

Proposta de intervenção pedagógica para estudo de misturas asfálticas recicladas com borra de óleo vegetal no curso de Engenharia Civil

Proposal for a pedagogical intervention for the study of recycled asphalt mixtures with vegetable oil sludge in the Civil Engineering course

Osires de Medeiros Melo Neto^{1,*}, Ana Maria Gonçalves Duarte Mendonça¹, Gustavo Correia Basto da Silva², Edmilson Dantas da Silva Filho³, Ingridy Minervina Silva¹

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

²Universidade Estadual da Paraíba. Departamento de Odontologia. Campina Grande-PB, 58429-500, Brasil.

³Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba. Departamento de Engenharia Agrícola. Campina Grande-PB, 58432-300, Brasil

*Autor de correspondência: osiresdemedeiros@servidor.uepb.edu.br

Este documento possui uma [licença Creative Commons Reconhecimento/No Comercial 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



Recibido: 8 julio 2022 **Aceptado:** 19 diciembre 2022 **Publicado:** 23 diciembre 2022

Resumo

A utilização do *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP) na produção de misturas asfálticas tem sido incentivada devido à escassez de materiais virgens. Entretanto, o emprego de percentuais elevados de RAP (>30%) é condicionado à sua suscetibilidade a falhas sob baixas temperaturas e carga de fadiga. Neste sentido, a adição de agentes rejuvenescedores pode restaurar, parcial ou integralmente, as propriedades envelhecidas do ligante asfáltico recuperado. Este estudo teve como objetivo apresentar uma proposta de intervenção pedagógica com misturas asfálticas recicladas modificadas com aditivo residual de óleos vegetais para alunos do curso de Engenharia Civil. O agente rejuvenescedor proposto foi a borra do óleo vegetal, oriunda do processo de refinamento de óleos vegetais. O ligante asfáltico modificado por esse material deverá ser submetido a ensaios físicos e reológicos e, a partir dessa caracterização, compor as misturas asfálticas recicladas. Ensaios mecânicos de resistência à tração, à deformação permanente, à suscetibilidade à umidade, e à rigidez serão realizados como parâmetros de viabilidade técnica para as misturas, assim como uma análise ambiental por meio do índice de circularidade do RAP. A realização desse estudo nos cursos de Engenharia Civil abrirá portas para a vivência científica e para análises de materiais empregados na pavimentação, possibilitando um leque de oportunidades na atuação do futuro engenheiro, empregando materiais alternativos sustentáveis.

Palavras-chave: Proposta de intervenção pedagógica, Misturas asfálticas recicladas, RAP, Materiais alternativos, Engenharia Civil

Abstract

The use of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) in the production of asphalt mixtures has been encouraged due to the scarcity of virgin materials. However, the use of high percentages of RAP (>30%) is conditioned to its susceptibility to failure under low temperatures and fatigue load. In this sense, adding rejuvenating agents can partially or fully restore the aged properties of the recovered asphalt binder. This study aimed to present a proposal for a pedagogical intervention with recycled asphalt mixtures modified with the residual additive of vegetable oils for students of

the Civil Engineering course. The proposed rejuvenating agent was vegetable oil sludge derived from refining. The asphalt binder modified by this material must be submitted to physical and rheological tests and, based on this characterization, compose the recycled asphalt mixtures. Mechanical tests of tensile strength, permanent deformation, susceptibility to moisture, and stiffness will be performed as parameters of technical feasibility for the mixtures, as well as an environmental analysis through the circularity index of the RAP. Carrying out this study in Civil Engineering courses will open doors to scientific experience and analysis of materials used in paving, allowing a range of opportunities in the performance of the future engineer, using alternative sustainable materials.

Keywords: Proposal for pedagogical intervention, Recycled asphalt mixes, RAP, Alternative materials, Civil Engineering

1. Introdução

As atividades de construção e manutenção de pavimentos asfálticos consomem recursos ambientais e econômicos e por isso precisam de uma atenção considerável. Minimizar a exploração de recursos naturais e a emissão de poluentes nos processos de fabricação [1-3], prolongar a vida útil do pavimento [4, 5] e o gerenciamento dos resíduos gerados nas etapas de reconstrução de pavimentos asfálticos têm sido cenários de interesse no que diz respeito ao desenvolvimento da infraestrutura rodoviária sustentável [6, 7].

O ligante asfáltico é um dos materiais mais importantes e versáteis do mundo, além de ser também um dos mais antigos. Todavia, fatores como mau dimensionamento da estrutura do pavimento, execução inadequada, dosagem equivocada dos materiais, mau uso das vias ou até mesmo o envelhecimento natural das camadas de revestimento, acarretam atividades de manutenção, reparo e reconstrução da camada de revestimento, gerando quantidade significativa de resíduos asfálticos [8]. Esses resíduos asfálticos, segundo Dib [9], são provenientes do processo de fresagem da camada de revestimento asfáltico, processo de corte das camadas de revestimento asfáltico por uma fresadora, empregando movimento rotativo contínuo por meio de equipamento adotado de cortador giratório.

A fresagem de pavimentos asfálticos propicia um material de valor econômico e com propriedades físicas e mecânicas que podem ser introduzidas na composição de novas misturas asfálticas [10]. Este material é denominado de RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*), e seu uso como agregado na produção de novas misturas asfálticas teve início em meados da década de 1970, por conta do crescimento significativo nos valores do ligante asfáltico gerado com o embargo do petróleo árabe [11]. O RAP como constituinte em misturas asfálticas oferece duas vantagens principais que são a redução do custo de construção do pavimento asfáltico e os benefícios ambientais por diminuir a demanda por recursos não renováveis, como o ligante asfáltico e agregados, sendo uma das alternativas mais adequadas para alcançar a sustentabilidade [12-16].

O ligante asfáltico presente no RAP pode ser oxidado e apresentar aumento de rigidez e maior fragilidade em razão da alta temperatura durante a produção e exposição a longo prazo ao ar e à luz solar durante a vida útil [17]. A fim de restaurar as propriedades reológicas do ligante asfáltico envelhecido e manter as propriedades de serviço da reciclagem de mistura asfáltica a quente, é necessário um processo para rejuvenescer o ligante envelhecido presente no RAP [18]. O desempenho mecânico das misturas asfálticas recicladas com agentes rejuvenescedores depende principalmente do tipo e da dosagem do rejuvenescedor. A literatura tem apresentado que a dosagem do rejuvenescedor (teores empregados na modificação do ligante) afeta significativamente o desempenho (nível de redução da rigidez) da mistura asfáltica [19-21].

Os rejuvenescedores têm diferentes origens e composições químicas, como óleos aromáticos, parafínicos, vegetais ou derivados de óleo, como, por exemplo, o biodiesel [22-25]. Os bio-rejuvenescedores e rejuvenescedores derivados da reciclagem de resíduos estão progressivamente ganhando atenção graças aos seus desempenhos e sustentabilidade, uma vez que reciclam produtos que não contêm componentes aromáticos cancerígenos, tornando o uso mais seguro e possivelmente mais econômico [26-37].

Seidel e Haddock [38] investigaram as propriedades reológicas de ligantes asfálticos modificados com ácidos graxos da borra do óleo de soja (em teores de 1 e 3%), fonte de ácidos graxos da soja de custo relativamente baixo e altamente concentrada. Os testes de penetração, ponto de amolecimento e viscosidade rotacional apontaram que à medida que incorpora maiores teores de ácidos graxos, os ligantes se tornam menos rígidos e suas viscosidades em altas temperaturas são reduzidas. Contudo, a literatura apresenta uma lacuna na investigação desses ácidos graxos como agentes rejuvenescedores de misturas asfálticas recicladas, sendo de grande importância investigar os efeitos desse aditivo na resistência à fadiga e na suscetibilidade à umidade.

A borra de óleos vegetais é o principal subproduto da indústria de refino de óleo vegetal e é gerada durante a etapa de neutralização do refino químico do óleo bruto, onde os ácidos graxos livres presentes no óleo são neutralizados por meio da adição de solução de álcalis, resultando em sabões. Esta borra, devido ao seu alto conteúdo de ácidos graxos saponificados, pequeno valor econômico e grande disponibilidade nas indústrias de óleo vegetais e de biodiesel, é uma opção de matéria-prima sustentável para a diminuição da viscosidade de ligantes asfálticos [39].

Lacunas foram observadas em relação a estudos com novos agentes rejuvenescedores oriundos de subprodutos do processamento de óleos vegetais, como análise físico empírica e reológica de ligantes asfálticos modificados e avaliação mecânica e ambiental de misturas asfálticas recicladas produzidas com esses ligantes modificados por esses subprodutos.

Portanto, esse estudo teve como objetivo apresentar um projeto de intervenção pedagógica para estudos com misturas asfálticas recicladas no curso de Engenharia Civil por meio de ensaios laboratoriais.

2. Materiais e Métodos

2.1 Desenvolvimento do estudo com misturas asfálticas recicladas

Este tópico descreve os materiais a serem utilizados no estudo para compor as misturas asfálticas, bem como o processo de produção. São apresentados também os procedimentos a serem realizados para avaliar o desempenho físico-reológico do ligante asfáltico modificado, e os ensaios mecânicos nas misturas asfálticas recicladas. A Figura 1 apresenta o fluxograma com as etapas para a realização da pesquisa.

Os agregados graúdos utilizados para compor as misturas asfálticas recicladas serão as britas graníticas de diâmetros nominais máximos 19.0 mm e 12.5 mm, os agregados miúdos serão o pó de pedra, também de natureza granítica, e a areia. A cal hidratada dolomítica será usada como filer. O RAP deve ser oriundo de algum serviço de reconstrução em rodovias próximas à Universidade do curso.

A caracterização dos agregados naturais será realizada por meio dos procedimentos de massa específica (ASTM C127:2015), absorção (ASTM C127:2015), índice de forma (ASTM D4791:2019), equivalente areia (ASTM D2419:2014), abrasão Los Angeles (ASTM C131:2020),

análise granulométrica (ASTM C136:2019), partículas alongadas e achatadas (ASTM D4791:2019), adesividade de agregado graúdo (ASTM D5100:2018), partículas fraturadas (ASTM D5821-13:2017) e angularidade (ASTM C1252:2017).

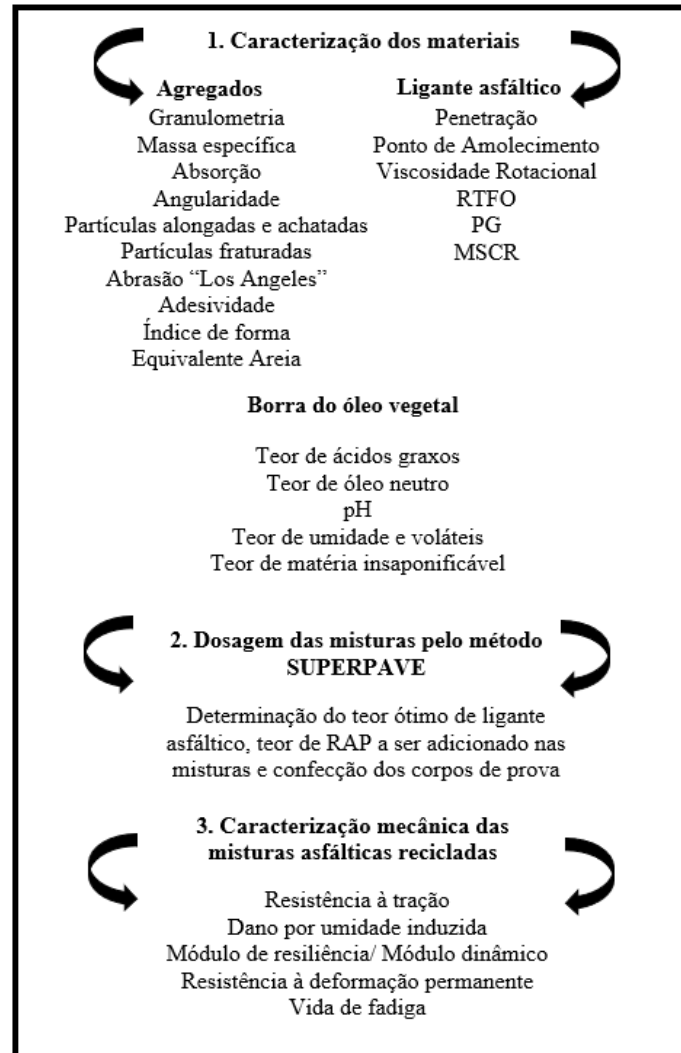


Fig.1 Fluxograma para realização do estudo experimental

A borra do óleo vegetal será caracterizada segundo as normas da *American Oil Chemists' Society* por meio dos ensaios de Ácidos graxos livres em ácido oleico (AOCS Ca 5a-40:2017), Teor de ácidos graxos totais (AOCS G 3-53: 2017), Teor de ácidos graxos oxidados (AOCS G 3-53: 2017), Teor de matéria insaponificável (AOCS Ca 6a-40: 2017), Teor de óleo neutro (AOCS G5-40: 2017), pH a 25°C (AOCS G 7-56: 2017), Teor de umidade e voláteis (AOCS Ca 2c-25: 2017).

O agente rejuvenescedor será a borra de algum óleo vegetal. A produção de óleos vegetais se concentra na região centro-oeste, sudeste e nordeste; e a maioria das indústrias cedem material para pesquisa a fim de viabilizar o uso de seus produtos e subprodutos. A IMCOPA, localizada no estado do Paraná na cidade de Araucária, destina investimentos permanentes em tecnologia de ponta e capacitação das equipes com o intuito de aprimorar a sua política de desenvolvimento sustentável. O ligante asfáltico classificado com penetração 50/70 (AB 50/70) é indicado para produzir as misturas asfálticas, pois é o tipo de ligante mais utilizado na região nordeste do Brasil.

Para efetivação da pesquisa, poderão ser utilizados teores de 6, 7, 8, 9 e 10% da borra de óleo vegetal como aditivo ao ligante asfáltico (AB 50/70), a fim de preencher a lacuna deixada por Melo Neto [39] em que realizou análise físico empírica e reológica apenas com adição de baixos teores da borra do óleo de soja ao ligante AB 50/70. No processo de mistura (ligante/bio-óleo) poderá ser utilizado um agitador mecânico FISATOM, Modelo 722D. O ligante asfáltico puro será submetido a um aquecimento prévio em estufa a 120°C por cerca de 90 minutos para garantir a fluidez necessária que possibilitasse a homogeneização. O ligante será depositado em um béquer e inserido na manta do agitador mecânico e submetido a uma rotação de 300 rpm para assegurar uma homogeneidade na distribuição da mistura. Ao se atingir a temperatura de estabilização (140°C) adicionará os aditivos oleaginosos, separadamente, em proporção ao peso do ligante puro e submeterá a rotação para 1.000 rpm, mantendo as amostras por 30 minutos para a homogeneização, nos teores pré-estabelecidos, verificando a presença ou ausência de grumos nas amostras de ligante modificadas.

Após obtenção dos ligantes asfálticos modificados, será realizada a caracterização física empírica e reológica dos ligantes, antes e após o procedimento de envelhecimento em estufa a curto prazo RTFO (ASTM D2872:2019), por meio dos ensaios de Penetração (ASTM D5M:2020), Ponto de Amolecimento (ASTM D36M-14:2020), Viscosidade Rotacional (ASTM D4402:2015), *Performance Grade* (PG) (ASTM D6373:2021) e *Multiple Stress Creep Recovery* (MSCR) (ASTM D7405:2020).

Para avaliar e comparar as misturas asfálticas, a dosagem será realizada seguindo a metodologia SUPERPAVE, normatizada pela ASTM D6925: 2015. O nível de tráfego a ser utilizado será o médio a alto e o tamanho máximo nominal (TMN) será 19.0mm. Os dados da caracterização reológica (*performance grade* – PG) do ligante asfáltico serão utilizados para definir o teor ideal de RAP a ser implementado na dosagem da mistura asfáltica reciclada pelo método *Blending Chart* (método B), ligante asfáltico virgem conhecido e teor de RAP desconhecido, da NCHRP Report 452:2001. Após a recuperação do ligante asfáltico, um gráfico de mistura será produzido para definir o teor de RAP a ser adicionado na mistura asfáltica reciclada. Na construção do gráfico utilizará os dados de PG do ligante asfáltico recuperado e o menor valor de PG obtido após análise do ligante modificado com a borra do óleo vegetal. A Figura 2 apresenta um exemplo do gráfico com o teor de RAP a ser utilizado nas misturas asfálticas.

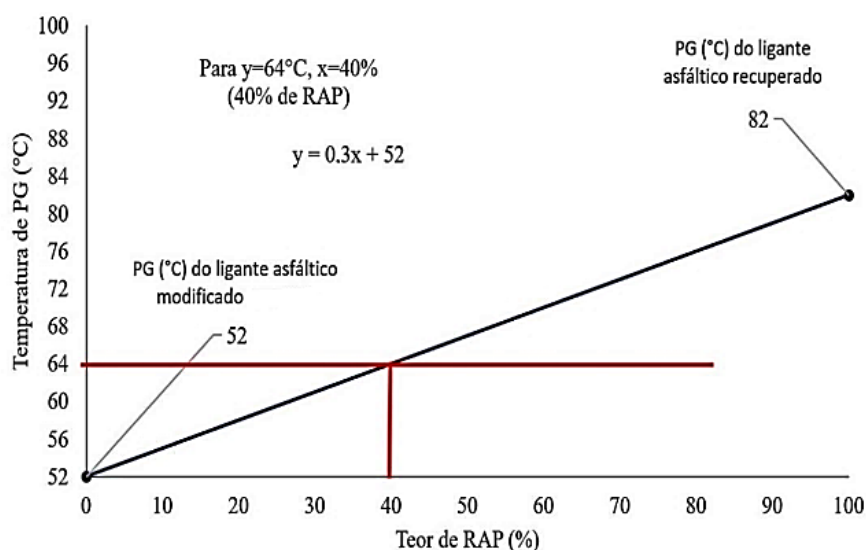


Fig.2 Exemplo do gráfico para definição do teor de RAP a ser adicionado na mistura asfáltica reciclada

De acordo com exemplo do gráfico construído pelo método B da NCHRP *Report* 452:2001 apresentado na Figura 2, o teor de RAP a ser utilizado na mistura asfáltica para uma temperatura de PG de trabalho de 64°C, comumente usada na região Nordeste do Brasil, foi de 40%.

É sabido que misturas asfálticas recicladas apresentam elevada rigidez e que a utilização de elevados teores de RAP (>30%) pode vir a comprometer o desempenho mecânico das misturas. Portanto, é necessário investigar o desempenho dessas misturas asfálticas recicladas (com agente rejuvenescedor e sem agente rejuvenescedor) a fim de comparar com o desempenho mecânico e ambiental de uma mistura asfáltica convencional. Essa análise de comparação será desenvolvida por meio da realização dos ensaios de resistência à tração, dano por umidade induzida, módulo de resiliência, módulo dinâmico, resistência à deformação permanente e vida de fadiga, somado a uma análise ambiental a fim de avaliar o potencial de circularidade do RAP nas misturas.

A norma DNIT 136:2018 é utilizada para o teste de resistência à tração por compressão diametral (RT) das misturas asfálticas. Neste teste, duas forças diametralmente opostas são aplicadas a um corpo de prova cilíndrico, por meio de frisos metálicos que geram tensões de tração uniformes perpendicularmente ao seu diâmetro. O carregamento estático crescente será aplicado por meio de uma prensa mecânica, à velocidade de deformação de $0.8 \pm 0,1$ mm/s. A leitura da carga de ruptura será feita por meio de um anel dinamométrico acoplado à prensa.

O potencial de deslocamento da película de asfalto em misturas asfálticas sob a ação da água em ciclos de gelo e degelo é avaliado por meio do método de ensaio DNIT 180:2018. Este ensaio é um medidor de adesividade que considera o efeito deletério da água sobre propriedades de resistência mecânica da mistura asfáltica.

A rigidez das misturas asfálticas será medida a partir do módulo de resiliência (MR), na configuração do ensaio de compressão diametral sob carga repetida, segundo a norma DNIT 135:2018. O módulo dinâmico (MD) é o valor normal do módulo complexo, calculado dividindo-se a máxima tensão (pico a pico) pela deformação axial recuperável (pico a pico) para um material sujeito a uma carga senoidal. Tanto o ensaio de módulo dinâmico quanto o ensaio de módulo de resiliência oferecem estimativas da rigidez da mistura asfáltica. As principais diferenças entre os dois ensaios é que neste primeiro levam-se em conta as parcelas elásticas e não elásticas das deformações, e utilizam-se carregamentos axiais senoidais, enquanto no módulo de resiliência utilizam-se carregamentos de ondas quadradas em compressão diametral e só a parcela elástica é levada em conta no cálculo do módulo. A determinação experimental do módulo dinâmico seguirá o método DNIT 416:2019.

O ensaio uniaxial de carga repetida será realizado para medir a resistência à deformação permanente das misturas asfálticas seguindo o método de ensaio DNIT 184:2018. A vida de fadiga será analisada por meio do método de ensaio DNIT 183:2018 (Ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada).

O aspecto ambiental será medido pelo conceito de Economia Circular, considerando o potencial de reutilização e reciclagem dos materiais, por meio do Índice de Circularidade do Material (ICM) em nível de produto das misturas asfálticas recicladas. A quantificação do ICM será realizada por meio da metodologia desenvolvida pela Fundação Ellen MacArthur [40] e ajustada para misturas asfálticas recicladas por Mantalovas e Di Mino [41] e Melo Neto [39]. Os parâmetros/insumos necessários para a quantificação do ICM são apresentados na Figura 3.

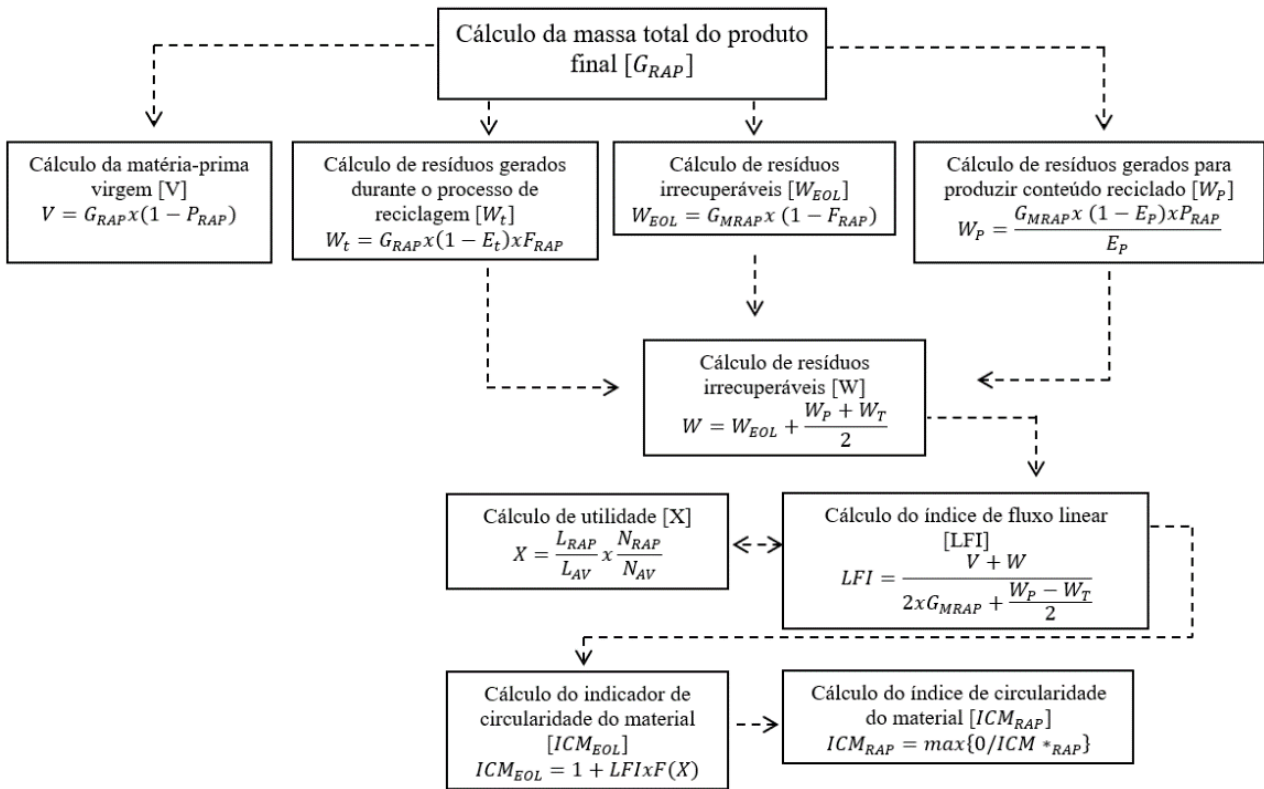


Fig.3 Definição do fluxo de cálculo dos parâmetros do ICM [39]

Onde:

- L_{RAP} é a vida útil média real do produto.
- L_{av} é a vida útil média real de um produto médio da indústria.
- N_{RAP} é o número de ciclos de carregamento antes da falha em termos de fadiga.
- N_{av} é o número equivalente de ciclos de carregamento de um produto médio da indústria de um tipo semelhante.
- P_{RAP} é a fração de matéria-prima derivada de fontes recicladas.
- F_{RAP} é a fração da massa do produto coletado por reciclagem no fim da vida.
- $F(X)$ é o fator de utilidade construído em função do fator de utilidade das misturas asfálticas.
- E_T é a eficiência do processo de reciclagem como tratamento.
- E_P é a eficiência do processo de reciclagem como produção.
- ICM_{RAP} é o índice de circularidade de RAP.

O Fator de Utilidade [X] será calculado com base nos resultados de resistência à fadiga e deformação permanente. Primeiro é determinado esses resultados dos ensaios e em seguida é calculado os fatores de utilidade, os quais serão determinados com base na metodologia apresentada na Figura 3. As fórmulas utilizadas para o cálculo dos parâmetros de desempenho dos fatores de utilidade são apresentadas nas Equações 1 e 2.

$$P_F = \frac{F}{F_{av}} \tag{1}$$

$$P_{DP} = \frac{1}{\frac{DP}{DP_{av}}} \tag{2}$$

Onde:

- F é o número médio de ciclos de carregamento antes da falha por fadiga
- F_{av} é a vida útil média real de uma mistura asfáltica convencional (0% de RAP)
- DP é o número médio de ciclos de carregamento antes de atingir um valor específico de profundidade de sulco
- DP_{av} é o número equivalente de ciclos de carregamento de uma mistura asfáltica convencional antes de atingir o mesmo valor de profundidade de sulco.

O fator de utilidade [X] será então calculado como o produto de todos os desempenhos quantificados. Nesse estudo a fadiga e a deformação permanente serão utilizadas como parâmetro, por serem duas características independentes dos produtos finais que correspondem a diferentes tensões mecânicas. A Equação 3 apresenta a fórmula para o cálculo do fator de utilidade.

$$X = \prod_{i=1}^n [P_i] \quad (3)$$

Após obtenção dos fatores de utilidade correspondentes para cada mistura asfáltica, a próxima etapa é calcular os Índices de Circularidade do Material (ICM) referentes a cada composição de mistura asfáltica, utilizando a metodologia descrita acima. Dentre as composições de misturas analisadas, a que apresentar maior valor de ICM será considerada a mais circular entre as demais.

Metodologia de aplicação do estudo no curso de Engenharia Civil

Para realização do estudo será necessária a leitura de artigos científicos publicados em periódicos internacionais, dissertações e teses, e normas padronizadas; que apresentem estudos parecidos aplicando a mesma metodologia científica. Um estudo base para a realização dessas pesquisas é o trabalho desenvolvido por Melo Neto [41].

A realização do estudo deverá ser em laboratório voltado à Geotecnia com ênfase em pavimentação. Todos os alunos envolvidos estarão utilizando Equipamentos de Proteção Individual (EPI's) para manuseio com os materiais e execução dos ensaios experimentais. A turma deverá ser dividida em 5 equipes onde cada uma irá avaliar a mistura asfáltica com um teor diferente do aditivo (6, 7, 8, 9 e 10%).

As etapas para desenvolvimento da pesquisa são: (i) aquisição dos materiais e a caracterização de cada um por meio de normas específicas, (ii) modificação dos ligantes asfálticos e análise física empírica e reológica por meios dos ensaios normatizados, (iii) produção das misturas asfálticas recicladas com os materiais caracterizados e pré-selecionados anteriormente, (iv) análise mecânica das misturas asfálticas recicladas por meio dos ensaios mecânicos prescritos em normas, e (v) avaliação ambiental das misturas asfálticas por meio do índice de circularidade (ICM).

Todos os alunos serão avaliados pelo empenho dentro do laboratório e pela análise física, reológica, mecânica e ambiental das amostras de misturas asfálticas recicladas. Os estudantes deverão escrever um artigo científico abordando a análise do estudo dessa pesquisa, apresentando e discutindo os resultados encontrados e a viabilidade da sua aplicação para posterior submissão e publicação em um periódico nacional ou internacional, se enquadrando no escopo de Engenharias I da CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior).

3. Resultados Esperados

Com o desenvolvimento dessa pesquisa laboratorial no curso de Engenharia Civil, espera-se que:

- a borra dos óleos vegetais consiga reduzir o grau de desempenho (PG) do ligante asfáltico recuperado nos teores propostos;
- o desempenho mecânico das misturas asfálticas recicladas seja equivalente ou superior às misturas asfálticas tradicionais;
- os alunos envolvidos no projeto de pesquisa consigam aprender e interpretar ensaios realizados para caracterização de materiais asfálticos;
- a produção de artigos científicos também proporcione ao aluno uma maior ligação com a academia.

4. Considerações Finais

A realização dessa proposta de intervenção pedagógica permitiu concluir que:

- o envolvimento dos alunos do curso de Engenharia Civil nesse projeto de pesquisa abrirá portas para a vivência científica e para análises de materiais empregados no ramo da pavimentação, possibilitando um leque de oportunidades na atuação do futuro Engenheiro Civil, em campo e em laboratório;
- a proposta de intervenção foi construída a fim de que os alunos do curso de Engenharia Civil consigam vivenciar a prática em laboratório, tornando-os profissionais mais capacitados e permitindo uma maior relação com atuantes da área. O emprego dessa intervenção tende a combater dificuldades encontradas nos cursos de Engenharia Civil como a ausência do aprofundamento de estudos voltados à área, melhorando o relacionamento entre alunos e instituição;
- a produção de misturas asfálticas recicladas com alto teor de RAP e com ligantes asfálticos modificados por material oriundo do processamento de óleo vegetal é uma temática que vem sendo estudada e faz parte da realidade dos profissionais atuantes na área da pavimentação no Brasil;
- o estudo de materiais alternativos sustentáveis é um cenário promissor por apresentar destinos adequados a produtos de baixo custo e com pouca finalidade. Assim, essa pesquisa abordando o uso de subprodutos e de resíduos na produção de novas misturas asfálticas é um modelo inovador dentro da tecnologia para um público amplo, incluindo aqueles interessados nas áreas ambiental, de petróleo e pavimentos.

Referências

1. Pérez-Martínez, M.; Moreno-Navarro, F.; Martín-Marín, J.; Ríos-Losada, C.; Rubio-Gómez, C.M. *Analysis of cleaner technologies based on waxes and surfactant additives in road construction*. Journal of Cleaner Production, 2014. **65**: p. 374-379. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.09.012>
2. Movilla-Quesada, D.; Raposeiras, A.C.; Lagos-Varas, M.; Muñoz-Cáceres, O.; Andrés-Valeri, V. C.; Troncoso, L. *Study of the optimal dosage of cellulose ash as a contribution filler in*

- asphalt mixtures based on its adhesiveness under moisture conditions*. Sustainability, 2021. **13**: p. 1-16. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13020854>
3. Cruz, G.K.A., Melo Neto, O.M., Arruda, S.M., Lucena, L.C.F.L., Ziegler, C.R., Silva, G.C.B., Influence of particle size selection methods on asphalt mixtures produced with lateritic aggregates. Construction and Building Materials, 2022. **314**. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125201>
 4. Mendonça, A.M.G.D.; Melo Neto, O.M.; Rodrigues, J.K.G.; Lima, R.K.B.; Silva, I.M.; Marques, A.T. *Characterisation of modified asphalt mixtures with lignin of pinus and eucalyptus woods*. Australian Journal of Civil Engineering, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1080/14488353.2022.2089376>
 5. Lastra-González, P.; Indacochea-Vega, I.; Calzada-Pérez, M.A.; Vega-Zamanillo, A.; Castro-Fresno, D. *Assessment of induction heating in the performance of porous asphalt mixtures*. Road Materials and Pavement Design, 2020. **21**: p. 2302-2320. DOI: <https://doi.org/10.1080/14680629.2019.1606729>
 6. Garcia, A.; Salih, S.; Gómez-Mejide, B. *Optimum moment to heal cracks in asphalt roads by means electromagnetic induction*. Construction and Building Materials, 2020. **238**. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117627>
 7. Mendonça, A.M.G.D., Melo Neto, O.M., Rodrigues, J.K.G., Silvani, C., Lima, R.K.B., *Physicochemical and rheological effects of the incorporation of micronized polyethylene terephthalate in asphalt binder*. Petroleum Science and Technology, 2022. **40**. DOI: <https://doi.org/10.1080/10916466.2021.2007124>
 8. Morsali, S.; İşildar, G.Y. *Determination of Environmental Impacts of Bituminous Highway's by Life Cycle Assessment*. Computational Engineering and Physical Modeling, 2020. **3**: p. 38–50. DOI: 10.22115/CEPM.2020.209139.1074
 9. Mendonça, A.M.G.D.; Melo Neto, O.M.; Rodrigues, J.K.G.; Dantas, I.S.; Silva, I.M.; Costa, D.B.; Lima, R.K. *Análise física-reológica de ligantes asfálticos modificados com óleo de algodão refinado para uso em misturas asfálticas mornas*. Revista Cubana de Ingeniería, 2022. **13**.
 10. Fonseca, J.F.; Góis, T.S.; Dominicini, W.K.; Teixeira, J.E.S.L. *O estado da arte sobre o uso de reciclado de pavimento asfáltico na pavimentação no Brasil e no mundo*. ANPET, 2014.
 11. Dib, M.H.M. *Fundamentos do Fresamento: uma aplicação em microfresamento*. Dissertação de Mestrado em Manufatura, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2013.
 12. Cunha, C.B.; Budny, J.; Klamt, R.A.; Centofante, R.; Baroni, M. *Avaliação de concreto asfáltico usinado a quente com incorporação de material fresado*. Revista Matéria, 2018. **23**. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620180003.0520>
 13. Karlsson, R.; Isacson, U. *Material-related aspects of asphalt recycling – state of – the art*. Journal of Materials in Civil Engineering, 2006. **18**. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2006\)18:1\(81\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2006)18:1(81))
 14. Chiu, C.; Hsu, T.; Yang, W. *Life cycle assessment on using recycled materials for rehabilitating asphalt pavements*. Resources, Conservation & Recycling, 2008. **52**: p. 545-556. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2007.07.001>
 15. Huang, B.; Shu, X.; Vukosa Vljevic, D. *Laboratory Investigation of Cracking Resistance of Hot-Mix Asphalt Field Mixtures Containing Screened Reclaimed Asphalt Pavement*. Journal of Materials in Civil Engineering, 2011. **23**: p. 1535-1543. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000223](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000223)
 16. Anthonissen, J.; Van Den Bergh, W.; Braet, J. *Reuse of bituminous pavements: A mini-review of research, regulations and modelling*. Waste Management & Research, 2017. **35**: p. 357-366. DOI: 10.1177/0734242X16678064
 17. Ding, X.; Chen, L.; Ma, T.; Ma, H.; Gu, L.; Chen, T.; Ma, Y. *Laboratory investigation of the recycled asphalt concrete with stable crumb rubber asphalt binder*. Construction and Building Materials, 2019. **203**: p. 552-557. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.114>

18. Chen, T.; Luan, Y.; Ma, T.; Zhu, J.; H., Xiaoming; Ma, S. *Mechanical and microstructural characteristics of different interfaces in cold recycled mixture containing cement and asphalt emulsion*. Journal of Cleaner Production, 2020. **258**. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120674>
19. Stimilli, A.; Virgili, A.; Canestrari, F. *Warm recycling of flexible pavements: Effectiveness of Warm Mix Asphalt additives on modified bitumen and mixture performance*. Journal of Cleaner Production, 2017. **156**: p. 911-922. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.235>
20. Reyes-Ortiz, O.; Berardinelli, E.; Alvarez, A.E.; Carvajal-Muñoz, J.S.; Fuentes, L.G. *Evaluation of hot mix asphalt mixtures with replacement of aggregates by reclaimed asphalt pavement (RAP) material*. Procedia - Social and Behavioral Sciences, 2012. **53**: p. 379-388. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.09.889>
21. Casey, D.; McNally, C.; Gibney, A.; Gilchrist, M.D. *Development of a recycled polymer modified binder for use in stone mastic asphalt*. Resources, Conservation & Recycling, 2008. **52**: p. 1167-1174. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2008.06.002>
22. Zaumanis, M.; Mallick, R.B.; Poulidakos, L.; Frank, R. *Influence of six rejuvenators on the performance properties of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) binder and 100% recycled asphalt mixtures*. Construction and Building Materials, 2014. **71**: p. 538-550. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.073>
23. Dokandari, P.A.; Kaya, D.; Sengoz, B.; Topal, A. *Implementing waste oils with reclaimed asphalt pavement*. In: Proceedings of the 2nd World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering (CSEE'17), 2017.
24. Shen, J.; Amirhanian, S.; Miller, J.A. *Effects of rejuvenating agents on superpave mixtures containing reclaimed asphalt pavement*. Journal of Materials in Civil Engineering, 2007. **19**: p. 376-384. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2007\)19:5\(376\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:5(376))
25. Silva, G.A.M.; Rós, P.C.M.; Souza, L.T.A.; Costa, A.P.O.; Castro, H.F. *Physico-chemical, spectroscopical and thermal characterization of biodiesel obtained by enzymatic route as a tool to select the most efficient immobilized lipase*. Brazilian Journal of Chemical Engineering, 2012. **29**: p. 39-47. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0104-66322012000100005>
26. Epps Martin, A.; Kaseer, F.; Arámbula-Mercado, E.; Bajaj, A.; Sias, J.E.; Hajj, E.Y.; Morian, N.; Ogbo, C.; Ceccovilli, R. *Component materials selection guidelines and evaluation tools for binder blends and mixtures with high recycled materials content and recycling agents*. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 2019. **88**.
27. Kaseer, F.; Epps Martin, A.; Arámbula-Mercado, E. *Use of recycling agents in asphalt mixtures with high recycled materials contents in the United States: A literature review*. Construction and Building Materials, 2019. **211**: p. 974-987. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.286>
28. Zargar, M.; Ahmadiania, E.; Asli, H.; Karim, M.R. *Investigation of the possibility of using waste cooking oil as a rejuvenating agent for aged bitumen*. Journal of Hazardous Materials, 2012. **233**: p. 254-258. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2012.06.021
29. Hajj, E.Y.; Souliman, M.I.; Alavi, M.Z.; Salazar, L.G.L. *Influence of hydrogreen bioasphalt on viscoelastic properties of reclaimed asphalt mixtures*. Transportation Research Record, 2013. **2371**: p. 13-22. DOI: <https://doi.org/10.3141/2371-02>
30. Wen, H.; Bhusal, S.; Wen, B. *Laboratory evaluation of waste cooking oil-based bioasphalt as an alternative binder for hot mix asphalt*. Journal of Materials in Civil Engineering, 2013. **25**: p. 1432-1437. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000713](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000713)
31. Ji, J.; Yao, H.; Suo, Z.; You, Z.; Li, H.; Xu, S.; Sun, L. *Effectiveness of vegetable oils as rejuvenators for aged asphalt binders*. Journal of Materials in Civil Engineering, 2017. **29**. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001769](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001769)
32. Zhang, R.; Wang, H.; Jiang, X.; You, Z.; Yang, X.; Ye, M. *Thermal storage stability of bio-oil modified asphalt*. Journal of Materials in Civil Engineering, 2018. **30**. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002237](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002237)

33. Jalkh, R.; El-Rassy, H.; Chehab, G.; Abiad, M. *Assessment of the physico-chemical properties of waste cooking oil and spent coffee grounds oil for potential use as asphalt binder rejuvenators*. Waste and Biomass Valorization, 2018. **9**: p. 2125-2132. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12649-017-9984-z>
34. Taherkhani, H.; Noorian, F. *Comparing the effects of waste engine and cooking oil on the properties of asphalt concrete containing reclaimed asphalt pavement (RAP)*. Road Materials and Pavement Design, 2018. **21**: p. 1-20, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1080/14680629.2018.1546220>
35. El-Shorbagy, A.M.; El-Badawy, S.M.; Gabr, A.R. *Investigation of waste oils as rejuvenators of aged bitumen for sustainable pavement*. Construction and Building Materials, 2019. **220**: p. 228-237. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.180>
36. Sotoodeh-Nia, Z.; Manke, N.; Williams, R.C.; Cochran, E.W.; Porot, L.; Chailleux, E.; Presti, D.L.; Carrión, A.J.B.; Blanc, J. *Effect of two novel bio-based rejuvenators on the performance of 50% RAP mixes—a statistical study on the complex modulus of asphalt binders and asphalt mixtures*. Road Materials and Pavement Design, 2019. **22**: p. 1-18. DOI: <https://doi.org/10.1080/14680629.2019.1661276>
37. Melo Neto, O.M.; Mendonça, A.M.G.D.; Rodrigues, J.K.G.; Lima, R.K.B.; Silvani, C.; Silva, I.M. *Rheological study of asphalt binder modified by cotton and copaiba oils*. Revista Cubana de Ingeniería, 2022. **13**.
38. Seidel, J.C.; Haddock, J.E. *Rheological characterization of asphalt binders modified with soybean fatty acids*. Construction and Building Materials, 2014. **53**: p. 324-332. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.087>
39. Melo Neto, O.M. *Viabilidade de misturas asfálticas recicladas com o ácido graxo da borra do óleo de soja*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Brasil, 2022.
40. Ellen MacArthur Foundation. *Towards the Circular Economy*. Ellen MacArthur Foundation: Cowes, U.K., 2013. **1**: p. 1–96.
41. Mantalovas, K.; Di Mino, G. *Integrating Circularity in the Sustainability Assessment of Asphalt Mixtures*. Sustainability, 2020. **12**. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12020594>

Conflito de Interesses

Nenhum potencial de interesse competitivo foi relatado pelos autores.

Contribuição dos autores

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

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

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

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

Gustavo Correia Basto da Silva. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6081-2540>

Redação, edição e revisão do manuscrito.

Edmilson Dantas da Silva Filho. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1981-7558>

Redação, edição e revisão do manuscrito.

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

Redação, edição e revisão do manuscrito.