

Área: Sustentabilidade | **Tema:** Cidades Sustentáveis e Inteligentes

**CONTRIBUIÇÃO AMBIENTAL DA INCORPORAÇÃO DE LIGNINA NO DESEMPENHO DE
MISTURAS ASFÁLTICAS À QUENTE QUANTO À RIGIDEZ**

**ENVIRONMENTAL CONTRIBUTION OF LIGNIN INCORPORATION IN THE PERFORMANCE OF
HOT ASPHALT MIXTURES IN REGARD TO RIGIDITY**

Jéssica Da Silva Vieira, Alana Devitte Fabris, Chaveli Brondani e Whadila Moraes Da Silva

RESUMO

O pavimento asfáltico possibilita a movimentação de pessoas, mercadorias e cargas no sistema rodoviário....

Palavras-Chave: LIGNINA;MISTURAS ASFÁLTICAS À QUENTE;RIGIDEZ

ABSTRACT

Desta forma, o presente trabalho busca analisar a influência da adição de 9% de lignina em ligante convencional, utilizado na fabricação de mistura asfáltica, estudando suas propriedades mecânicas e a viabilidade de implantação em rodovias brasileiras, de forma sustentável e funcional.

Keywords: LIGNIN;HOT ASPHALT MIXTURES;RIGIDITY

CONTRIBUIÇÃO AMBIENTAL DA INCORPORAÇÃO DE LIGNINA NO DESEMPENHO DE MISTURAS ASFÁLTICAS À QUENTE QUANTO À RIGIDEZ

1 INTRODUÇÃO

O pavimento asfáltico possibilita a movimentação de pessoas, mercadorias e cargas no sistema rodoviário. O tempo necessário para percorrer esse trajeto é influenciado por vários elementos, incluindo o estado da rodovia. No decorrer dos anos, com o crescimento da população, as rodovias foram aumentando e representando grande parte da matriz de transporte, segundo a CNT (2019), tendo uma extensão de 108.863 km, onde 61% da movimentação comercial e 95% do transporte de pessoas ocorrem em rodovias. A malha viária no Brasil, assim como em outros países, requer avaliação e renovação contínuas devido à deterioração dos pavimentos, especialmente os pavimentos asfálticos. O surgimento de defeitos é atribuído a vários fatores, incluindo a exposição da via a cargas excessivas além de sua capacidade de projeto, práticas construtivas inadequadas, uso de materiais com propriedades insuficientes para atender aos padrões exigidos e o impacto das condições climáticas predominantes (Santos, et al., 2017).

A CNT (2019) constatou que em 2018 o percentual de problemas encontrados na malha rodoviária era de 57%, já em 2019 o percentual subiu para 59%, demonstrando um aumento na degradação das vias. Para melhorar as condições das rodovias, são necessários investimentos no setor rodoviário, principalmente para a manutenção e expansão, como também para os laboratórios de pesquisa, buscando pavimentos com maior durabilidade e resistência. Os pavimentos brasileiros, em sua maioria, são classificados como flexíveis, devido a sua composição estrutural e ao ligante asfáltico. Contudo, com as demandas por pavimentos mais resistentes em consequência das ações climáticas e ao volume de tráfego, os pavimentos modificados se tornaram uma opção para o aperfeiçoamento das propriedades dos pavimentos, ao incorporar adições de materiais, melhorando as condições dos pavimentos (BERNUCCI et al., 2022).

A busca pela solução desses problemas de forma sustentável tornou-se necessária. Desta forma, ao serem utilizadas adições de materiais residuais nos pavimentos modificados, este torna-se um meio adequado para a resolução positiva de algumas falhas no revestimento das rodovias. Na literatura, são encontradas pesquisas sobre a utilização de substâncias naturais em combinação com o ligante, tais como óleos extraídos de plantas como mamona, linhaça, algodão, dendê, soja, milho e moringa. Também são mencionados o uso de fibras de biomassa, lodos, asfalto natural, enxofre, e estudos pioneiros com lignina, entre outros compostos (SOUZA, 2012; SILVEIRA, 2014; CAVALCANTE, 2016; LANGA, 2023). Nesta direção, a lignina foi adicionada ao ligante asfáltico na pesquisa de Xu et al. (2017) para melhorar as propriedades dos pavimentos, obtendo resultados positivos quanto a reologia. Diante disso, evidenciam-se as vantagens do composto para a pavimentação brasileira, como propriedades antioxidantes e redução dos resíduos das indústrias de papel e celulose (SANTOS et al., 2017).

Um dos aspectos relevantes nas pesquisas sobre asfalto modificado é o alto custo em comparação com o ligante convencional. Portanto, é essencial buscar maneiras de minimizar os custos na produção do asfalto modificado. A lignina surge como uma opção economicamente competitiva devido ao seu provável baixo custo em comparação com polímeros tradicionais. Além disso, a lignina é um material renovável, seu uso pode evitar a disposição inadequada como resíduo da fabricação de papel, contribuindo para a preservação da vida útil dos aterros sanitários e a redução do impacto ambiental negativo. Desta forma, o presente trabalho busca analisar a influência da adição de 9% de lignina em ligante convencional, utilizado na

fabricação de mistura asfáltica, estudando suas propriedades mecânicas e a viabilidade de implantação em rodovias brasileiras, de forma sustentável e funcional.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A utilização de modificadores em ligantes asfálticos se tornaram uma necessidade para atender as demandas de aumento do tráfego. Neste contexto, Balbo (2015) descreve que, por processos de modificações, os CAPs passariam a se tornarem materiais mais rígidos ao receber os esforços e mais moles ao aliviar os mesmos, melhorando as características e, conseqüentemente, desenvolver pavimentos mais eficazes. O modificador pode ser de origem natural, sintética ou polímera e são considerados tecnologias, pois através deles modificarem a estrutura de um ligante (KALANTAR et al., 2012). Neste contexto, as adições devem promover diminuição na manutenção do pavimento e melhoria no desempenho, porém, isso só poderá ser observado a longo prazo (LUZ et al., 2019). Para Gama (2016), a efetividade de uma solução que exige custos iniciais e pouca manutenção, é mais vantajosa do que ter baixo custo inicial e várias manutenções durante a vida útil.

A celulose e lignina são polímeros naturais encontrados em grandes quantidades na natureza e em processos industriais, essas substâncias são encontradas no licor negro que é resultado da deslignificação da madeira (BELGACEM et al., 2003). Entretanto, na fabricação de papel e celulose a lignina é indesejada, devido à sua coloração amarelada que dificulta o processo de branqueamento da folha (FERNANDES, 2005; LUZ et al., 2019). Portanto, buscam-se novas áreas para a sua aplicação, a lignina é um material de baixo custo, sustentável, e futuramente disponível em biorrefinarias, que utiliza derivados de biomassas (SOUTO et al., 2015). Seguindo Luz et al. (2019) as novas tendências tecnológicas destaques no cenário global, são correlacionadas a fontes de energia e matérias-primas renováveis, menos poluentes que minimizam a dependência pelas fontes de fósseis (petróleo), proporcionando aos pavimentos asfálticos independência de boa parte do CAP. Um fator importante é que o enxofre encontrado na lignina auxilia na redução da oxidação, pois reage ao mesmo antes de provocar o envelhecimento no ligante asfáltico. Sendo assim, esse material proporciona propriedades que retardam o envelhecimento e se tornam úteis quando adicionados a um ligante asfáltico.

Os estudos de aplicação da lignina como modificador de ligantes asfálticos são recentes e trazem benefícios referentes à reologia do pavimento. Segundo Williams & McCready (2008), em seu estudo, adicionou teores de lignina em três ligantes asfálticos a fim de comparação com uma referência sem adição. Entre os resultados obtidos pela pesquisa, houve um aumento da dureza nos ligantes com adição do produto, beneficiando as propriedades em temperaturas elevadas, a lignina se mostrou menos solúvel no ligante e o aditivo funcionou como antioxidante. Outro estudo foi o de Aukear et al. (2016) onde foi analisada a viabilidade da lignina como modificador dos ligantes asfálticos (VG30 e PMB40) como agente antioxidante.

Usou-se os ensaios de viscosidade rotacional, DSR, processo de envelhecimento RTFOT (antes e depois), os autores chegaram à conclusão de que a adição da lignina trouxe agentes antioxidantes quando adicionado ao ligante asfáltico.

3 METODOLOGIA

3.1 DESCRIÇÃO DOS PROCESSOS

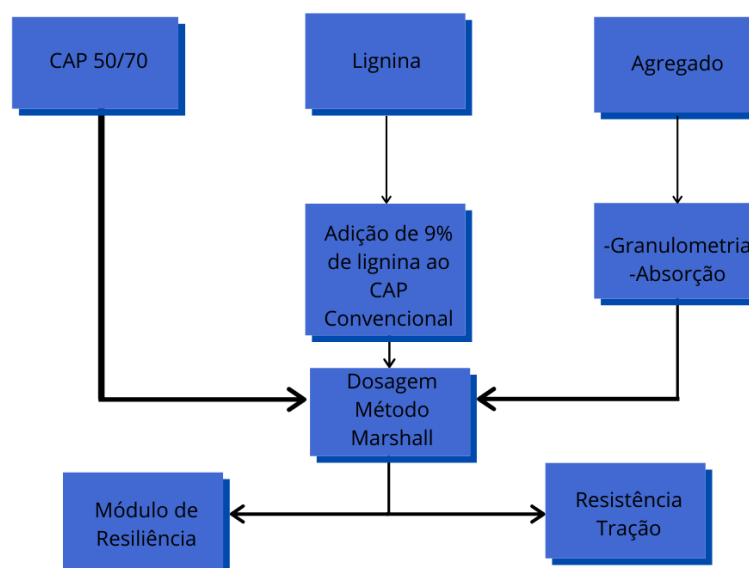
O presente estudo pretende analisar a utilização da lignina como modificador em ligantes asfálticos, acrescentando o resíduo à composição da mistura asfáltica de referência. A partir do conhecimento da melhor dosagem para os materiais em estudo, foram realizados os ensaios de Módulo de Resiliência (MR) e Resistência à Tração por Compressão Diametral (RT),

buscando estudar a rigidez das misturas e observar seu potencial de utilização em revestimentos de rodovias brasileiras. Desta forma, foram utilizados os materiais e métodos descritos em detalhes no item 3.2.

3.2 MATERIAIS E MÉTODOS

No fluxograma apresentado na Figura 1, estão representadas as sequências de atividades que foram realizadas nesta pesquisa, determinando as propriedades físicas das misturas com CAP convencional e com adição de lignina.

Figura 1 - Fluxograma do Experimento



Fonte: autoras.

3.2.1 Lignina

Inicialmente, a lignina foi extraída do licor negro, resíduo da indústria de celulose e papel, fornecida pela Companhia Manufactureira de Papel e Celulose unidade de Guaíba/RS. A extração foi realizada no laboratório de Química da URI, campus de Frederico Westphalen. A extração se deu a partir da utilização do 30 g sulfato de sódio e 70 ml de ácido sulfúrico 6 mol/l, que ao serem adicionados a 200 ml de licor negro colocado em uma Béquer 500 ml e um Erlemeyer 250 ml com água a 50 °C fazem a separação da lignina. Após a mistura chegar a nível 2 de pH, reservou-se por 60 minutos até a separação da lignina. Com o auxílio de um Kitassato, o material foi filtrado e separado o líquido da lignina.

Após o processo de separação, colocou-se a lignina em estufa para a secagem até chegar à consistência de pó. O resultado da extração foi utilizado como aditivo do ligante asfáltico. Com 200 ml de licor negro pode se produzir cerca de 10 g de lignina, isto é, para a utilização em grande escala, é necessária uma grande quantidade de licor negro.

3.2.2. Agregados

O agregado utilizado na mistura teve como base a faixa C do DNIT – ES 031/2006, o qual se refere à composição granulométrica, que está dentro da linha limite, entre os valores máximos e mínimos. O material foi fornecido pela empresa Paviter Comércio de Pavimentação e Terraplanagem, localizada no município de Frederico Westphalen. O ensaio de granulometria foi feito de acordo com a norma do DNER ME – 083/98. Com o auxílio de um agitador de peneiras (as dimensões das peneiras serão segundo a norma DNER – ME 35/95), as amostras ficaram retidas em cada peneira. Posteriormente, foram pesadas de acordo com a peneira a qual ficou retida. O somatório total dos pesos das amostras retidas não deve diferir 0,3% da massa seca inicial.

3.2.3. Cimento Asfáltico de Petróleo

O CAP 50/70 utilizado foi doado pela empresa Paviter Comércio Pavimentação e Terraplanagem Eireli, a qual tem como fornecedor a Brasquimica e segue as normas exigidas. O Quadro 1 apresenta os ensaios e especificações do CAP fornecido pela Brasquimica.

Quadro 1 - Especificações técnicas do CAP 50/70

| CARACTERÍSTICAS | UNIDADE | LIMITES | MÉTODOS | |
|---|---------|-----------------|-----------|--------|
| | | CAP 50-70 | ABNT | ASTM |
| Penetração (100g, 5s, 25, oC) | 0,1mm | 50 a 70 | NBR 6576 | D 5 |
| Ponto de Amolecimento | °C | 46 | NBR 6560 | D 36 |
| Viscosidade Saybolt-Furol | | | | |
| a 135°C | s | 141 | NBR 14950 | E 102 |
| a 150°C | | 50 | | |
| a 177°C | | 30 a 150 | | |
| Viscosidade Brookfield | | | | |
| a 135°C, SP 21, 20rpm mín | cP | 274 | NBR 15184 | D 4402 |
| a 150oC, SP 21, mín | | 112 | | |
| a 177oC, SP 21 mín | | 57 a 285 | | |
| Índice de Susceptibilidade Térmica | | (-1,5) a (+0,7) | - | - |
| Ponto de Fulgor mín. | °C | 235 | NBR 11341 | D 92 |
| Solubilidade em tricloroetileno, mín | % massa | 99,5 | NBR 14855 | D 2042 |
| Ductilidade a 25 oC, mín. | cm | 60 | NBR 6293 | D 113 |
| EFEITO DO CALOR E DO AR (RTFOT) A 163 °C, 85 MIN | | | | |
| Varição em massa, máx | % massa | 0,5 | | D 2872 |
| Ductilidade a 25°C | cm | 20 | NBR 6293 | D 113 |
| Aumento do ponto de amolecimento | °C | 8 | NBR 6560 | D 36 |
| penetração retida (*) | % | 55 | NBR 6576 | D 5 |

Fonte: Brasquimica.

3.2.4. Dosagem pelo Método Marshall

A dosagem Marshall foi realizada conforme a norma DNER - ME 043/95. Primeiramente foi definida a faixa C granulométrica do DNIT e definiram-se as porcentagens de cada peneira na mistura, as quais foram 10% de brita ¾, 35% de brita 3/8 e 55% de pó de brita, enquadrando assim o agregado dentro da faixa limite e da faixa de trabalho. Para a

dosagem do ligante foram estabelecidos três teores (4,5%, 5% e 5,5%) de CAP 50/70. A partir do peso definido para a realização do corpo-de-prova (1200g), pesaram-se os materiais com o auxílio de uma balança de precisão. Aqueceram-se os agregados a 170° C e se adicionou o CAP 50/70.

Após a mistura ficar homogênea foram compactados os CPs com 75 golpes em cada face. Repetiu-se o processo para todas as porcentagens de CAP 50/70 e, posteriormente, com adição de 9% de lignina.

3.2.5. Propriedades Mecânicas

De posse do teor ótimo de ligante, foram moldados os CPs para análise das propriedades mecânicas das misturas de referência e modificadas por meio dos ensaios de determinação da Resistência a Tração (RT) e Módulo de Resiliência (MR). Os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Federal do Santa Maria (LMCC/UFSM). A Resistência à Tração por Compressão Diametral segue a norma DNIT – ME 138/94, a qual descreve os passos e equipamentos necessários. O equipamento a ser utilizado foi a prensa mecânica, onde o corpo-de-prova será colocado e aplicada a carga progressivamente. Anotou-se o valor da carga de ruptura e juntamente com o diâmetro e altura do corpo-de-prova, obtém-se resistência à tração, através da fórmula descrita por norma. O ensaio do MR consiste na aplicação de uma carga repetidamente no plano diametral vertical do corpo-de-prova. O ensaio ocorreu conforme a norma do DNIT – ME 135/2017. O módulo de resiliência e coeficiente de Poisson foram calculados para cada um dos 15 ciclos de cargas e os últimos 5 ciclos. Posteriormente, o valor do módulo de resiliência foi determinado seguindo a fórmula apresentada pela norma.

4 ANÁLISE E DISCUSSÕES DOS RESULTADOS

4.1 DOSAGEM MARSHALL

4.1.1. Caracterização física da mistura

Os dados obtidos pela caracterização dos materiais e corpo-de-prova deram origem a cálculos para caracterizar fisicamente a mistura. O primeiro dado é o volume do corpo-de-prova, o qual é encontrado pela subtração da massa submersa da massa seca. Após o resfriamento e desmolde dos corpos-de-prova, obteve-se as dimensões físicas das amostras. Subsequente, foram determinadas as massas secas (M_s) e submersa (M_{sub}), a da subtração da massa submersa da massa específica, obtém-se a massa específica aparente (G_{mb}). Neste mesmo contexto calculou-se a Densidade Máxima Teórica de mistura, a qual depende das porcentagens escolhidas para o asfalto, agregado graúdo, agregado miúdo e filer e das massas específicas de cada um dos componentes na mistura. Os valores encontrados estão representados na Tabela 1.

Tabela 1 - DMT encontrados para CAP 50/70 e Adição 9%

| CP | CAP 50/70 | ADIÇÃO DE 9 % DE LIGNINA |
|-------------|-----------|--------------------------|
| CP 1 - 4,5% | 2,811 | 2,693 |
| CP 2 - 5% | 2,773 | 2,658 |
| CP 5 - 5,5% | 2,736 | 2,624 |

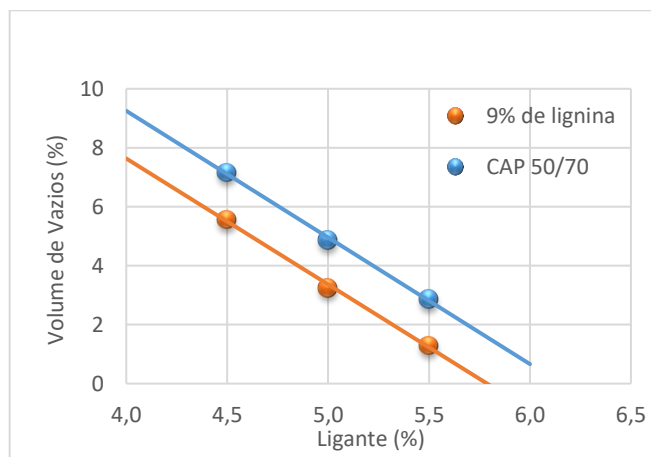
Fonte: autoras.

De posse destes dados, calculou-se o Volume de Vazios (Vv), para determinar o teor ótimo de asfalto da mistura. A seguir, encontrou-se a Relação Betume-Vazios (RBV), que é obtida através da razão entre os Vazios Cheios com Betume (VCB) e os vazios do agregado mineral (VAM), descritos nos próximos itens.

4.1.2. Volume de Vazios

Após realizar a dosagem Marshall e coletados os dados, verificou-se o Vv das misturas, gerando um gráfico representado pela Figura 2. Observa-se que houve uma diminuição considerável da linha de vazios na mistura com adição de lignina.

Figura 2 - Volume de Vazios (CAP 50/70 x 9% de lignina)



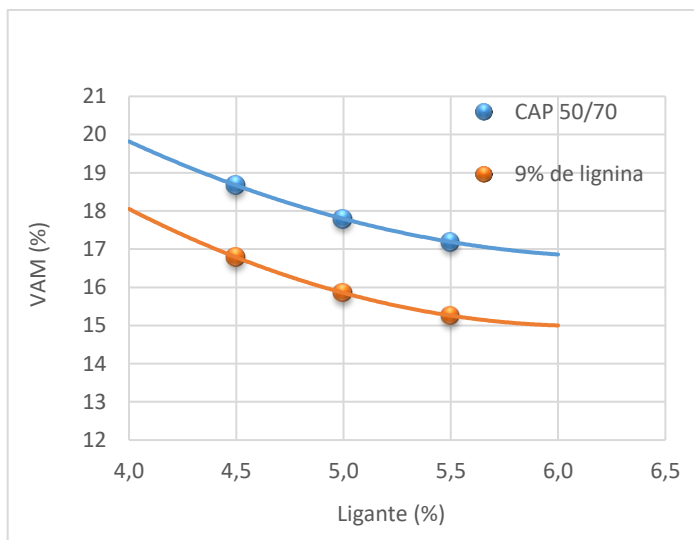
Fonte: autoras.

Pode-se constatar que as misturas com adição de lignina diminuíram os vazios da mistura. Desta forma, tais valores podem indicar menor porosidade da mistura e por consequência aumentar a durabilidade dos pavimentos à medida que torna o revestimento menos suscetível às intempéries da natureza.

4.1.3. Volume de Vazios nos Agregados Minerais

Outro fator analisado na mistura é o VAM que representa o que não é agregado na mistura, ou seja, valor de ar e asfalto efetivo, a quantidade de Ligante Asfáltico que está disponível na mistura para gerar coesão e película ao agregado. Na Figura 3 pode se observar a diminuição da curva com adição de 9% de lignina, em comparação com a mistura de CAP 50/70 convencional.

Figura 3 - Volume de Vazios nos Agregados Minerais



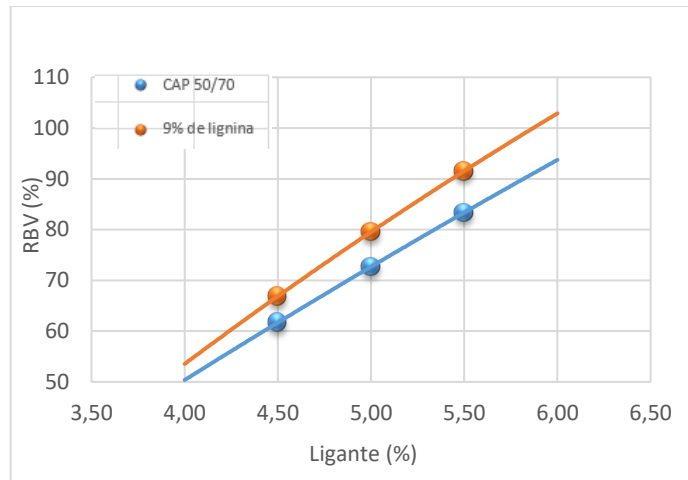
Fonte: autoras.

O gráfico demonstra que ao adicionar maiores teores de CAP, o VAM diminui. No entanto, cabe ressaltar, que valores altos de VAM fazem com que os agregados obtenham uma melhor cobertura de filme betuminoso, fazendo com que a mistura tenha maior durabilidade. Os valores de VAM são menores e também diminuem com o aumento do teor de betume quando adicionada a lignina à composição. Neste caso, salienta-se que a determinação do teor de betume ideal para composição da mistura asfáltica deve ser analisado a partir das diversas relações apresentadas.

4.1.4. Relação Betume Vazio

A relação de Betume Vazio deve ser analisada para entender a mistura formada e, portanto, determinar o teor ótimo da mistura. A Figura 4 demonstra o RBV das duas misturas estudadas.

Figura 4 - RBV x Teor de ligante



Fonte: autoras.

Analisando o gráfico, observou-se que a mistura com adição de lignina possui valores mais elevados de RBV, sendo o teor ideal o de 5% de ligante + 9% de lignina, estando dentro dos limites indicados por Bernucci et al (2022), ou seja, entre 75 e 82%, caracterizando uma mistura com teor ideal de CAP e menor volume de vazios.

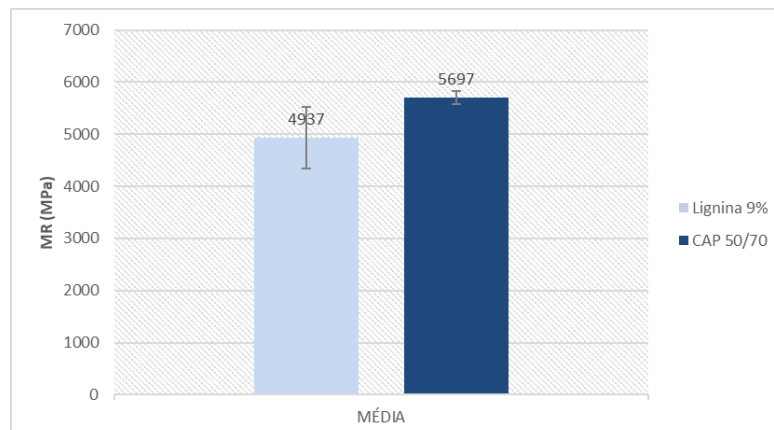
4.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS

Após a determinação do teor ótimo de ligante do projeto, foram realizados os ensaios de Resistência a Tração por Compressão Diametral (RT) (DNIT – ME 138/94) e Módulo de Resiliência (DNIT – ME 135/2018). Os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC), da UFSM

4.2.1. Módulo de Resiliência

A Figura 5 representa os resultados médios do ensaio de MR, para a mistura de 5% de CAP 50/70 e de 9% de lignina.

Figura 5 - Resultados de Módulo de Resiliência



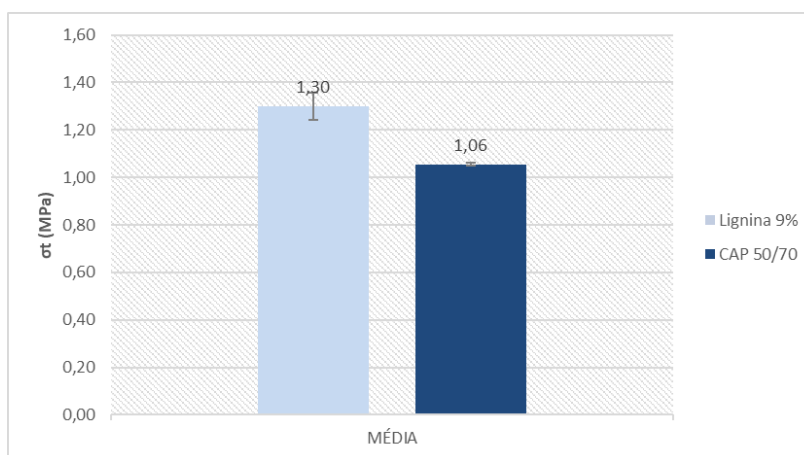
Fonte: autoras.

Analisando o gráfico pode se observar que as misturas com adição de lignina têm valores menores que a mistura de CAP convencional (50/70). Desta forma, constata-se que a adição de lignina reduz a rigidez da mistura em comparação com as misturas convencionais. O aumento ou a diminuição do MR implica na distribuição de tensões e deformações na estrutura do pavimento. Via de regra, misturas mais rígidas tendem a concentrar em si os esforços cíclicos e necessitam de maior resistência à fadiga para não apresentarem trincamento. (PAPAGIANNAKIS; MASSAD, 2008; MEDINA; MOTTA, 2005). Bernucci et al. (2022) citam que valores típicos de MR, a 25°C e 10 Hz, estão na faixa de 2000 a 8000 MPa. Todas as misturas estudadas apresentam valores dentro desses limites. Vale ainda destacar que os valores encontrados de MR para as misturas com adição de lignina possuem resultados que se aproximam e estão dentro do universo de valores de misturas tradicionais à quente, indicando, desta forma, um possível bom desempenho em campo.

4.2.2 Resistência a Tração por Compressão Diametral

O gráfico ilustrado na Fig. 6 apresenta os dados obtidos pelo ensaio de resistência à tração.

Figura 6 - Resistência a Tração por Compressão Diametral



Fonte: autoras.

Os resultados de RT são positivos para as misturas com adição de lignina, tendo valores maiores do que as misturas de CAP 50/70. Observa-se um aumento de 0,29 MPa da mistura convencional para a mistura com adição, portanto, a mistura com 9% de lignina além de trazer benefícios reológicos já comprovados por Santos (2017) e Luz (2019), também apresentam resistência a tração mais elevada que a mistura de CAP 50/70.

Com os resultados de RT, apresentados na Figura 6, é possível afirmar que as misturas modificadas com lignina não diferem em comportamento das misturas convencionais, provado pela pouca diferença nos valores de resistência média. É importante destacar que os corpos de prova utilizados para o ensaio de RT foram, anteriormente, ensaiados para obtenção do seu módulo de resiliência. Por meio do ensaio de RT, pode-se realizar uma inferência de desempenho à fadiga das misturas asfálticas. Dessa forma, quanto maior o valor de RT, melhor o indicador de desempenho das amostras ao dano por fadiga. No caso deste estudo observa-se um possível melhor comportamento das misturas modificadas com lignina frente ao fenômeno de fadiga nos pavimentos.

4.2.3. Relação Módulo de Resiliência e Resistência a Tração

Bernucci et al. (2022) descreve que a razão entre esses dois parâmetros é utilizada como um fator preponderante na vida de fadiga das misturas, agregando informações de rigidez e resistência. Para os autores, o mais desejável é um valor pequeno de razão, dado que com frequência se procura baixa rigidez para evitar elevada absorção de tensões que levem ao trincamento precoce do revestimento, além da alta resistência à tração, que em geral, quanto maior resistência a ruptura há uma maior resistência à fadiga.

Na Tabela 2 apresentam-se os resultados dos dois ensaios, relacionando o MR com RT para comparar os valores. Para Junior (2004) essa relação compatibiliza a rigidez e a resistência das misturas asfálticas, ou seja, uma mistura com maior rigidez (MR elevado) solicitam maiores valores de RT devido à concentração de esforços no seu interior.

Tabela 2 - Relação do Módulo de Resiliência e Resistência a Tração

| Misturas | MR Média (MPa) | RT Média (MPa) | (MR/RT) |
|---------------|----------------|----------------|---------|
| CAP 50/70 | 5697 | 1,06 | 5699,5 |
| 9% de Lignina | 4937 | 1,30 | 3797,5 |

Fonte: autoras.

A mistura com adição de lignina obteve valores na faixa de 3000 a 4000, quanto à mistura convencional de CAP 50/70 ficou na faixa de 5000 a 6000. Uma mistura deve ser flexível e ter uma resistência à tração razoável, no ponto de vista mecânico descrito por Junior (2004). Sendo assim, apesar das poucas pesquisas da adição de lignina em pavimentos asfálticos, é possível observar as vantagens quanto ao desempenho mecânico das misturas modificadas, visto que apresentaram menores valores na relação MR/RT, o que é desejável no contexto estrutural das rodovias.

4.3. ANÁLISE FRENTE ÀS NORMATIVAS

A norma utilizada é a do DNIT 31/2006 que se refere às características específicas das misturas a quente. Conforme indicação da norma utilizou-se CAP 50/70 e os agregados estão dentro da faixa C do DNIT. A Fig. 7 representa as especificações quanto às características da mistura.

Figura 7 - Características específicas

| Características | Método de ensaio | Camada de Rolamento | Camada de Ligação (Binder) |
|--|------------------|---------------------|----------------------------|
| Porcentagem de vazios, % | DNER-ME 043 | 3 a 5 | 4 a 6 |
| Relação betume/vazios | DNER-ME 043 | 75 – 82 | 65 – 72 |
| Estabilidade, mínima, (Kgf) (75 golpes) | DNER-ME 043 | 500 | 500 |
| Resistência à Tração por Compressão Diametral estática a 25°C, mínima, MPa | DNER-ME 138 | 0,65 | 0,65 |

Fonte: DNIT 31/2006.

Apresentam-se os valores da pesquisa na Tabela 3, juntamente com as especificações da norma, verificando se a mistura de adição 9% de lignina se enquadra na norma para misturas a quente.

Tabela 3 - Verificação da mistura com adição de 9% de lignina

| Características | Método de ensaio | Norma para camada de rolamento | Adição de 9% de lignina | Verificação |
|-------------------------|------------------|--------------------------------|-------------------------|-------------|
| Porcentagem de vazios % | DNER - ME 043 | 3 a 5 | 3,2 | OK |
| Relação betume/vazios | DNER - ME 044 | 75-82 | 79,5 | OK |
| Resistência a tração | DNER - ME 138 | 0,65 | 1,34 | OK |

Fonte: Autoras.

Observando a Tabela 3 pode-se afirmar que a mistura com adição de 9% de lignina com teor de 5% de CAP está dentro das especificações da norma. Portanto, tais valores sugerem a possibilidade de aplicação de misturas asfálticas modificadas pela inserção de lignina em suas composições em estruturas rodoviárias no Brasil.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da obtenção dos resultados conclui-se que a adição de lignina em pavimentos asfálticos é viável de forma sustentável e funcional. Conforme o desenvolvimento da pesquisa, constataram-se pontos positivos quanto à utilização da adição em comparação com o CAP convencional. Os dados coletados pelos ensaios do Módulo de Resiliência e Resistência a tração são positivos, pois em comparação com a mistura de CAP 50/70 convencional apresentaram-se poucas diferenças. Os valores encontrados de MR para as misturas com adição de lignina foram inferiores, porém possuem resultados que se aproximam e estão dentro do universo de valores de misturas tradicionais à quente, indicando, desta forma, um possível bom desempenho em campo. Os resultados do RT comprovam uma maior resistência na mistura com adição de lignina, cerca de 0,29 MPa. No caso deste estudo observa-se um possível melhor comportamento das misturas modificadas com lignina frente ao fenômeno de fadiga nos pavimentos.

Para o Brasil, pavimentos asfálticos que estejam preparados para suportar as variações climáticas são necessários, devido ao fato das grandes variações de temperaturas ao longo dos dias e durante todo o ano. Desta forma, o pavimento asfáltico poderá ter uma duração prolongada quando forem utilizadas tecnologias que permitam melhorar o desempenho das estruturas e ampliar a vida útil dos materiais utilizados em sua composição. Hoje em dia, a comunidade científica está envolvida na pesquisa de fontes verdes e renováveis, de acordo com os princípios sustentáveis e ligados a economia circular. Outro objetivo futuro das pesquisas rodoviárias, é substituir total ou parcialmente o betume por materiais de base biológica. A fim de ser considerado adequado para aplicação em ligantes e misturas betuminosas, alguns requisitos básicos devem ser reconhecidos em materiais renováveis, tais como compatibilidade com betume, benefícios de desempenho, não aumento ou aumento limitado dos custos do produto final, aspectos de saúde, segurança e ambiental.

Avaliou-se a viabilidade da utilização da mistura modificada utilizando os parâmetros apresentados na norma do DNIT 31/2006 e verificou-se que a adição de lignina na mistura asfáltica estudada se encaixa nos intervalos estabelecidos pela norma. Conclui-se então, que a adição de lignina em misturas asfálticas é viável, tanto pelo ponto de vista sustentável, quanto pelo ponto de vista prático e funcional, podendo desenvolver propriedades que retardam o envelhecimento sem alterar as demais propriedades de um pavimento convencional, sendo igualmente rígidos e resistente aos danos. Sendo assim, essa pesquisa se faz relevante e pode servir de base para demais pesquisas sobre a adição de lignina, ampliando os conhecimentos técnicos quanto à utilização de novos componentes sustentáveis em pavimentos brasileiros e, ainda, incrementando as propriedades mecânicas das estruturas rodoviárias, promovendo melhor qualidade das vias.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9935/2005 : Termos relativos a agregados empregados em concreto e argamassa de cimento Portland. Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo – SP. 2004.

BALBO, José Tadeu. **Pavimentação Asfáltica: materiais, projeto e restauração**. 1. Ed. Oficina de textos. São Paulo. 2007. 558 p.

BELGACEM, M. N.; BLAYO, A.; GANDINI, A. Organosolv lignin as a filler in inks, varnishes and paints. **Industrial Crops and Products**, v. 18, n. 2, p. 145-153, 2003.

BERNUCCI L. B., MOTTA, L. M. G., CERATTI J. A. P., SOARES J. B. **Pavimentação Asfáltica: formação básica para engenheiros**. 2ed. Rio de Janeiro: ABEDA, 501p. 2022.

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. et al. **Estudo do comportamento do asfalto modificado com óleo de girassol visando à obtenção de misturas mornas**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande/PB. 2018.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE – CNT. **Pesquisa CNT de Rodovias 2019**. Brasília: CNT: SEST SENAT.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE – CNT. **Pesquisa CNT de Rodovias 2019/Release e Principais Dados**. Brasília: CNT: SEST SENAT.

D'ALMEIDA, M. L. O. Composição química dos materiais lignocelulósicos. In: PHILIPP, P. (Rev.); D'ALMEIDA, M. L. O. (Coord.). **Celulose e papel: tecnologia de fabricação da pasta celulósica**. São Paulo: Departamento de Divulgação do IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S. A.), p. 45-106. 1988.

DNIT – Departamento Nacional de Infra-Estrutura e Transportes, ME 031/2004. Pavimento flexível – Concreto Asfáltico – Especificação de Serviço. Rio de Janeiro, 2004.

DNIT – Departamento Nacional de Infra-Estrutura e Transportes, ME 035/98. Agregados – Determinação da Abrasão Los Angeles. Rio de Janeiro, 1998.

DNIT - Departamento Nacional de Infra-Estrutura e Transportes, ME 083/98 - Análise granulométrica dos agregados por peneiramento. Rio de Janeiro, 1998.

DENIT - Departamento Nacional de Infra-Estrutura e Transportes, 111/2009 -EM – Pavimento Flexível – Cimento asfáltico modificado por borracha de pneus inservíveis pelo processo via úmida. Rio de Janeiro, 2009.

DNIT - Departamento Nacional de Infra-Estrutura e Transportes ME 131/2010 - Ponto de Amolecimento. Rio de Janeiro, 2010.

DNIT - Departamento Nacional de Infra-Estrutura e Transportes, 135/2017 - ME – Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2017.

DNIT - Departamento Nacional de Infra-Estrutura e Transportes ME 155/2010 – Penetração. 2010.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, ME 138/94 – Mistura betuminosas – Determinação da resistência a tração por compressão diametral. 1994.

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem -ME 043/95 – Misturas betuminosas a quente – Ensaio de Marshall.1995.

FERNANDES, M.R.S. **Efeito de aditivo tipo óleo e enxofre na reologia de CAPs modificados com SBS.** 2009. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009

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.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES (IBÁ) - **Relatório 2019.** 2020.

JERÔNIMO, L. H.; FOELKEL, C. E. B.; FRIZZO, S. M. B. Adição de antraquinona na polpação alcalina de eucalyptus saligna. **Ciência Florestal**, v. 10, n. 2, p. 31-37, 2000.

JUNIOR, A. M.. **Estudo sobre a ação de modificadores no envelhecimento dos ligantes asfálticos e nas propriedades mecânicas e de fadiga das misturas asfálticas.** Dissertação de Mestrado, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil na Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis/SC, 2004.

KALANTAR, Z. N.; KARIM, M. R.; MAHREZ, A. A review of using waste and virgin polymer in pavement. **Construction and Building Materials**, Volume 33, August 2012, Pages 55-62.

KLOCK, U. et al. Química da madeira. **Fupec, Curitiba**, 2005.

LANGA, E. F. **Avaliação do efeito da adição do óleo vegetal de Soja sobre as Propriedades do asfalto modificado com polietileno de alta densidade**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Química, Mestrado em Química e Processamento de Recursos Locais da Universidade Eduardo Mondlane. Maputo. 2023.

LUZ, P. M. S. G.; RODRIGUES, J. K. G.; MENDONÇA, A. M. G. D. **Avaliação reológica do ligante asfáltico 50/70 modificado com lignina das madeiras pinus e eucalipto**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande/PB. 2019.

MEDINA, J. e MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos Pavimentos**. Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 574p. 2005.

PAPAGIANNAKIS, A. T.; MASSAD, E. A. 2008. **Pavement design and materials**. 542p. Hoboken: John Wiley & Sons. 2008.

READ, J., e C. D. WHITEOAK. The shell bitumen handbook. **London: Thomas Telford Publishing**, 2003.

SANTOS, I. D. **Influência dos teores de lignina, holocelulose e extrativos na densidade básica e contração da madeira e nos rendimentos e densidade do carvão vegetal de cinco espécies lenhosas do cerrado**. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais). Universidade de Brasília. Brasília. 2008.

SANTOS, Nataliene Silva dos; RODRIGUES, John Kennedy Guedes; MENDONÇA, Ana Maria Gonçalves Duarte. **Efeito da adição de lignina kraft proveniente da madeira de eucalipto na reologia do CAP 50/70**. Minas Gerais, 2017.

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

SINDICADO DAS INDÚSTRIAS DE CELULOSE, PAPEL, PAPELÃO, EMBALAGENS E ARTEFATOS DE PAPEL, PAPELÃO E CORTIÇA DO RIO GRANDE DO SUL (SINPASUL) – Disponível em: < <http://www.sinpasul.org.br/site/> > Acessado em: 13 mar. 2020.

SOUTO, F.; CALADO, V.; PEREIRA JR, N. Fibras de carbono a partir de lignina: uma revisão da literatura. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 20, n. 1, p. 100-114, 2015.

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.

XU, Guangji; WANG, Hao; ZHU, Hongzhou. **Rheological properties and anti-aging performance of asphalt binder modified with wood lignin.** *Construction and Building Materials*, v. 151, p. 801-808, 2017.

YANG, Xu; YOU, Zhanping. **High temperature performance evaluation of bio-oil modified asphalt binders using the DSR and MSCR tests.** *Construction and Building Materials*, v. 76, p. 380-387, 2015.

YILDIRIM, Y. Polymer modified asphalt binders. **Construction and Building Materials**, v. 21, n. 1, p. 66-72, 2007.

WOODS, K.B. **Highway engineering handbook.** New York: McGraw Hill, 1960.

ZHU, J.; BIRGISSON, B.; KRINGOS, N. Polymer modification of bitumen: Advances and challenges. **European Polymer Journal**, v. 54, n. 1, p. 18–38, 2014.