

EDUCAÇÃO AMBIENTAL NA CONSTRUÇÃO CIVIL: UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DE PAPEL E CELULOSE NA MODIFICAÇÃO DE LIGANTES ASFÁLTICOS

Camila Gonçalves Luz Nunes ¹
Ana Maria Gonçalves Duarte ²

RESUMO

O Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP), embora amplamente utilizado, é sensível ao envelhecimento térmico e oxidativo, o que afeta seu desempenho a longo prazo. Neste sentido, a lignina – um subproduto da indústria de papel e celulose – tem se destacado como aditivo sustentável, capaz de melhorar as propriedades físico-químicas e reológicas do ligante asfáltico. Nesse sentido, este estudo visa a utilização do resíduo proveniente da produção de papel e celulose (lignina) como modificador do ligante asfáltico. Foram realizados ensaios para a determinação das propriedades físicas do ligante após a adição do resíduo de lignina e os resultados indicaram que a adição de lignina reduz a suscetibilidade ao envelhecimento, aumenta a rigidez e melhora a estabilidade térmica do ligante, indicando que a modificação do CAP com lignina não só amplia sua vida útil e resistência mecânica, como também promove uma alternativa alinhada à economia circular e à sustentabilidade ambiental. Tais resultados evidenciam o potencial da lignina como solução técnica e ecológica para a engenharia de pavimentos.

Palavras-chave: Educação ambiental, Sustentabilidade, resíduo.

INTRODUÇÃO

A malha viária brasileira, assim como a de muitos outros países, requer constante avaliação e renovação, principalmente devido à deterioração dos pavimentos, com destaque para os pavimentos asfálticos. A origem dos defeitos está geralmente relacionada ao uso inadequado das vias, que recebem cargas além daquelas para as quais o pavimento foi projetado, à má execução do processo construtivo, à utilização de materiais com propriedades insuficientes para atender às necessidades de resistência e durabilidade, e às condições climáticas adversas (CRAVO, 2016). Diante desse cenário, torna-se cada vez mais urgente o desenvolvimento de soluções inovadoras e tecnologias de materiais para pavimentação.

É nesse contexto que os asfaltos modificados surgem como uma alternativa promissora para melhorar as propriedades dos Cimentos Asfálticos de Petróleo (CAP). A

¹ Doutora pelo Programa de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal da Paraíba- UFPB, cgln@academico.ufpb.br;

² Doutora pelo Curso de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Campina Grande- UFCG, ana.duartemendonca@professor.ufcg.edu.br.



modificação com polímeros tem se mostrado eficaz em diversos estudos realizados (LUCENA, 2005; BRINGEL, 2007; LIMA, 2008; SOBREIRO, 2014; NASCIMENTO, 2015). Polímeros como o SBS (copolímero de estireno-butadieno-estireno), polietileno, SBR (borracha de estireno-butadieno), borracha de pneu moído e EVA (copolímero de etileno e acetato de vinila) são comumente empregados para essa finalidade (BRINGEL, 2007).

No entanto, a busca por soluções mais sustentáveis tem impulsionado a pesquisa e o desenvolvimento de modificadores naturais e reutilizáveis, provenientes de resíduos industriais. Nesse sentido, destaca-se o reaproveitamento de subprodutos como a lignina, um resíduo da indústria de papel e celulose, que tem atraído crescente atenção. Esse material é produzido em grande escala, gerando milhões de toneladas anualmente, e possui uma estrutura macromolecular que se assemelha à dos componentes do CAP (BOTARO *et al.*, 2006), tornando-o um candidato promissor para a modificação de asfaltos.

O aproveitamento da lignina no setor da pavimentação, além de ser uma solução sustentável, tem o potencial de reduzir custos. Isso ocorre porque a lignina, comparada aos polímeros convencionais, é um material de baixo custo e, por ser um subproduto renovável, contribui para a economia circular e a redução da dependência de recursos não-renováveis. Além disso, a utilização da lignina no asfalto pode evitar o desperdício desse material, que, quando não utilizado na indústria de papel, é muitas vezes descartado, ocupando espaços em aterros sanitários, o que agrava ainda mais o problema dos resíduos sólidos (OLIVEIRA, 2015).

A lignina tem sido considerada não apenas como uma alternativa sustentável para a indústria, mas também como uma forma de melhorar as propriedades reológicas do asfalto convencional. A compatibilidade entre a lignina e o CAP pode trazer benefícios significativos, como o aumento da viscosidade, rigidez e elasticidade do material, características fundamentais para a durabilidade e resistência dos pavimentos asfálticos (LUCENA *et al.*, 2004; MOTHÉ, 2009). Esses benefícios são especialmente importantes em regiões com condições climáticas extremas e onde os pavimentos estão sujeitos a grandes tensões e deformações.

Portanto, este estudo propõe-se a analisar as propriedades físicas do Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) modificado com a adição de lignina, um resíduo da indústria de papel e celulose. O objetivo é avaliar os efeitos dessa modificação nas propriedades físicas do ligante, tanto nas condições normais quanto envelhecidas. Com base nos



ensaios realizados, pretende-se investigar como a lignina influencia a viscosidade, rigidez e elasticidade do CAP, características cruciais para o desempenho e durabilidade dos pavimentos asfálticos.

METODOLOGIA

O ligante asfáltico utilizado na pesquisa foi o CAP 50/70, convencional, fornecido pela Empresa JBR Engenharia LTDA. Esta amostra foi denominada "CAP 50/70" e serviu como referência para as comparações.

A lignina foi obtida a partir do licor negro fornecido pelo Laboratório de Celulose e Papel da Universidade Federal de Viçosa (UFV), Minas Gerais. A extração da lignina do licor negro seguiu um procedimento adaptado de Jablonský *et al.* (2015), composto por três etapas: correção do pH, filtração à vácuo e secagem em estufa.

As misturas com o CAP convencional foram preparadas incorporando três diferentes teores de lignina, expressos em peso, sendo eles 3%, 6% e 9%. As amostras resultantes foram denominadas "3% Lignina", "6% Lignina" e "9% Lignina". Para o preparo das misturas, foram definidos os seguintes parâmetros: rotação de 2000 rpm, tempo de mistura de 30 minutos e temperatura constante de 160°C. O processo de mistura foi realizado com o auxílio de um agitador mecânico FISATOM, Modelo 722.

O CAP convencional foi inicialmente aquecido a 160°C, e, em seguida, a quantidade correspondente de lignina foi adicionada a cada amostra. Durante o processo, a temperatura e a rotação foram mantidas constantes, seguindo-se o tempo de 30 minutos para garantir uma mistura homogênea.

Após a preparação das misturas, foram realizados os seguintes ensaios laboratoriais para avaliação das propriedades dos ligantes asfálticos: envelhecimento a curto prazo (RTFO), penetração, ponto de amolecimento, recuperação elástica e viscosidade rotacional. Esses testes permitiram avaliar as propriedades físicas dos ligantes, tanto nas condições normais quanto após o envelhecimento, simulando as condições que os pavimentos asfálticos enfrentam durante o uso.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir, são apresentados os resultados de cada ensaio individualmente, com a devida comparação entre o CAP convencional e as amostras modificadas com diferentes

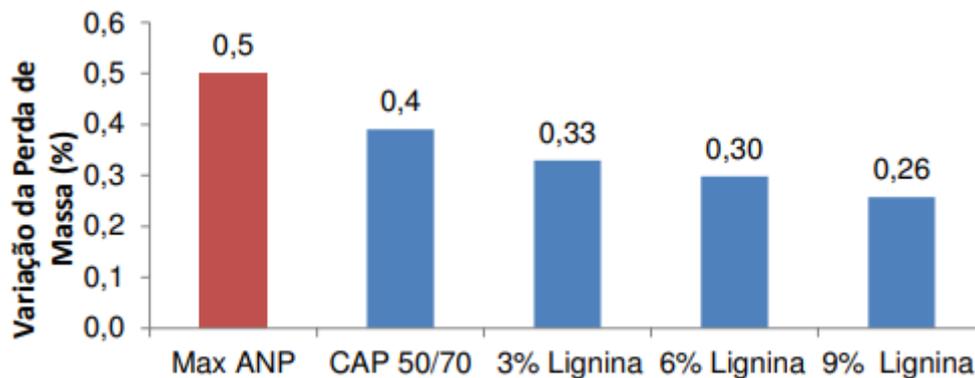


teores de lignina (3%, 6% e 9%). Cada parâmetro foi analisado para verificar como a adição de lignina influenciou as propriedades do ligante asfáltico e, de forma geral, a qualidade do material em termos de durabilidade, resistência e desempenho.

Envelhecimento a curto prazo

O ensaio de envelhecimento a curto prazo (RTFO) simula os efeitos do calor e do ar sobre o ligante asfáltico durante o processo de usinagem e compactação das misturas asfálticas. Os resultados deste ensaio são apresentados na Figura 1, que mostra a variação da massa das amostras após o envelhecimento.

Figura 1: Variação da perda de massa das amostras envelhecidas através do RTFO.



A análise da perda de massa durante o envelhecimento, conforme as especificações SUPERPAVE (máximo de 1%) e a Resolução ANP nº 19/2005 (máximo de 0,5% para ligantes puros), mostrou que todas as amostras analisadas atenderam aos critérios estabelecidos. As amostras modificadas com lignina apresentaram perdas de massa menores do que o ligante puro, evidenciando uma tendência inversamente proporcional ao teor de lignina: quanto maior o teor de lignina, menor a perda de massa.

Esse comportamento sugere que a lignina contribui para reduzir a suscetibilidade ao envelhecimento, proporcionando maior estabilidade térmica e resistência à oxidação do ligante. O ligante com 9% de lignina, por exemplo, apresentou uma redução de 0,26% na perda de massa, comparado a 0,40% no ligante puro, o que indica um potencial antioxidante da lignina.

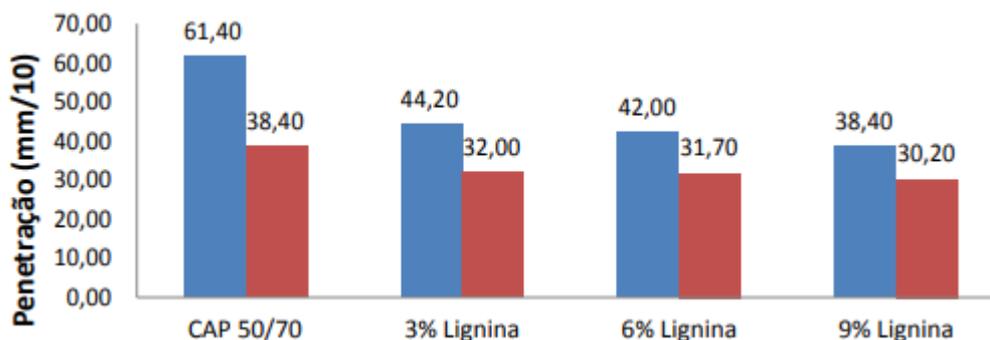
De acordo com Cravo (2016), o envelhecimento do asfalto pode ser tanto benéfico quanto prejudicial, dependendo do grau de enrijecimento. Enquanto o envelhecimento

excessivo pode causar trincas térmicas e fadiga, um envelhecimento controlado pode ser benéfico, aumentando a resistência à deformação permanente.

Penetração

A Figura 2 apresenta os resultados da penetração das amostras antes e após o envelhecimento e foi determinada a partir da média de cinco leituras em cada amostra.

Figura 2: Penetração dos ligantes puro e modificados.



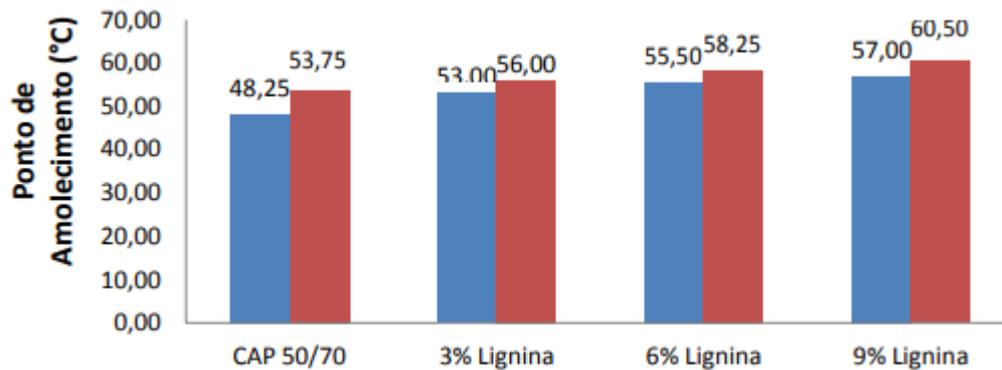
Os resultados apresentados na Figura 1 indicam que a adição de lignina ao CAP 50/70 reduziu a penetração, tanto nas condições normais quanto envelhecidas, indicando um aumento da rigidez do ligante. A redução foi mais pronunciada com o aumento do teor de lignina. Embora os ligantes modificados com lignina não tenham atendido ao intervalo de penetração especificado pela Resolução ANP nº 19/2005 (50 a 70 décimos de milímetro), essa redução não pode ser considerada um ponto negativo, pois contribui para uma maior resistência à deformação, sem prejudicar o desempenho do pavimento.

Ponto de Amolecimento

Os pontos de amolecimento foram determinados a partir da média de duas temperaturas e os resultados obtidos estão ilustrados na Figura 3.



Figura 3: Ponto de amolecimento dos ligantes puro e modificados antes e após o envelhecimento.



A partir dos resultados apresentados na Figura 3, observa-se uma tendência de aumento no ponto de amolecimento com a adição de lignina ao ligante, o que é favorável, pois indica maior resistência a deformações e menor sensibilidade à temperatura. O ligante com 9% de lignina apresentou um acréscimo de 8,75°C, alcançando 57°C, em comparação ao ligante puro. Segundo Asukar *et al.* (2016), o aumento no ponto de amolecimento também foi observado quando se adicionaram ligninas em teores de 5% e 7% a ligantes asfálticos.

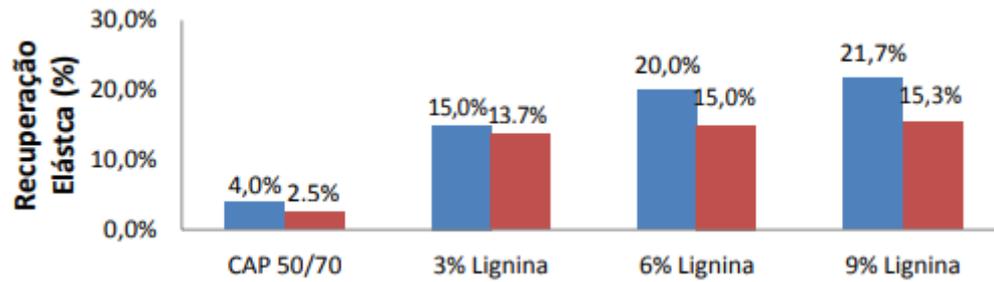
A Resolução ANP nº 19/2005 estabelece que o ponto de amolecimento deve ser, no mínimo, 46°C, e todos os ligantes desta pesquisa atenderam a esse critério. Após o envelhecimento, a variação do ponto de amolecimento deve ser no máximo 8°C, e os resultados mostraram que os ligantes modificados com lignina se mantiveram dentro dos limites, com destaque para a menor variação observada no ligante com 6% de lignina, indicando maior resistência ao envelhecimento em comparação com o ligante puro.

Recuperação Elástica

A Figura 4 apresenta os resultados do ensaio de recuperação elástica, antes e após o RTFO.



Figura 4: Recuperação elástica dos ligantes puro e modificados antes e após o RTFO

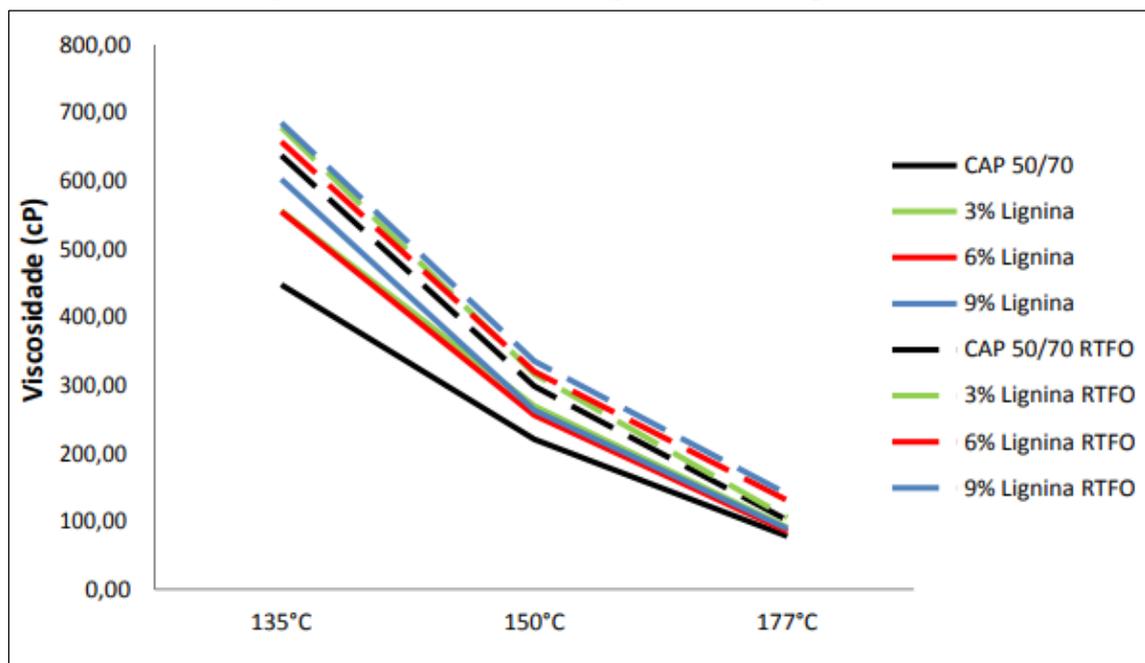


A recuperação elástica dos ligantes aumentou com a adição de lignina, especialmente no ligante com 9%, que apresentou 21,7% na condição normal e 15,3% após o envelhecimento, comparado ao ligante puro com 4% e 2,5%, respectivamente. Esses resultados confirmam que a lignina melhora significativamente as propriedades elásticas do ligante, como já observado por Gama (2016).

Viscosidade Rotacional

A Figura 5 ilustra o comportamento apresentado pelos ligantes quando submetidos ao ensaio no viscosímetro Brookfield.

Figura 5: Viscosidade dos ligantes antes e após RTFO.



Analisando a viscosidade dos ligantes não envelhecidos, observou-se um aumento com a adição de lignina, especialmente nas temperaturas mais baixas (135°C a 150°C). O ligante com 9% de lignina teve um aumento de 35%, enquanto os outros teores não apresentaram variação significativa. À medida que a temperatura aumentava, as viscosidades dos ligantes modificados convergiram para valores semelhantes, tendendo a se aproximar da viscosidade do ligante puro em 177°C.

Após o envelhecimento (RTFO), a viscosidade aumentou, com o ligante puro apresentando maior variação, o que indica maior resistência ao envelhecimento dos ligantes modificados. Os resultados atenderam aos limites estabelecidos pela Resolução ANP nº 19/2005 e à especificação SUPERPAVE, com viscosidades dentro dos valores mínimos e máximos permitidos para as temperaturas testadas. Estudos de Wang & Derewecki (2013) também confirmaram aumento da viscosidade com a adição de lignina, sem comprometer a viabilidade do uso em campo.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo investigou a modificação do Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) com a adição de lignina proveniente do licor negro da indústria de papel e celulose, com o objetivo de avaliar seus efeitos nas propriedades físicas do ligante asfáltico.

Os resultados obtidos indicam que a lignina, em concentrações de 3%, 6% e 9%, proporcionou aumentos significativos em diversas propriedades do ligante asfáltico. No ensaio de penetração, observou-se que a adição de lignina reduziu a penetração, o que resultou em um aumento da rigidez do ligante. A redução da penetração, embora fora do intervalo especificado pela Resolução ANP nº 19/2005, não comprometeu o desempenho do ligante, pois contribuiu para uma maior resistência à deformação.

Nos ensaios de ponto de amolecimento e recuperação elástica, a lignina também demonstrou efeitos positivos, aumentando a resistência do ligante ao calor e à deformação. O aumento do ponto de amolecimento sugere que os ligantes modificados com lignina são menos suscetíveis a deformações térmicas, o que é vantajoso para pavimentos expostos a altas temperaturas. A recuperação elástica mostrou um acréscimo significativo nos ligantes modificados, destacando-se o ligante com 9% de lignina, o que evidencia uma melhora nas características elastoméricas, essenciais para a resistência à fadiga e deformação permanente.



A análise de viscosidade revelou que a adição de lignina aumentou a viscosidade dos ligantes, especialmente a temperaturas mais baixas, sem ultrapassar os limites da Resolução ANP nº 19/2005 e da especificação SUPERPAVE. O aumento da viscosidade pode indicar uma maior estabilidade do ligante, o que é favorável para a aplicação de pavimentos em ambientes de temperatura elevada.

Além disso, os resultados dos ensaios de envelhecimento (RTFO) confirmaram que os ligantes modificados com lignina apresentaram maior resistência ao envelhecimento, com variações menores nas propriedades, especialmente na viscosidade e no ponto de amolecimento, quando comparados ao ligante puro. Isso reafirma o potencial da lignina como um agente antioxidante natural, capaz de aumentar a durabilidade dos pavimentos.

Portanto, o uso da lignina na pavimentação se mostrou uma alternativa viável e sustentável. Sendo um subproduto da indústria de papel e celulose, a lignina não apenas aprimora as propriedades do CAP, mas também contribui para o reaproveitamento de resíduos industriais, alinhando-se aos princípios da economia circular e promovendo práticas mais responsáveis e ecológicas na engenharia de pavimentos.

REFERÊNCIAS

ASUKAR, S. D.; BEHL, A.; GUNDALIYA, P. J. Utilization of Lignin as an Antioxidant in Asphalt Binder. **International journal of innovative research in technology, IJIRT**, v. 2, n. 12, p. 198-207, 2016.

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.

BRASIL. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustível (ANP). Resolução nº 19 de 11 de julho de 2005. Estabelece as especificações dos cimentos asfálticos de petróleo comercializados pelos diversos agentes econômicos em todo o território nacional. Rio de Janeiro, 2005.

BRINGEL, R. M. **Estudo Químico e Reológico de Ligantes Asfálticos Modificados por Polímeros e Aditivos**. 2007. 174 f. Dissertação (Mestrado em Química Orgânica). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2007.

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.



GAMA, D. A. **Efeito da adição de polímeros reativo, não-reativo e ácido polifosfórico e suas combinações nas propriedades de ligantes asfálticos.** 2016. 167 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2016.

JABLONSKÝ, M. *et al.* Characterization and comparison by UV spectroscopy of precipitated lignins and commercial lignosulfonates. **Cell. Chem. Technol**, v. 49, n. 3-4, p. 267-274, 2015.

LIMA, C. S. **Caracterização de ligantes asfálticos modificados com borracha de pneu e aditivo.** 2008. 159 f. Dissertação (Mestrado em Ciências). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2008.

LUCENA, M. C. C. **Caracterização química e reológica de asfaltos modificados por polímeros.** 2005. 163f. Tese (Doutorado em Química Inorgânica). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2005.

LUCENA, M. C. C. *et al.* **Reologia de asfaltos brasileiros puros e modificados por SBS.** XVII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, Rio de Janeiro, 2004.

MOTHÉ, M. G. **Estudo do Comportamento de Ligantes Asfálticos por Reologia e Análise Térmica.** 2009. 204 f. Dissertação (Mestrado em Ciências). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

NASCIMENTO, T. C. B. **Efeito dos envelhecimentos termo-oxidativo e foto-oxidativo sobre propriedades reológicas de ligantes asfálticos modificados.** 2015. 274 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

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.

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.

WANG, H.; DEREWECKI, K. **Rheological Properties of Asphalt Binder Partially Substituted with Wood Lignin.** Airfield and Highway Pavement 2013: Sustainable and Efficient Pavements, p. 977-986, 2013.

