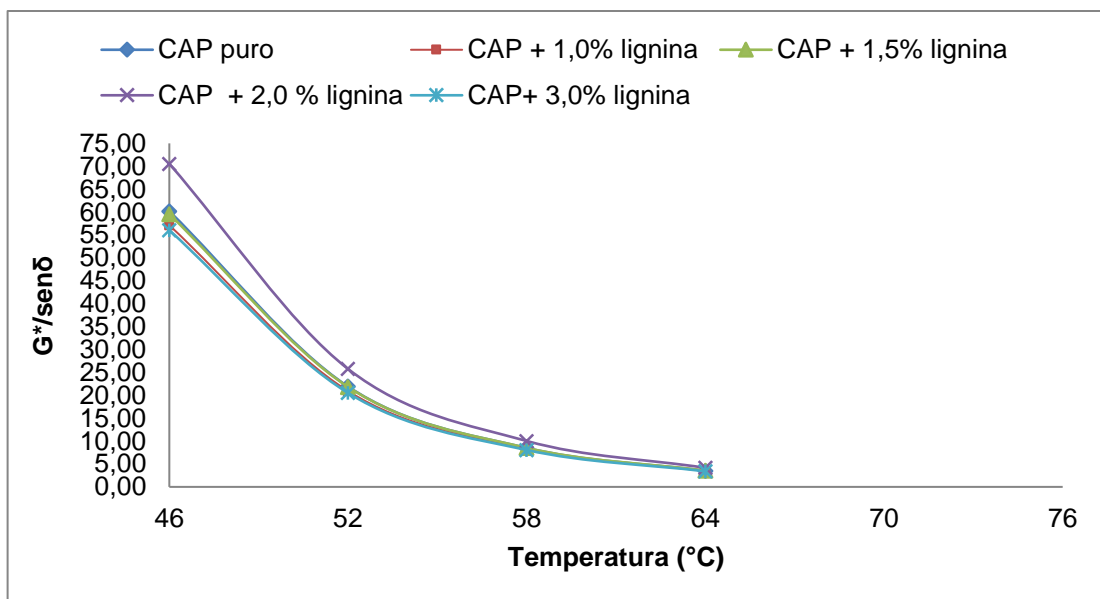


Figura 11: Parâmetro $G^*/\text{sen } \delta$ depois do envelhecimento RTFO

Através das Figuras 10 e 11 é possível comparar o parâmetro $G^*/\text{sen } \delta$, assim como os módulos complexos G^* , antes e após o RTFO, pois o gráfico do módulo complexo G^* é muito semelhante ao apresentado. Analisando o gráfico da Figura 9 antes do envelhecimento, percebe-se que a adição da lignina levou ao aumento da rigidez do ligante asfáltico, e consequentemente da resistência à deformação permanente.

Contudo, a elevação da rigidez não está necessariamente relacionada com a melhoria do desempenho do ligante em elevadas temperaturas, conforme Gama (2016) e Nuñez et al.,

(83) 3322.3222 (2014) chegaram a essa conclusão ao comparar os ensaios de PG com MSCR. Esse

comportamento pode ser justificado pela interação entre as partículas do polímero disperso e não necessariamente devido à maior resistência do ligante em si.

As figuras 12 e 13 apresentam os ângulos de fase dos ligantes puro e modificados antes e após o envelhecimento RTFO, respectivamente. Os ângulos de fase dos ligantes modificados pela lignina se mostraram inferiores ao ligante puro, indicando uma pequena melhoria na elasticidade.

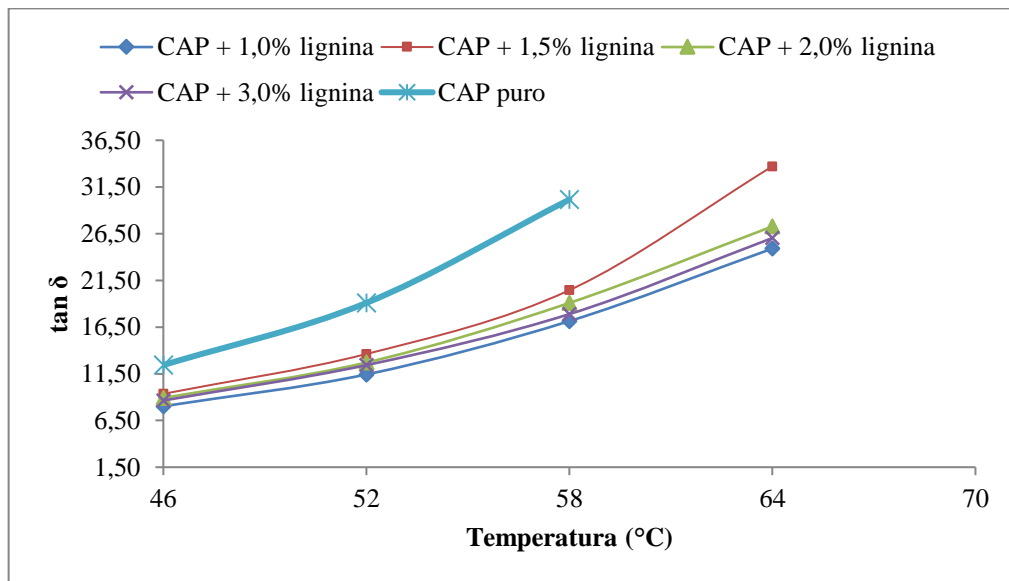


Figura 12: Ângulo de fase antes do envelhecimento RTFO

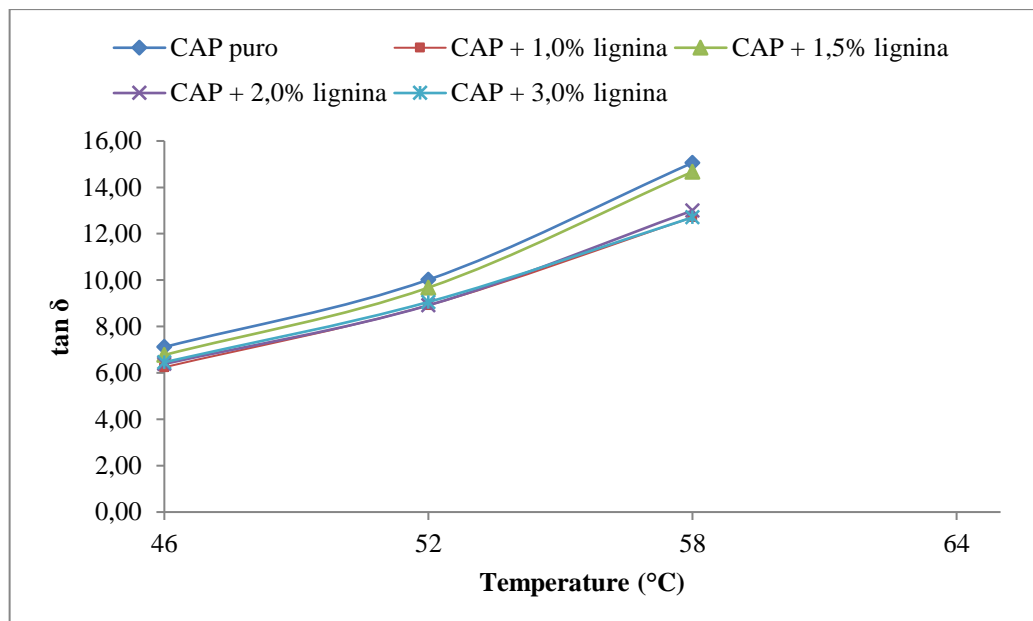


Figura 13: Ângulo de fase após o envelhecimento RTFO

Após o envelhecimento RTFO o comportamento se manteve, com as curvas dos ligantes modificados inferiores à do ligante asfáltico puro, indicando melhoria na propriedade de elasticidade. Dentre os teores analisados o de 3,0% se destaca, mostrando uma redução do ângulo de fase maior que os demais, e mantendo esse comportamento após o envelhecimento.

Fluência e Recuperação sob Tensões Múltiplas – MSCR

O ensaio de Fluência e Recuperação sob Tensões Múltiplas permite obter dois parâmetros para indicar resistência à deformação permanente do material, representados pelo percentual de recuperação (% Rec) e a compliância não-recuperável (Jnr). Na Tabela 3 são apresentados esses parâmetros, além da diferença percentual entre as compliâncias não-recuperáveis (Jnr dif), indicando a sensibilidade do ligante ao aumento das tensões.

Tabela 3: Parâmetros do teste de Fluência e Recuperação sob Tensões Múltiplas

PG RTFO (°C)	AMOSTRA	PERCENTUAL DE RECUPERAÇÃO (%)		COMPLIÂNCIA NÃO-RECUPERÁVEL JNR (kPa ⁻¹)		JNR DIF (%)
		100Pa	3200Pa	100Pa	3200Pa	
		64	CAP 50/70	40,9	3,1	
64	1,0% Lignina	57,0	1,8	0,75	2,33	96,8
64	1,5 % Lignina	10,7	1,4	2,13	2,62	86,8
64	2,0 % Lignina	19,1	3,3	1,58	2,27	82,8
64	3,0% Lignina	74,4	1,9	0,41	2,26	97,5

Avaliando o percentual de recuperação percebe-se uma melhora do parâmetro com a adição da lignina a 100 Pa, especialmente para o teor de 3,0% de lignina. Contudo, a 3200 Pa o percentual de recuperação foi reduzido. Os resultados podem ser justificados pelo próprio ensaio, realizado na máxima temperatura de PG do ligante asfáltico, ou seja, na situação mais desfavorável pois devido à elevada temperatura o ligante se torna mais fluido dificultando o retorno elástico. Além disso os resultados de ângulo de fase indicam que a lignina proporcionou apenas um pequeno acréscimo de retorno elástico ao ligante asfáltico.

Os resultados de compliância não-recuperável mostraram a mesma tendência, com pequena melhora na tensão de 100 Pa, destacando-se novamente o teor de 3,0% com maior recuperação das deformações, e na tensão de 3200 Pa praticamente não houve diferença.

Considerando os resultados obtidos para o Jnr a 3200 Pa apresenta-se na Tabela 4 a classificação das amostras do CAP Puro e Modificado quanto ao critério de tráfego do FHWA (Federal Highway Administration).

Tabela 4: Resumo ensaio MSCR

Tipo	PG (°C)	Jnr (3,2KPa)	Intervalo Jnr (kPa-1)	Nível de tráfego
CAP Puro	64	2,33	$2,0 \leq Jnr \leq 4,0$	Padrão (S)
CAP + 1,0% Lignina	64	2,33	$2,0 \leq Jnr \leq 4,0$	Padrão (S)
CAP + 1,5% Lignina	64	2,62	$2,0 \leq Jnr \leq 4,0$	Padrão (S)
CAP + 2,0% Lignina	64	2,27	$2,0 \leq Jnr \leq 4,0$	Padrão (S)
CAP + 3,0% Lignina	64	2,26	$2,0 \leq Jnr \leq 4,0$	Padrão (S)

Pela classificação, a deformação cujo valor encontra-se entre $2,0$ e $4,0 \text{ kPa}^{-1}$ são para um tráfego tipo Padrão e como pode ser observado na Tabela 5, os ligantes modificados atenderam a esse intervalo.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Dessa forma, a análise dos resultados dos ensaios empíricos mostrou que a presença de lignina no ligante contribuiu positivamente na resistência à deformação, mas principalmente na resistência ao envelhecimento do material comparado ao ligante puro. O aumento da resistência à deformação foi verificada com a redução da penetração e consequente aumento da rigidez, assim como no aumento do ponto de amolecimento e da recuperação elástica, o qual fundamentou ainda mais essa afirmação. Já o aumento da resistência ao envelhecimento foi notado pelas menores variações dessas mesmas propriedades antes e após RTFO nos ligantes modificados. Outro fator observado que agregou viabilidade à utilização da lignina foi a menor sensibilidade à variação de temperatura, que pôde ser confirmado pelo IST mais próximo a zero.

No ensaio de viscosidade observou-se que a lignina elevou as viscosidades nos ligantes modificados, resultado já esperado pela maior consistência observada nos ensaios de penetração e ponto de amolecimento. Os melhores resultados foram obtidos para o teor de 3,0% de lignina, que apresentou as maiores viscosidades antes e após o envelhecimento RTFO. Maiores viscosidades é um resultado desejado, são um indício de maior rigidez e resistência às deformações.

No ensaio de PG os ligantes modificados não apresentaram desempenho em temperaturas mais elevadas que o ligante puro após o envelhecimento. Entretanto, a lignina foi capaz de manter o mesmo desempenho do ligante sem modificação. Os módulos complexos G^* do ligante após a modificação se mostraram superiores, ou seja, mais uma evidência da maior rigidez proporcionada pela lignina, verificada através do parâmetro $G^*/\sin \delta$. Quanto ao ângulo de fase, a modificação proporcionou pequena melhora nas propriedades elásticas antes e após o RTFO, com destaque para o teor de 3,0% de lignina.

Os resultados não apontam para aumento da propriedade elástica, conforme observado nos resultados de percentual de recuperação (%Rec) no ensaio de MSCR, o aumento da recuperação elástica só foi observado na tensão de 100 Pa, principalmente o teor de 3,0% de lignina. O parâmetro de deformação não-recuperável (J_{nr}) seguiu a mesma tendência, apresentando ligeira melhora na tensão de 100Pa, contudo para a maior tensão (3200 Pa) o parâmetro se manteve praticamente o mesmo que o ligante puro. Quanto à classificação, os ligantes puro e modificados foram enquadrados como Tráfego Padrão.

Os resultados da pesquisa apontam que o teor ótimo de lignina a ser empregado em ligantes convencionas para melhorar o seu desempenho é 3,0%. A utilização da lignina se mostrou viável do ponto de vista reológico de acordo com os resultados dessa pesquisa, proporcionando também uma finalidade para esse resíduo da indústria de papel e celulose descartado de maneira incorreta no meio ambiente.

REFERÊNCIAS

ABNT NBR 15184. Materiais Betuminosos – Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando viscosímetro rotacional, Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo – SP, 2007.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE PETRÓLEO – ANP. N°19. Especificações dos produtos derivados de petróleo, gás natural e biocombustíveis, 2005.

ASTM D7405-15 Standard Test Method for Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR) of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.

ASTM D6816-11(2016), Standard Practice for Determining Low-Temperature Performance Grade (PG) of Asphalt Binders, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2008.

BOTARO, V. R.; CASTRO, S. R.; JUNIOR, F. R.; CERANTOLA, A. E. Obtenção e caracterização de blendas de asfalto CAP 20, modificado com poliestireno reciclado, resíduos de pneu e lignina organossolve. **REM: Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 59, n. 1, p. 117-122, 2006.

BULATOVIC, V. O.; REK, V.; MARKOVIC, J. Rheological Properties of Bitumen Modified with Ethylene Butylacrylate Glycidylmethacrylate. **Polymer Engineering & Science**, v. 54, n. 5, p. 1056–1065, 2014.

Cabané, M. et al.,2004. Condensed lignins are synthesized in poplar leaves exposed to ozone. *Plant Physiol.*, v. 134, n. 2, p. 586-594.

CRAVO, M. C. C. **Efeitos do envelhecimento térmico e fotoquímico em ligantes asfálticos, mástique e matriz de agregados finos**. 2016. 280 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

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**. 2016. 301 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2016.

CARVALHO, J. R. **Estudo do comportamento do asfalto modificado com óleo de girassol visando à obtenção de misturas mornas**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia civil). Universidade Federal de Campina Grande, 2018.

CORREIA, V. C. Produção e caracterização de polpa organossolve bambu para reforço de matrizes cimentícias. 2011. 121 f. Dissertação (Mestrado em Zootecnia). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES DNIT – EM 095/2006. Cimentos asfálticos de petróleo – Especificação de material. Rio de Janeiro, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES DNIT – ME 155/2010. Material asfáltico - determinação da penetração. Rio de Janeiro, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES DNIT – ME 131/2010. Materiais Asfálticos – Determinação do ponto de amolecimento – Método do Anel e Bola. Rio de Janeiro, 2010.

GAMA, D. A.; ROSA, J. M.; DE MELO, T. J. A.; RODRIGUES, J. K. G. Rheological studies of asphalt modified with elastomeric polymer. **Construction and Building Materials**, v. 106, p. 290–295, 2016.

LONGUE JÚNIOR, D.; COLODETTE, J. L. Importância e versatilidade da madeira de eucalipto para a indústria de base florestal. *Pesquisa Florestal Brasileira*, v. 33, n.76, p. 429438, 2013.

NUÑEZ, J. Y. M.; DOMINGOS, M. D. I.; FAXINA, A. L. Susceptibility of lowdensity polyethylene and polyphosphoric acid-modified asphalt binders to rutting and fatigue cracking. **Construction and Building Materials**, v. 73, p. 509–514, 2014.

OLIVEIRA, F. C. **Oxidação de lignina proveniente de resíduos lignocelulósicos agroindustriais para obtenção de compostos químicos aromáticos de maior valor agregado**. 2015. 199 f. Tese (Doutorado em Ciências). Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2015.

SILVEIRA, I. V. S. **Propriedades reológicas sob altas temperaturas de ligantes asfálticos modificados com óleo da moringa**. 43ª RAPv – Reunião Anual de Pavimentação e 17º ENACOR – Encontro Nacional de Conservação Rodoviária, Maceió, 2014.

SOBREIRO, F. P. **Efeito da adição de ácidos fosfóricos no comportamento reológico de ligantes asfálticos puros e modificados com copolímero SBS**. 2014. 346 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes). Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

SOUZA, L. J. S. **Estudo das propriedades mecânicas de misturas asfálticas com cimento asfáltico de petróleo modificado com óleo de mamona**. 2012. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2012.

Taiz, L.; Zeiger, E., 2009. *Fisiologia vegetal*. 4.ed. Porto Alegre: Artmed, 719p.