

Análise do comportamento mecânico de misturas asfálticas recicladas modificadas com a adição de óleo vegetal residual

Analysis of the mechanical behavior of reclaimed asphalt mixtures modified with residual vegetable oil

Paulo Roberto Barreto Torres¹, Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena²,
Talita Miranda de Sousa³, Marcela Maria Toscano Krau⁴, Priscila Maria Sousa Gonçalves Luz⁵,
Lucas Ferreira de Lima Barbosa⁶

¹Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba – Brasil, paulobarretot@gmail.com

²Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba – Brasil, lucenafb@uol.com.br

³Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba – Brasil, talita.miranda@hotmail.com

⁴Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro – Brasil, kraumarcela@gmail.com

⁵Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba – Brasil, priscilaluz55@gmail.com

⁶Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba – Brasil, lucasferreiralb@hotmail.com

Recebido:

24 de março de 2021

Aceito para publicação:

25 de novembro de 2021

Publicado:

30 de abril de 2022

Editor de área:

Francisco Thiago Sacramento

Aragão

Palavras-chave:

Material fresado.

Agente rejuvenescedor.

Planejamento fatorial.

Óleo vegetal.

Keywords:

Reclaimed asphalt pavement.

Rejuvenating agent.

Factorial planning.

Vegetable oil.

DOI:10.14295/transportes.v30i1.2585



RESUMO

O objetivo desta pesquisa foi analisar o comportamento de misturas asfálticas com material fresado, nos teores 0%, 30% e 60% e ligante modificado com óleo vegetal residual, nos teores 0%, 2% e 4%. Realizaram-se ensaios de viscosidade rotacional, além do planejamento fatorial para estudar a influência do material fresado e do óleo nos ensaios: Resistência à Tração (RT), Módulo de Resiliência, *Lottman* modificado (LM) e *Flow Number*. Resultados indicaram que o acréscimo do óleo alcançou redução da viscosidade e temperaturas de usinagem e compactação. O planejamento fatorial encontrou indicativos, no ensaio de RT, que a variável de maior influência foi o teor de óleo, com exceção do ensaio LM onde o teor fresado foi mais significativo. Observou-se redução de agregados virgens para a mistura com 60% de fresado, e redução de até 1,2% de ligante virgem comparado com misturas sem fresado. Corroborando indicativos de economia na fabricação desta mistura.

ABSTRACT

The objective of this research was to analyze the behavior of asphalt mixtures with RAP, at 0%, 30%, and 60%, and incorporating an asphalt binder modified with residual vegetable oil, at 0%, 2%, and 4%, aiming greater practical application. Rotational viscosity tests were conducted on binders in addition to a factorial design to study the influence of RAP and oil in the tests: Indirect Tensile Strength (ITS), Resilient Modulus, Lottman modified (LM) and Flow Number. Results indicated that the oil addition achieved reductions of: viscosity, mixing and compaction temperatures. Factorial design found indications, in RT test, that the most influential variable was the oil content, except from LM test where RAP content was more significant. A reduction of virgin aggregates was observed for 60% RAP mixture, and up to 1.2% reduction of virgin binder compared to mixtures without RAP. Corroborating indications of economy in the manufacture of this mixture.

1. INTRODUÇÃO

O ciclo de vida do pavimento tem início na etapa de produção de materiais, projeto, elaboração,

construção, restauração/manutenção, até o despejo final dos resíduos ao final desse ciclo de vida útil. Dessa maneira, com a restauração e manutenção surge a reciclagem dos pavimentos que possibilita começar um novo ciclo de reuso desses materiais, minimizando a quantidade de insumos virgens e aprimorando a utilização dos recursos naturais, além de reduzir os impactos causados tanto pela construção como pela reabilitação das rodovias (Hanse e Copeland, 2017).

O processo de reciclagem de pavimentos existe há anos, mas a técnica só foi difundida a partir no final da década de 1970. Juntamente com o crescimento da utilização dessa tecnologia e consequente aumento da parcela de material fresado, houve a necessidade de desenvolver procedimentos que possibilitassem reutilizar este material, pois sua estocagem provocaria custos financeiros elevados e danos ao meio ambiente com o descarte deste material (Pradyumna et al. 2013).

Destaca-se na indústria a adição do material fresado, chamado de *Reclaimed Asphalt Pavement* – RAP, em misturas asfálticas novas (Pradyumna et al. 2013; Bohn, 2017; Centofante et al. 2018; Cavalli et al. 2018; Suzuki, 2019). Na prática, a quantidade de RAP utilizado nos projetos de misturas asfálticas não tem ultrapassado dos teores de 20 ou 25%. A principal preocupação é que o material fresado possui ligante asfáltico envelhecido e sua incorporação em altas quantidades pode criar misturas com alta rigidez. Em consequência, tais misturas podem apresentar redução na trabalhabilidade, fragilizando-as e reduzindo sua resistência, em especial à fadiga (Al-Qadi et al. 2012; Rocha Segundo et al. 2016).

Genesseeaux (2015) mostra que as misturas asfálticas recicladas com grande quantidade de material fresado juntamente com o uso da metodologia de misturas mornas, respondem aos índices de durabilidade especificados pelas normas. Como uma alternativa para otimizar os efeitos positivos do uso de RAP e diminuir seus pontos negativos, podem ser utilizados agentes rejuvenescedores com o objetivo de recuperar as propriedades essenciais do ligante asfáltico envelhecido.

Existem vários agentes rejuvenescedores disponíveis no mercado, mas com o aumento da busca por tecnologias mais sustentáveis, pesquisas têm sido realizadas com o uso de resíduos óleos vegetais na modificação de ligantes asfálticos (Portugal et al. 2017; Lucena, et al. 2018; Luz et al. 2019). Os óleos vegetais são ricos em ácidos graxos insaturados e possuem uma melhor resistência à temperatura, o que permite a utilização para a recuperação de ligantes asfálticos envelhecidos (Ji et al. 2017).

Segundo Luz et al. (2019), a aplicação dos óleos residuais na modificação de ligantes asfálticos é uma alternativa ecologicamente viável, já que estes mostram boa estabilidade oxidativa, que tendem a diminuir a elevada viscosidade dos ligantes asfálticos, reduzindo custos na usina, além de elevar a estabilidade à estocagem e adesividade nas misturas com agregados. A utilização do óleo vegetal residual coletado em estabelecimentos comerciais e/ou residenciais, seja para utilização na pavimentação ou qualquer outra finalidade, tem maior potencial de aplicação prática por não necessitar segregá-lo ou classificá-lo como sendo específicos de uma só fonte vegetal, podendo ser de soja, milho, canola, etc.

Desta maneira, o objetivo deste trabalho foi avaliar o comportamento mecânico de misturas modificadas, em diferentes teores, por adição de óleo vegetal residual combinado com materiais reciclados de revestimentos asfálticos deteriorados, buscando-se validar a otimização do uso de RAP pela incorporação deste material alternativo, designado a melhorar a sua trabalhabilidade.

2. MATERIAS E MÉTODOS

O ligante asfáltico utilizado nesta pesquisa foi o CAP 50/70, mais utilizado na região nordeste, com propriedades de acordo com a regulamentação da Agência Nacional de Petróleo (ANP). Os agregados utilizados foram a brita 19mm, brita 12,5mm, pó de pedra de origem granítica e areia, fornecidos por uma pedreira, exceto a areia que foi adquirida no mercado local, assim como a cal hidratada, utilizada como fíler.

O material fresado foi disponibilizado por uma empresa local. As operações de fresagem ocorreram no trecho compreendido entre os quilômetros 35,7 e 42 da BR-230 e a espessura de fresagem foi de 5 cm. O projeto de implantação do trecho em questão considerou um período de 10 anos, para um número de operações do eixo padrão de $9,37 \times 10^7$ com o revestimento do tipo Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ).

O óleo residual de origem vegetal foi obtido por meio de uma empresa privada que atua na coleta de óleo vegetal. Para o procedimento de mistura foram adotadas como referências as pesquisas de Faxina (2006) e Portugal *et al.* (2017), nas quais recomendam-se o aquecimento do CAP 50/70 a uma temperatura de 135°C e, em seguida, a adição do óleo vegetal residual. Recomendou-se ainda que a mistura fosse agitada durante 20 minutos e com uma velocidade máxima de 410 rpm no misturador mecânico. Nas presentes pesquisas, por se tratarem de estudos com diversos teores de aditivos, foram fixados esses valores com base nos níveis máximos e mínimos, a fim de se tentar controlar ao máximo a interferência de fatores estranhos ao processamento e mesmo efeitos da variação descontrolada dos fatores teoricamente considerados controlados.

Foi possível obter a temperatura de usinagem (TU) e temperatura de compactação (TC) do CAP 50/70 por meio do ensaio de viscosidade rotacional, determinado pela norma NBR 15184/2004. As TU e TC foram calculadas por um método tradicional que determina uma TU na qual o ligante tenha uma viscosidade rotacional de $0,17 \pm 0,02$ Pa.s e uma TC na qual apresente viscosidade rotacional de $0,28 \pm 0,03$ Pa.s. Assim, para o ligante asfáltico puro foi encontrada uma TU de 162°C e uma TC de 146°C.

Com o objetivo de determinar o teor ótimo de ligante asfáltico para cada mistura pesquisada, foi realizada a dosagem por meio da metodologia Superpave, de acordo com a norma ASTM D 6925-09, com utilização do ligante puro. Para replicar os valores encontrados na dosagem com o ligante puro na moldagem dos corpos de prova que foram utilizados para caracterização das misturas que levaram o ligante modificado com o óleo residual vegetal, foram utilizadas novas TU e TC. Essas temperaturas foram obtidas por meio de ensaio de viscosidade rotacional com os ligantes modificados pelo óleo residual nos teores de 2% e 4%, esses resultados juntamente com os encontrados para o ligante puro estão descritos na Tabela 1.

Tabela 1 – Temperaturas de usinagem e compactação

Temperatura (°C)	Ligante Puro	Ligante + 2% de óleo vegetal residual	Ligante + 4% de óleo vegetal residual
Usinagem	162,0	159,0	149,0
Compactação	146,0	143,0	135,5

A maior variação de temperatura ocorreu entre o ligante asfáltico puro e aquele com adição de 4,0% de óleo vegetal residual, chegando a reduzir 13°C na temperatura de mistura e 10,5°C na temperatura de compactação. Essa redução foi se tornando mais significativa à medida que houve aumento da quantidade de óleo vegetal residual adicionado. Mesmo que a adição de

valores menores de óleo vegetal residual não tenha proporcionado reduções significativas nas temperaturas, ele pode apresentar outras vantagens, como o aumento da lubrificidade do ligante asfáltico e reposição de compostos aromáticos (Carvalho, 2018). Além disso, esse aditivo pode melhorar a trabalhabilidade da mistura asfáltica após a adição de material fresado, ponto importante para os objetivos dessa pesquisa.

Segundo Rodrigues (2014), quando os experimentos envolvem diversos fatores que são divididos em diferentes níveis, estes são denominados esquemas fatoriais. Logo, para caracterizar as misturas asfálticas com asfalto fresado e ligante asfáltico modificado com óleo vegetal residual foi escolhido o método de experimentação fatorial, pois este é o mais completo e rápido do que o método de experimentação clássico, diante a quantidade de variáveis independentes e dependentes envolvidas. Isto porque devido às combinações entre os diferentes fatores e níveis das variáveis investigadas, em cada réplica, são testadas todas as combinações possíveis (Barros Neto *et al.* 1996).

2.1. Planejamento experimental fatorial

No processo de dosagem e determinação das propriedades mecânicas das misturas asfálticas, Idelfonso (2007) destaca parâmetros influem nos resultados, como por exemplo: quantidade e tipo de ligante, granulometria dos agregados, processo de envelhecimento, TU, TC, presença de fíler e/ou outros materiais.

A incorporação de óleo vegetal residual no ligante asfáltico, é uma alternativa que contribui para a conservação das propriedades originais, reduz a viscosidade e as temperaturas de usinagem e compactação, melhorando, conseqüentemente, sua trabalhabilidade (Luz *et al.* 2019). Essas vantagens são valorizadas ao utilizar o óleo vegetal residual como agente rejuvenescedor em misturas recicladas, já que a adição de grandes quantidades de material fresado pode produzir misturas demasiadamente rígidas, com reduzida trabalhabilidade e desempenho em campo comprometido (Ali *et al.* 2016). Logo, para tornar a pesquisa executável, foi necessário considerar apenas duas variáveis independentes: o teor de óleo vegetal residual adicionado ao ligante asfáltico usado na mistura asfáltica e a quantidade de material fresado, sendo estudados três níveis de cada uma.

Segundo Souza (2012), o conhecimento adequado das propriedades mecânicas de misturas asfálticas pode refletir, de forma direta e/ou indireta, no desempenho dos revestimentos asfálticos durante a vida útil do pavimento. Este, por sua vez, pode ser dimensionado a partir de métodos que levam em conta a compatibilidade das deformações entre as sucessivas camadas do pavimento, que, aliados às medições diretas realizadas em campo, tornam-se ferramentas indispensáveis para o estudo das composições, dos constituintes e dos agentes modificadores (aditivos) de misturas asfálticas. Logo, as variáveis dependentes deste estudo foram definidas pelos ensaios: Resistência à tração por compressão diametral (DNIT-ME 136/2010); *Flow Number* (FN) (DNIT-ME 184/2018); Módulo de Resiliência (MR) (NBR 16018/2011); *Lottman* Modificado, (DNIT-ME 180/2018). Todas essas variáveis são afetadas por alterações nas variáveis independentes.

A NAPA – National Asphalt Pavement Association – (2017) menciona que são usadas, em torno, de 20% de RAP em misturas mornas ou quente, em alteração ao agregado novo. Logo, a definição dos teores de material fresado utilizados nesta pesquisa, foi feita a fim de possibilitar de uso em quantidades maiores que 20% de material fresado em uma mistura asfáltica, para isso, utilizando-se do potencial rejuvenescedor do óleo vegetal residual.

Tomando como base os estudos de Gama (2013) e em face aos preceitos do planejamento fatorial com a incorporação dos pontos centrais ou delineamento composto central (DCC), os níveis de quantidade de óleo vegetal residual escolhidos para o estudo foram 0%, 2% e 4%, e as quantidades de material fresado foram 0%, 30% e 60% (denominadas de MF0, MF30 e MF60, respectivamente) onde os pontos centrais da mistura foram 2% de óleo vegetal residual e 30% de material fresado. A Tabela 2 apresenta os pontos centrais para os fatores e níveis estudados.

Tabela 2 – Condições experimentais para as variáveis e níveis propostos

Variável	-1	0	+1
Teor de óleo vegetal residual	0%	2%	4%
Teor de material fresado	0%	30%	60%

O delineamento fatorial é do tipo 2^2 + três pontos centrais e resulta numa matriz de sete ensaios, utilizando a variação -1, 0 e +1, tanto para a variável teor de óleo, como para a variável teor de material fresado. A matriz de ensaios corridos resultante é apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 – Matriz de ensaio corrido

Condição Experimental	1	2	3	4	5 (C)	6 (C)	7 (C)
Óleo residual	0% (-1)	0% (-1)	4% (+1)	4% (+1)	2% (0)	2% (0)	2% (0)
Material Fresado	0% (-1)	60% (+1)	0% (-1)	60% (+1)	30% (0)	30% (0)	30% (0)

(C) = Central; Pontos centrais.

2.2. Dosagem SUPERPAVE

A metodologia seguida foi a Superpave, conforme a norma ASTM D 6925-09. Destaca-se que para a MF0 foi escolhida a curva intermediária e para as MF30 e MF60 a curva escolhida foi a superior. Além disso, o material fresado foi considerado um agregado normal dentro da mistura reciclada e não existiu nenhum grau de remobilização do ligante envelhecido (“black rock”). A Figura 1 apresenta as curvas de Fuller escolhidas para cada mistura.

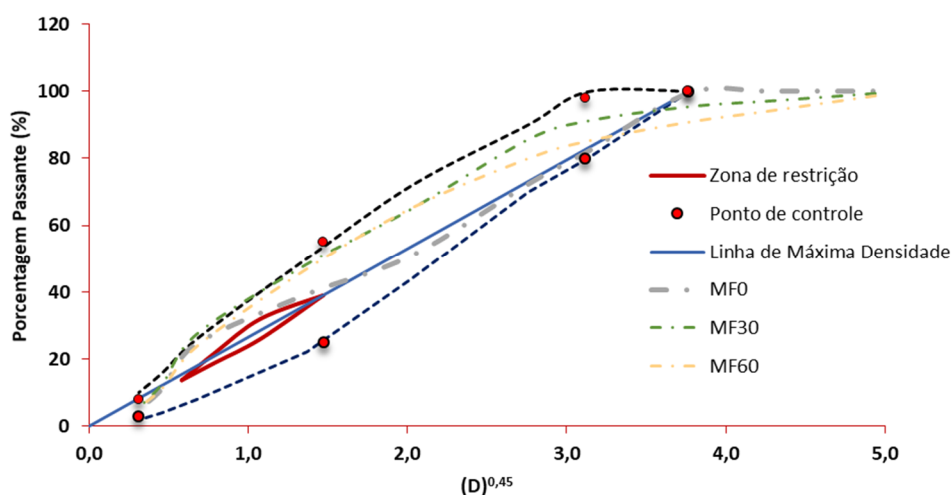


Figura 1. Curva de Fuller das misturas

A Tabela 4 apresenta o resumo dos parâmetros volumétricos encontrados após realizada as compactações e o *Rice Test*, determinado pela norma ASTM D 2041.

Tabela 4 – Parâmetros volumétricos das misturas asfálticas

Misturas	%Ligante Puro	%Gmm Inicial	%Gmm Nprojeto	%Gmm Nmáximo	Vv (%)	VAM (%)
MF0	5,00	88,8	96,1	97,1	3,90	15,3
MF30	5,00	92,8	97,4	97,9	4,05	17,9
MF60	3,80	-	96,3	-	3,91	17,3
Limites	-	<89,0	96,0	<98,0	4,00	13,0 (mín)

Os limites utilizados como base são os estabelecidos para misturas convencionais, por não existirem metodologias próprias para definição dos parâmetros volumétricos de misturas recicladas. Nota-se que a MF30 não atende à estes limites, porém, seus valores são próximos, logo, optou-se por prosseguir com os procedimentos de dosagem desta mistura.

Tendo em vista que o teor de ligante inicial das misturas MF0 e MF30 gerou um volume de vazios muito próximo de 4%, adotou-se esse teor como teor ótimo de ligante para essas misturas. No entanto, para a mistura MF60 foi necessário um novo teste com variações de teores de CAP, o que resultou num teor de ligante de projeto de 3,8%.

2.3. Propriedades mecânicas das misturas asfálticas

A determinação das propriedades mecânicas teve como objetivo verificar a influência da substituição de material virgem por material fresado, assim como analisar a interferência da adição do óleo vegetal residual no desempenho mecânico das misturas asfálticas. Foi analisada a propriedade de resistência das misturas por meio do ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral (RT), de acordo com a norma DNIT-ME 136/2010, além da avaliação da deformação permanente por meio do ensaio de *Flow Number*, baseado na DNIT-ME 184/2018, com realização à temperatura de 60°C. O estudo da rigidez teve como base o ensaio de Módulo de Resiliência (MR), conforme prescrições da norma NBR 16018/2011, à 25°C. A fim de averiguar as propriedades de adesão e coesão foram realizados os ensaios de *Lottman* Modificado ou Dano por Umidade Induzida, conforme DNIT-ME 180/2018.

3. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

As propriedades mecânicas foram determinadas segundo as sete condições experimentais definidas pela matriz de delineamento fatorial e, os resultados são apresentadas na Tabela 5. Os ensaios mecânicos foram feitos com duas repetições para cada condição experimental. A partir destes resultados foi possível obter uma superfície de resposta contendo as demais combinações entre os diferentes teores de óleo vegetal residual e material fresado.

Tabela 5 – Resultados dos ensaios mecânicos na matriz de ensaios do planejamento fatorial

Condição Experimental	Teor de óleo vegetal residual (%)	Teor de material fresado (%)	RT (MPa)	MR - NBR (MPa)	<i>Lottman</i> (%)	<i>Flow Number</i> (ciclos)
1	0	0	1,17	6997	81%	269
2	4	0	0,68	3507	63%	100
3	0	60	1,59	7272	90%	425
4	4	60	1,08	4961	97%	222
5	2	30	1,14	5143	91%	337
6	2	30	1,10	4108	91%	201
7	2	30	1,09	4713	89%	220

Ao se realizar uma análise geral dos resultados, é possível observar que apenas uma pequena parcela das misturas, aquelas com alto teor de óleo vegetal residual, não atendem ao requisito da norma DNIT 136/2010 que preconiza o valor mínimo de RT em 0,65 Mpa para aplicação de camadas de rolamento. Resultado esperado segundo Sousa (2020), devido as baixas temperaturas de moldagem, tendo em vista que quanto maior o teor do óleo, maior é a redução da viscosidade e, conseqüentemente, das temperaturas de usinagem e compactação.

De acordo com Bernucci *et al.* (2008), os valores típicos de MR para as misturas asfálticas, à 25°C, estão situados na faixa de 2000 a 8000 MPa. Para o ligante puro nas condições de moldagem padrão, em nível de comparação, o módulo encontrado foi de 6997 MPa. Apenas os valores encontrados com pouca quantidade de material fresado e alto teor de óleo vegetal residual ultrapassam o intervalo mínimo citado. Para Oliveira (2014), o MR decresce com a redução da temperatura de compactação pois, o Módulo de Resiliência diminuiu 18% da mistura de referência para a mistura modificada com temperatura 20°C mais baixa.

De acordo com a especificação AASTHO T283/2002 a Resistência Retida à Tração (RRT) mínima deve ser de 80%, logo seguindo essa normativa as misturas que possuem 30% de material fresado ou mais atendem a esse valor mínimo. Já a especificação do DNIT 180/2018 preconiza que este valor deve ser superior a 70%. Assim, apenas as misturas com teor de óleo vegetal residual acima de 2% e baixa quantidade de material fresado, não atendem as especificações, fato que pode ser explicado em consequência do ligante utilizado nessa pesquisa não possuir aditivo melhorador de adesividade.

A fim de majorar esses valores de RRT algumas soluções poderiam ser empregadas, como o aumento da quantidade de cal na mistura, elevando assim a resistência da mesma, além da adição de dope ao ligante, que tem por objetivo melhorar a adesividade entre agregado e ligante. Em relação ao *Flow Number* percebe-se que os valores diminuem expressivamente com a adição do óleo vegetal residual. Segundo as pesquisas de Cavalcante (2016), Moraes (2018), Carvalho (2018) e Guerra (2019), a redução já é esperada, visto que suas pesquisas com adição de óleo de moringa, linhaça, girassol e canola, respectivamente, apresentaram valores de FN inferiores aos das misturas utilizando o CAP 50/70. Assim, esses resultados indicam que as misturas modificadas com aditivos redutores de viscosidade têm maior potencial de sofrer deformação permanente.

O Diagrama de Pareto faz uma comparação quantitativa dos fatores que mais influenciam em determinada ocorrência. Neste caso, as variáveis são os teores de óleo vegetal residual e de material fresado e a interação dos dois. A Figura 2 mostra esses resultados para os ensaios de RT, MR, *Lottman* Modificado e *Flow Number*. Os efeitos cujos retângulos estiverem à direita da linha divisória, em vermelho, devem ser considerados no modelo matemático.

Por meio do Diagrama de Pareto para a Resistência à Tração apresentado na Figura 2 (a) é possível verificar que para o nível de significância de 95%, as duas variáveis indicaram influência significativa, mas a interação entre elas duas não mostrou o mesmo resultado. Ou seja, o teor de óleo vegetal residual e de material fresado ultrapassaram a linha de significância de 5%, sendo que dentre as variáveis, a quantidade de óleo vegetal residual foi o que mais representou contribuição na variabilidade dos resultados, ou seja, influenciou mais na resistência à tração.

Analisando a Figura 2(b), a variável significativa foi apenas o teor de óleo vegetal residual ao nível de 95% de significância. E de maneira geral, o teor de óleo vegetal residual tem uma maior influência nos resultados de Módulo de Resiliência do que o teor de material fresado.

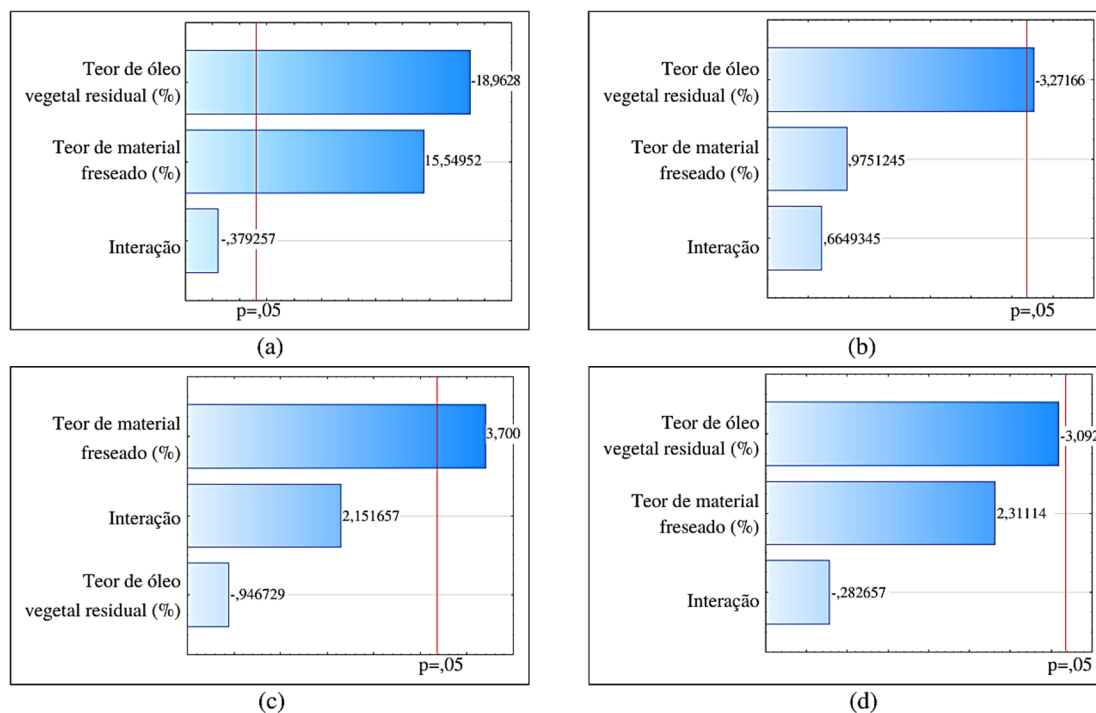


Figura 2. Diagrama de Pareto para (a) Resistência à Tração, (b) Módulo de Resiliência, (c) *Lottman* Modificado e (d) *Flow Number*

Ao observar o Diagrama de Pareto da Figura 2(c), para o ensaio de *Lottman* Modificado, a variável que se mostrou significativa foi a quantidade de material fresado ao nível de 95% de significância. Portanto, o teor de material fresado tem maior influência nos resultados do dano por umidade induzida do que a quantidade de óleo vegetal residual. Tal fato pode ser explicado pelo fato de misturas com RAP apresentarem resultados superiores de RRT, como constatado por Bohn *et al.* (2020), em que há um aumento da RRT das misturas à medida que é aumentada a porcentagem de RAP.

Com relação ao *Flow Number*, o teor de óleo vegetal residual apresentou o nível de 95% de significância, o que pode ser observado no Diagrama de Pareto, na Figura 2(d). Percebe-se que a quantidade de óleo vegetal residual tem uma influência maior nos resultados desse parâmetro do que a quantidade de material fresado. Este comportamento já era previsível já que estudos anteriores de misturas com adição de óleo de girassol, moringa, linhaça e cera de carnaúba apresentaram valores de FN inferiores aos das misturas utilizando apenas o CAP 50/70 (Carvalho, 2018; Cavalcante, 2016; Moraes, 2018). No entanto, merece destaque que o teor de material fresado chegou próximo do nível de 95% de significância.

Na Figura 3, são apresentadas as superfícies de resposta dos ensaios de Resistência à Tração, Módulo de Resiliência, *Lottman* Modificado e *Flow Number*. Todos os gráficos e análises foram obtidos por meio do *Software Statistica 7*.

Na superfície dos resultados apresentada na Figura 3(a), pode-se analisar o comportamento da RT em relação somente ao teor de óleo vegetal residual (simulando não ter acréscimo de material fresado) e é observada uma acentuada redução da Resistência à Tração com o aumento de óleo adicionado. Carvalho (2018) adicionou óleo de girassol ao ligante asfáltico e também foram encontrados resultados menores de resistência nos teores de 1, 2 e 3%. No trabalho supracitado, assim como visto neste, o teor de óleo era inversamente proporcional ao valor de resistência, ou seja, à medida que aumentava o aditivo, o valor de RT diminuía. Isso ocorreu

devido à redução das viscosidades, pois as amostras do ligante CAP 50/70 foram produzidas sob temperaturas mais elevadas demonstrando valores mais elevados de resistência à tração.

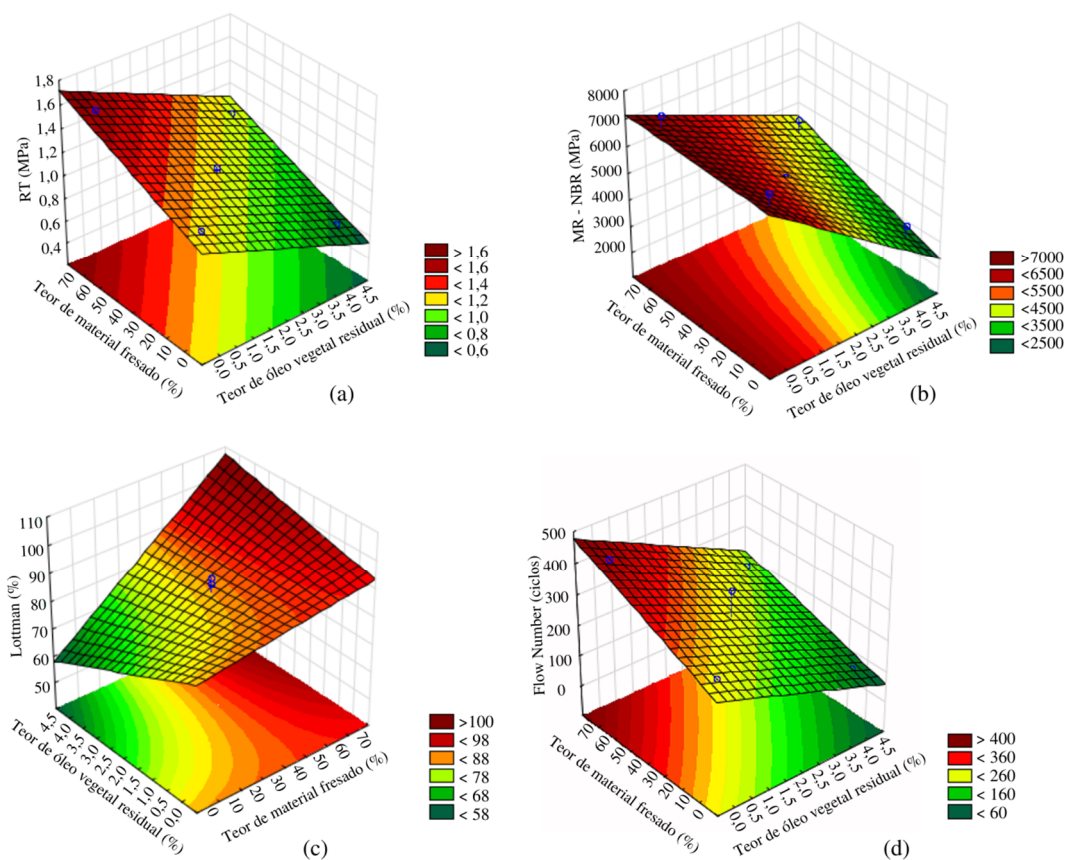


Figura 3. Superfície de resposta da (a) Resistência à Tração, (b) Módulo de Resiliência, (c) *Lottman* Modificado e (d) *Flow Number*

Já para teores mais elevados de material fresado nota-se um aumento da resistência à tração. Esses resultados estão de acordo com a pesquisa de Suzuki (2019) que adicionou material fresado nas porcentagens entre 10 e 65% e, foi verificado que as resistências aumentaram até o teor de fresado atingir 50%, e uma pequena redução no teor de 65%. Logo, o aumento de RT encontrado nas pesquisas pode ser atribuído a quantidade de ligante oxidado nas misturas, proveniente do material fresado, que as tornam mais rígidas (Ali *et al.* 2016).

As superfícies de respostas encontradas para a variável Módulo de Resiliência, variando-se o teor de óleo vegetal residual e a quantidade de material fresado é mostrada na Figura 3(b). Analisando a variável do teor de óleo vegetal residual, o Módulo de Resiliência diminui à medida que aumenta a quantidade de óleo. Fato este que foi observado nos estudos de Pilati (2008) com óleo de xisto, Carvalho (2018) com óleo de girassol e Guerra (2019) com óleo de mamona.

Os maiores valores de MR encontrados são com altas quantidades de material fresado e pouca quantidade de óleo. Essa mesma tendência foi verificada por Suzuki (2019) que notou uma diferença de comportamento das misturas com baixos e altos teores de material fresado. A autora observou que apesar de haver um aumento do MR entre as misturas com baixos teores de fresado, esses resultados foram menores em relação à mistura de controle.

A maior rigidez das misturas com altos teores de material fresado pode estar relacionada com a presença do ligante envelhecido. No entanto, o condicionamento do material durante a dosagem, ou seja, o aquecimento do material fresado, pode ter influenciado os resultados (Cavalli *et al.* 2018). Nesse caso, esse aquecimento pode ter provocado a ativação do ligante residual do material, resultando em valores de módulos mais elevados nas misturas com altas quantidades de material fresado.

Vale ressaltar que a análise do Módulo de Resiliência não pode ser feita de maneira isolada, visto que está diretamente relacionada com a rigidez da mistura. Valores maiores ou menores podem ser aceitos dependendo da estrutura do pavimento, e deve ser considerada a compatibilidade de deformações entre as camadas que o formam, sobretudo a camada de base (Luz *et al.* 2019). Por isso, é um equívoco afirmar que quanto maior o valor do Módulo de Resiliência melhor o desempenho da mistura asfáltica. As misturas devem possuir resistência à ruptura por carregamento estático e dinâmico, flexibilidade suficiente para suportar as solicitações do tráfego e boa resistência à tração para evitar rupturas prematuras (Gama, 2013).

Na Figura 3(c) é apresentada a superfície de resposta para o ensaio de *Lottman* Modificado, na qual observa-se que os maiores valores são aqueles que indicam a maior quantidade de material fresado. Em relação apenas ao teor de óleo vegetal residual é possível observar uma redução da percentagem de RRT à medida que se eleva a quantidade desse aditivo. Segundo Luz *et al.* (2019), isso pode acontecer devido à quebra das cadeias de hidrocarbonetos insaturados quando os corpos de prova são submetidos ao procedimento de condicionamento.

Para Gama (2016), a redução da resistência à tração após o processo de condicionamento é dada como um parâmetro para identificar a susceptibilidade da mistura ao deslocamento da película asfáltica do agregado (perda de adesividade), considerando o efeito deletério da água. Ao analisar a adição de material fresado na mistura, verificou-se um ganho significativo da RRT, quando comparada a mistura sem a adição desse material. Suzuki (2019) observou comportamento semelhante para as amostras com RAP onde o requisito de resistência à tração RT por compressão diametral com o efeito do dano por umidade induzida foi atendido para todos os teores de material fresado estudados.

De acordo com os parâmetros de referência sugeridos por Nascimento (2008), para análise da susceptibilidade à deformação permanente das misturas asfálticas, estas devem apresentar valores de FN superiores à 300 ciclos para um nível de tráfego médio e, superiores à 750 ciclos para tráfego pesado. A superfície resposta encontrada para a variável *Flow Number*, alterando a quantidade de óleo vegetal residual e material fresado, é mostrada na Figura 3(d).

Logo, é possível observar que o FN aumenta conforme o teor de fresado também aumenta nas misturas, padrão observado por Centofante *et al.* (2018), apenas valores com uma considerável quantidade de material fresado possuem valores superiores a 300, sendo indicados para utilização em vias como tráfego médio. As misturas com alto teor de óleo vegetal residual possuem valores que limitam sua utilização em tráfego leve e nenhuma das misturas estudadas podem ser inseridas no padrão de tráfego pesado.

Ao analisar o teor de material fresado, notou-se que quantidades maiores de fresado mostram resultados superiores. Segundo Suzuki (2019), é possível verificar uma diferença de comportamento das misturas com baixos e altos teores de material fresado. As misturas com altos teores apresentaram um maior número de ciclos, indicando uma melhor resistência à deformação permanente, em comparação com as demais misturas.

Bohn *et al.* (2020) realizaram esse ensaio para misturas asfálticas recicladas mornas, com ligante convencional e modificado por polímero, e concluíram que as misturas se comportam de maneira similar, independente da temperatura de mistura e compactação. Em relação ao teor de fresado, os autores constataram que, a adição desse material provocou um ganho importante na resistência à deformação permanente. Também observaram a possibilidade de diminuir o gasto no uso de ligante modificado em novas misturas, apenas usando uma mistura com ligante convencional e 50% de material fresado.

4. CONCLUSÕES

O estudo descrito neste artigo teve como foco a avaliação do desempenho mecânico de misturas asfálticas com adição de material fresado e óleo vegetal residual. Sendo assim, observou-se que as combinações de RAP com o óleo vegetal residual promovem influência nas propriedades mecânicas das misturas asfálticas.

Nesta análise das propriedades mecânicas, o planejamento fatorial foi determinante no que se refere ao cálculo do número de ensaios e na combinação entre o teor de óleo vegetal residual e teor de material fresado. As superfícies de resposta apresentaram um indicativo do comportamento das variáveis analisadas, principalmente o ensaio de resistência à tração, onde foi obtido um modelo significativo e preditivo. No que tange a susceptibilidade à deformação permanente, notou-se que, se por um lado a variável óleo vegetal residual induziu à diminuição do *Flow Number*, e, conseqüentemente, induziu ao aumento da suscetibilidade à deformação permanente, por outro, o material fresado apresentou tendência ao incremento dos valores de FN, o que resultou na conservação desse parâmetro.

Além disso, observou-se que para as misturas com 60% de material fresado (MF60), não houve a adição de brita 19,0 mm e uma redução de aproximadamente 80% da quantidade de brita 12,5 mm utilizada na mistura sem material fresado (MF0), além de uma redução de 1,2% de ligante asfáltico novo, são fortes indicativos de uma provável economia na fabricação destas misturas asfálticas recicladas com alto teor de material fresado.

Diante desses fatos, esta pesquisa foi idealizada e desenvolvida com a intenção de obter um maior domínio e conhecimento das condições e taxas de aplicações das misturas asfálticas recicladas com óleo vegetal residual como agente rejuvenescedor. Foi possível concluir que, adicionar o material fresado às misturas asfálticas é viável e promissora do ponto de vista técnico e ambiental e que, juntamente com o incremento do óleo vegetal residual, ocorreu a melhoria na trabalhabilidade das misturas.

Com base nos ensaios realizados e nos materiais utilizados, a composição mais indicada é de 2% de óleo vegetal residual adicionado aos 30% de material fresado. Entretanto, ainda existem lacunas a serem elucidadas, como a avaliação do grau de ativação do ligante do material fresado e a interação do ligante envelhecido com o novo das misturas recicladas, além da realização de um estudo econômico e ambiental como complemento desta pesquisa.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Capes e ao CNPq pelas bolsas concedidas, à pedreira Pedreira Rocha Cavalcante pelo fornecimento do ligante asfáltico, bem como dos agregados, à empresa JBR Engenharia LTDA, pelo material fresado disponibilizado e a INDAMA pelo óleo residual.

REFERÊNCIAS

ABNT (2011) NBR 15184 – *Materiais Betuminosos – Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando viscosímetro rotacional*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo – SP.

- ABNT (2011) NBR 16018 – *Misturas Asfálticas – Determinação da rigidez por compressão diametral sob carga repetida*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo – SP.
- Al-Qadi, I. L.; Q.Aurangzeb; S. H Carpenter; W. L. Pine & J. Trapanier (2012) Impact of High RAP Content on Structural and Performance Properties of Asphalt Mixtures. Research Report FHWA-A-ICT-12-002, Illinois Center for Transportation, Rantoul.
- ANP. Resolução ANP Nº19, de 20 de abril de 2015.
- ASTM (2009) D 6925 - *Standard Test Method for Preparation and Determination of the Relative Density of Hot Mix Asphalt (HMA) Specimens by Means of the Superpave Gyratory Compactor*. American Society for Testing and Materials, EUA.
- Barros Neto, B.; I. S. Scarminio & R. E. Bruns(1996) *Planejamento e otimização de experimentos*. 2ed. Campinas: Editora da UNICAMP, 299p.
- Bernucci, L.; L. Motta; J. Ceratti & J. Soares (2008) *Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros*. Rio de Janeiro: Petrobrás: ABEDA.
- Bohn, K. A. (2017) *Avaliação de Misturas Asfálticas Recicladas Mornas com Uso de Ligantes Convencional e Modificado por Polímero*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria. P. 254.
- Bohn, K. A.; L. P. Specht; C. Brondani; B. M. Correa; G. S. Pinheiro; K. G. Eid; V. S. Barboza Junior; F. D. Boeira & D. S. Pereira (2020) Avaliação de misturas asfálticas recicladas mornas com uso de ligantes convencional e modificado por polímero. *Transportes*. v. 28, n. 1. DOI:10.14295/transportes.v28i1.1740
- Carvalho, J. R. (2018) *Estudo do comportamento do asfalto modificado com óleo de girassol visando à obtenção de misturas mornas*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, p. 124.
- Cavalcante, F. P. (2016) *Efeito da adição dos óleos de ricinus communis e linus usitatissimum nas propriedades reológicas do cimento asfáltico de petróleo puro e modificado*. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia dos Materiais). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, p.301.
- Cavalli, M. C.; M. Zauamanis; E. Mazza; M. N. Partl & L. D. Poulikakos (2018) Effect of ageing on the mechanical and chemical properties of binder from RAP treated with bio-based rejuvenators. *Composites Part B*. v. 141, p. 174-181. DOI: 10.1016/j.compositesb.2017.12.060
- Centofante, R., L. P. Specht; P. O. B. D., Almeida; R. J. B. Pinheiro & D. D. S. Pereira (2018). Avaliação do comportamento de misturas asfálticas recicladas a quente com inserção de material fresado. *Matéria*. v. 23, n. 03. Brasil. DOI: 10.1590/S1517-707620180003.0512
- DNIT (2010) ME 136 – *Pavimentação Asfáltica – Misturas Asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral*. Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes, Rio de Janeiro.
- DNIT (2018) ME 180 – *Pavimentação – Misturas asfálticas – Determinação do dano por umidade induzida*. Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes, Rio de Janeiro.
- DNIT (2018) ME 184 – *Pavimentação – Misturas asfálticas – Ensaio uniaxial de carga repetida para determinação da resistência à deformação permanente*. Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes, Rio de Janeiro.
- Faxina, A. L. (2006) *Estudo da viabilidade técnica do uso do resíduo de óleo de xisto como óleo extensor em ligantes asfalto-borracha*. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC/USP). São Carlos, p. 286.
- Gama, D. A. (2013) *Avaliação do potencial do uso do etileno acetato de vinila (EVA) descartado pela indústria calçadista em misturas asfálticas*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, p.133.
- Gama, D. A. (2016) *Efeito da Adição de Polímeros Reativo, Não-Reativo e Ácido Polifosfórico e Suas Combinações nas Propriedades de Ligantes Asfálticos*. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, p. 166.
- Gennesseaux, M. M. L. (2015) *Avaliação da durabilidade de misturas asfálticas a quente e mornas contendo material asfáltico fresado*. Tese (Doutorado em Engenharia – Departamento de Engenharia de Transportes). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 195.
- Guerra, T. D. (2019) *Utilização do óleo de canola para redução das temperaturas de usinagem e compactação de misturas asfálticas*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, p. 87.
- Lucena, L. C. F. L.; I. V. Silveira & D. B. Costa (2018) Avaliação de ligantes asfálticos modificados com óleo da Moringa Oleífera para uso em misturas mornas. *Matéria*. v. 21, n. 01, p. 72-82. Brasil. DOI: 10.1590/S1517-707620160001.0007
- Luz, P. M. S. G.; S. F. Martins; D. B. Costa & L. C. F. L. Lucena (2019) Avaliação das propriedades mecânicas de misturas asfálticas mornas modificadas com adição de óleos vegetais. *Transportes*. v. 27, n. 1, p. 141-155. DOI:10.14295/transportes.v27i1.1594
- Moraes, T. M. R. P. (2018) *Utilização da cera de carnaúba como aditivo redutor de temperaturas de usinagem e compactação de misturas asfálticas*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, p. 135.
- NAPA (2018). *Annual Asphalt Pavement Industry Survey on Recycled Materials and Warm-Mix Asphalt Usage: 2016-2017*. National Asphalt Pavement Association.

- Nascimento, L. A. H. (2008) *Nova abordagem de misturas afálticas densas com uso de compactador giratório e foco na deformação permanente*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 227.
- Oliveira, R. B. (2014) *Estudo sobre o efeito do ccbt-113ad no comportamento mecânico de misturas asfálticas*. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Sergipe. São Cristóvão, p. 96.
- Oliveira, R. B.; Ruiz, M. L. D. S. Gabriel & A. Struffaldi (2014) Sustentabilidade ambiental e logística reversa: análise das redes de reciclagem de óleo de cozinha na região metropolitana de São Paulo. *Revista ADM.MADE*, v.18, n. 02, p. 115-132.
- Pilati, F. (2008) *Análise dos efeitos da borracha moída de pneu e do resíduo de óleo de xisto sobre algumas propriedades mecânicas de misturas asfálticas densas*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, p. 212.
- Portugal, A. C. X.; L. C. F. L. Lucena; A. E. F. L. Lucena; D. B. Costa (2017) Rheological performance of soybean in asphalt binder modification. *Road Materials and Pavement Design*. v. 19, n. 04, p. 768-782. DOI: 10.1080/14680629.2016.1273845.
- Pradyumna, T. A.; Mittal, A.; Jain, P. K. Characterization of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) for Use in Bituminous Road Construction. *2° Conference of Transportation Research Group of India – Procedia – Social and Behavioral Sciences*, 2013. DOI: 10.1016/j.sbspro.2013.11.211
- Rocha Segundo, I. G.; V. T. F. Castelo Branco; K. L. Vasconcelos & A. S. Holanda (2016) Misturas asfálticas recicladas a quente com incorporação de elevado percentual de fresado como alternativa para camada de módulo elevado. *Transportes*. v. 24, n. 04. p. 85-94. DOI: 14295/transportes.v24i4.1148
- Rodrigues, M. I. (2014) *Planejamento de Experimentos e Otimização de Processos – 3ª Ed.* Campinas – SP. Casa do Espírito Amigo fraternidade Fé e Amor, 358p.
- Sousa, T. M. (2020) *Estudo de misturas asfálticas mornas modificadas com adição da cera de abelha*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, p. 107.
- Souza, L. J. S. (2012) *Estudo das propriedades mecânicas de misturas asfálticas com cimento asfáltico de petróleo modificado com óleo de mamona*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, p. 199.
- Suzuki, K. Y. (2019) *Avaliação de misturas asfálticas recicladas a quente com diferentes teores de material fresado*. Dissertação (Mestrado em Ciências). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 155.