



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO  
CENTRO DE CIÊNCIAS DE BALSAS  
COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**MARIA VITORIA ARAUJO SOUSA**

**INFLUÊNCIA DO MOMENTO DE ADIÇÃO DO AGENTE  
REJUVENESCEDOR EM MISTURAS RECICLADAS**

**BALSAS-MA  
2025**

MARIA VITORIA ARAUJO SOUSA

Influência do momento de adição do agente rejuvenescedor em misturas recicladas

Trabalho de Conclusão de Curso na modalidade Monografia, submetido à Coordenação de Engenharia Civil da Universidade Federal do Maranhão como parte dos requisitos necessários para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Beserra Costa

Balsas-MA  
2025

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

Araujo Sousa, Maria Vitoria.

Influência do momento de adição do agente  
rejuvenescedor em misturas recicladas / Maria Vitoria  
Araujo Sousa. - 2025.

60 f.

Orientador(a): Daniel Beserra Costa.

Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do  
Maranhão, Balsas, 2025.

1. Rap. 2. Agente de Reciclagem. 3.Momento  
de Adição. I. Beserra Costa, Daniel. II. Título.

MARIA VITORIA ARAUJO SOUSA

Influência do momento de adição do agente rejuvenescedor em misturas recicladas

Trabalho de conclusão de curso na modalidade Monografia, submetido à Coordenação de Engenharia Civil da Universidade Federal do Maranhão como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

**Aprovado em: 17 de fevereiro de 2025.**

---

Prof. Dr. Daniel Beserra Costa – Orientador

---

Profa. Me. Ranna de Sousa Barros – Examinador interno

---

Profa. Dra. Thamires Dantas Guerra – Examinador externo

Balsas-MA

2025

Dedico este trabalho aos meus pais, que com dedicação e sacrifícios, tornaram possível essa realização. A minha mãe, que costurou os meus sonhos, e ao meu pai, que desbravou estradas, e construiu a fundação do meu futuro.

## AGRADECIMENTOS

Toda honra e toda glória a Deus, por cada momento de inspiração divina, por caminhar ao meu lado e escutar as preces do meu coração, sendo uma companhia silenciosa nas longas noites de estudo, me fazendo persistir e me ensinando que a verdadeira força vem da fé e que, com confiança e empenho, qualquer desafio pode ser vencido.

Agradeço ao meu orientador, professor Dr. Daniel Beserra Costa, por toda a paciência e ensinamento ao longo desses meses, reitero a minha eterna gratidão pelo compartilhamento do seu tempo e conhecimento, obrigada por me desafiar ir além do que eu acreditava conseguir alcançar.

Agradeço a esta universidade que me ensinou que o sucesso acadêmico se dar por 10% de inspiração e 90% de persistência (e energéticos), além de estimular a minha habilidade na arte da argumentação, que apliquei em seminários e negociando prazos de entrega. Assim como, agradeço a todos os colaboradores e professores dessa rede de ensino, em especial ao prof. Me. Leandro Domingos, antigo coordenador, por toda a “paciência” e conselhos, e a prof. Me. Ranna Barros, pelo seu dom de ensino e por sua leveza de ser.

Agradeço aos meus pais: João Luis Sousa Neto e Goiaci Araujo de Oliveira e aos meus irmãos: Kaio Araujo Sousa e Kauan Araujo Sousa, a minha cunhada: Mariele Santiago, e ao meu sobrinho Henrique, pelo amor, incentivo e apoio incondicional, obrigada por acreditarem em mim, vocês foram fundamentais. Assim como, agradeço ao meu namorado, Matheus Moreira Rodrigues, por todo o amor, paciência e compreensão, e por me fazer ter certeza de que eu tenho com quem contar, obrigada por tanto.

Agradeço aos meus amigos de graduação, em especial Keven Dalton, José de Arimateia e Pedro Augusto, por todas as risadas (muitas), lanches compartilhados, caronas e pelas vezes que reciprocamente nos motivamos a continuar quando a jornada parecia impossível.

## RESUMO

A pavimentação asfáltica está suscetível a deformidades que comprometem sua vida útil, necessitando de restauração constante. Geralmente, essa restauração é realizada por meio da fresagem do asfalto antigo e aplicação de uma nova camada. Diante desses fatores, uma alternativa sustentável é a reciclagem do material fresado, conhecido popularmente como RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*), que reduz a necessidade de novos materiais e reutiliza pavimentos deteriorados. Para revigorar o ligante envelhecido do RAP, são utilizados Agentes de Reciclagem (AR). No entanto, há uma falta de padronização em sua aplicação, juntamente com a variedade de ARs e o grau de envelhecimento do ligante, o que dificulta a definição do momento de adição. Este estudo teve como objetivo analisar misturas asfálticas contendo 25% de RAP e diferentes tipos de ARs (ADCAP WM e óleo residual de motor) em diferentes etapas da produção: junto ao fresado, ao agregado e ao ligante. Os resultados mostraram que o ADCAP WM, e o óleo residual de motor, são opções viáveis em misturas recicladas, enfatizando as misturas modificadas com óleo residual de motor como uma melhor opção, pelo seu desempenho geral, evidenciando a boa performance independentemente do momento de adição.

Palavras-chave: RAP, agente de reciclagem, momento de adição.

## ABSTRACT

Asphalt paving is susceptible to deformities that compromise its useful life, requiring constant restoration. Generally, this restoration is carried out by milling old asphalt and applying a new layer. Given these factors, a sustainable alternative is the recycling of fresh material, popularly known as RAP (Reclaimed Asphalt Pavement), which reduces the need for new materials and reuse of deteriorated pavements. To reinvigorate the aging RAP binder, Recycling Agents (RA) are used. However, there is a lack of standardization in its application, particularly with the variety of ARs and the degree of aging of the binder, which makes it difficult to define the moment of addition. This study aimed to analyze asphalt mixtures containing 25% RAP and different types of ARs (ADCAP WM and residual engine oil) at different stages of production: together with fresh, aggregate and binder. The results showed that ADCAP WM, and residual engine oil, are viable options in recycled mixtures, emphasizing mixtures modified with residual engine oil as a better option, due to their general performance, showing good performance regardless of the time of addition.

Palavras-chave: RAP, recycling agent, addition moment.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Deformação em pavimentos asfálticos .....	18
Figura 2 - Material retirado na fresagem .....	25
Figura 3 - Fluxograma geral .....	30
Figura 4 - Corpo de prova e solicitações em ensaio de compressão diametral .....	32
Figura 5 - Ensaio de Modulo de Resiliência .....	33
Figura 6 - Ensaio de LOTTMAN modificado .....	34
Figura 7 - RT (amostras de 25% + Óleo de motor) .....	37
Figura 8 - RT (amostras de 25% + ADCAP WM) .....	39
Figura 9 - MR (amostras de 25% RAP + Óleo residual de motor) .....	42
Figura 10 - MR (amostras de 25% de RAP + ADCAP WM) .....	43
Figura 11 - LOTTMAN modificado (amostras de 25% de RAP + óleo residual de motor) ...	45
Figura 12 - LOTTMAN modificado (amostras de 25% RAP + ADCAP WM).....	46

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Módulo de resiliência de misturas asfálticas com RAP.....	20
Tabela 2 – Vida de fadiga de misturas asfálticas com RAP.....	21
Tabela 3 - Resistência à deformação permanente de misturas asfálticas com RAP.....	21
Tabela 4 – Métodos de reabilitação de pavimentos asfálticos.....	24
Tabela 5 - Nomenclatura das amostras.....	32
Tabela 6 – Especificações de serviço do concreto asfáltico convencional e reciclado para RT41	

## LISTA DE SIGLAS

AASHTO – do inglês, *American Association of State Highway Transportation Officials*

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AR – Agentes de reciclagem

ARRA – do inglês, *Asphalt Recycling & Reclaiming Association*

ASTM – do inglês, *American Society for Testing and Materials*

CIR – do inglês, *Cold in-place recycling*

CR – do inglês, *Cold recycling*

CP – do inglês, *Cold planing*

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes

EUA - Estados Unidos da América

F-T – do inglês, *Freeze-Thaw*

FDR – do inglês, *Full depth reclamation*

FHWA – do inglês, *Federal Highway Administration*

HR – do inglês, *Hot recycling*

HIR – do inglês, *Hot in-place recycling*

MPa – Megapascal

MR – Módulo de resiliência

NAPA – do inglês, *National asphalt pavement association*

RAP - do inglês, *Reclaimed Asphalt Pavement*

RT – Resistência à tração por compressão diametral

SUPERPAVE – do inglês, *Superior Performing Asphalt Pavement System*

UFMG – Universidade Federal de Campina Grande

UFMA - Universidade Federal do Maranhão

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	14
2 JUSTIFICATIVA .....	16
3 OBJETIVOS.....	17
3.1 Objetivo geral .....	17
3.2 Objetivo Específico .....	17
4 REFERENCIAL TEORICO.....	18
4.1 Propriedades mecânicas de misturas asfálticas .....	18
4.1.1 Modulo de Resiliência.....	19
4.1.2 Fadiga .....	20
4.1.3 Deformação Permanente .....	21
4.2 Reciclagem de misturas asfálticas .....	22
4.3 <i>Reclaimed Asphalt Pavement</i> (RAP).....	24
4.4 Rejuvenescimento de misturas asfálticas .....	25
4.4.1 Agentes de reciclagem.....	26
4.4.1.1 Agentes de reciclagem orgânicos .....	26
4.4.1.2 Agentes de reciclagem surfactantes.....	27
4.4.1.3 Agentes rejuvenescedores.....	27
4.5 Métodos de aplicações de agentes de reciclagem.....	28
5 METODOLOGIA.....	30
5.1 Resistencia à tração por compressão diametral .....	32
5.2 Módulo de resiliência .....	33
5.3 Ensaio de Lottman Modificado .....	34
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	37
6.1 Resistencia a tração por compressão diametral .....	37
6.1.1 Óleo residual.....	37
6.1.2 ADCAP WM .....	38
6.1.3 Análise Geral .....	40
6.2 Modulo de resiliência .....	41
6.2.1 Óleo residual.....	41
6.2.2 ADCAP WM .....	43
6.2.3 Análise geral .....	44

6.3 LOTTMAN modificado .....	45
6.3.1 Óleo residual de motor .....	45
6.3.2 ADCAP WM .....	46
6.3.3 Análise Geral .....	47
7 CONCLUSÃO.....	49
7.1 Sugestões para pesquisas futuras .....	51
REFERÊNCIAS .....	52

## 1 INTRODUÇÃO

O transporte rodoviário corresponde a 64,85% do traslado de cargas no Brasil, sendo essencial para a economia do país (CNT, 2024). No entanto, a pavimentação asfáltica está sujeita a uma variedade de defeitos que tendem a reduzir sua vida útil, como desgaste superficial, trincas, afundamentos nas trilhas de roda, escorregamento do revestimento e ondulações, levando a uma degradação progressiva. Conseqüentemente, a pavimentação asfáltica necessita de manutenção constante para conter essa degradação, regularmente essa manutenção ocorre fresando o asfalto antigo e aplicando uma nova camada. Porém, esse processo gera grandes quantidades de resíduos, chamados de fresado, que não são facilmente reciclados ou descartados, aumentando os custos e impactos ambientais das intervenções (Raul, 2019).

Dessa forma, a indústria da pavimentação vem intensificando seus esforços com o intuito de adotar práticas mais sustentáveis, levando em conta os impactos ambientais gerados por suas atividades. Uma alternativa alinhada com a conservação de recursos financeiros e ambientais é a reciclagem do material fresado, conhecido como *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP), derivado do desbaste realizado durante as operações de restauração e reabilitação de pavimentos asfálticos (FHWA, 2016). Essa prática não apenas reduz a necessidade de novos materiais, mas também oferece uma solução sustentável para o reaproveitamento de pavimentos deteriorados (Abdo, 2016).

Ainda que possua um grande potencial de reciclagem, o RAP enfrenta vários desafios. Conforme Unger Filho (2019), os principais impasses incluem: a ausência de informações sobre a construção original, a heterogeneidade da mistura, as alterações na granulometria à custa da fresagem, o tipo e o envelhecimento do ligante asfáltico sendo fundamentais para a interação entre o ligante novo e o antigo, a variação na espessura da camada de revestimento, e as adaptações necessárias na usina. As normas para projetos com asfalto reciclado sugerem variadas estratégias para a restauração do ligante oxidado, como o uso de ligantes menos viscosos, aditivos rejuvenescedores, redutores de temperatura de mistura e tecnologias como o asfalto espumado, entre outras soluções (Costa, 2022).

A aplicação de Agentes de Reciclagem (AR) são, costumeiramente, a solução adotada para revitalização do ligante desgastado presente no fresado. Por definição, os AR's são produtos que contém propriedades capazes de restaurar as características do ligante asfáltico oxidado (Reis, 2013). Dessa forma, a adição de AR tende a favorecer a diminuição da consistência do ligante envelhecido, fazendo com que contenha maiores valores de penetração

(Silva, 2018). Todavia, em função da diversidade de AR's e ao impacto do grau de envelhecimento do ligante, não existe uma padronização na sua aplicação. Além disso, soma-se dilemas como: A quantidade ideal do teor de AR e o momento da adição. Parâmetros fundamentais para garantir a interação eficaz entre o RAP e o ligante virgem (Moghaddam, 2016).

O excesso de AR pode provocar diminuição da consistência do ligante asfáltico, favorecendo o surgimento de defeitos como deformação permanente (trilha de rodas). Enquanto, a deficiência pode afetar o rejuvenescimento do ligante presente no fresado, o que pode proporcionar aumento da rigidez da mistura e, conseqüentemente, favorecer a ocorrências de defeitos por fadiga (Tricas, fissuras, etc.) (Raul, 2019). O momento de adição do AR influencia de forma direta a configuração da usina, induzindo os custos e o desempenho das misturas recicladas, fazendo desse fator fundamental para o resultado do processo. A decisão imprópria do momento em que o AR será incorporado, pode gerar um desgaste abundante no ligante envelhecido, além de prejudicar o agente rejuvenescedor ou o novo ligante usado, formando uma mistura mais vulnerável (Suzuki, 2019). Diante disso, a escolha do momento ideal é crucial, visto que, essa decisão é capaz de diminuir o uso do AR, reduzir os custos, e proporcionar uma mistura reciclada com performance superior.

Neste contexto, o presente trabalho procura analisar a influência do momento de adição de agentes rejuvenescedores em misturas asfálticas contendo materiais reciclados, com o intuito de avaliar seu impacto no desempenho e na durabilidade dessas misturas.

## 2 JUSTIFICATIVA

Diante da crescente preocupação ambiental, da importância dos pavimentos asfálticos e dos problemas frequentes nas rodovias, a alteração e modernização desses pavimentos torna-se uma necessidade imediata. Muitos estudos sobre o uso de asfalto reciclado vêm sendo feitos (Fritzen *et al.*, 2012; Guatimosin, 2015; Suzuki, 2019; Raul, 2019, entre outros), visto que, manifesta-se como uma alternativa interessante para a restauração e aprimoramento das rodovias, tanto no Brasil quanto no mundo, proporcionando uma solução sustentável e eficaz para a infraestrutura viária.

No entanto, existe uma falta de sintonia relacionado ao desenvolvimento de misturas recicladas com RAP principalmente por dois fatores: o momento de adição do agente de reciclagem e o teor deste agente (Leite *et al.*, 2021). Para melhorar a utilização do RAP, é essencial gerir esses dois fatores, regulando o momento e a quantidade do agente para garantir os melhores resultados mecânicos. A análise do teor mínimo de agente de reciclagem pretende alcançar uma mistura econômica, com bom desempenho e custo-benefício.

Determinar o momento ideal para a adição do agente rejuvenescedor (AR) em misturas recicladas é essencial para assegurar a recuperação eficiente das propriedades do ligante envelhecido, como viscosidade e flexibilidade, além de assegurar a distribuição homogênea do AR na mistura. Isso influencia de forma direta a longevidade e o desempenho mecânico do pavimento, minimizando os defeitos como fissuras e deformações (Takahashi, 2020). Ademais, o momento correto melhora a dosagem do AR, evita desperdícios e torna o processo de reciclagem mais eficiente e sustentável, proporcionando o atributo final do pavimento reciclado.

À vista disso, este trabalho tem potencial de contribuir de forma significativa para a análise do momento ideal de adição do agente rejuvenescedor, não apenas em misturas recicladas, mas também em pesquisas relacionadas a diferentes tipos de misturas asfálticas. A absorção desse elemento pode aprimorar o desempenho, a durabilidade e a sustentabilidade de vários pavimentos, possibilitando práticas superiores de reciclagem e otimização no uso de materiais asfálticos.

### **3 OBJETIVOS**

#### **3.1 Objetivo geral**

Este estudo tem como objetivo analisar a efetividade de misturas asfálticas recicladas, introduzindo dois agentes de reciclagem em distintas etapas do processo de produção.

#### **3.2 Objetivo Específico**

- Definir a etapa do processo produtivo no qual o agente de reciclagem tem de ser adicionado.
- Verificar o impacto da adição de agentes de reciclagem no comportamento mecânico das misturas asfálticas desenvolvidas com a incorporação de RAP (Pavimento Asfáltico Reciclado).
- Analisar e selecionar o aditivo mais adequado para o asfalto reciclado.

## 4 REFERENCIAL TEORICO

Nesse tópico são abordados assuntos relacionados a reciclagem de pavimentos, com o intuito de facilitar a compreensão do que se trata essa técnica, apresentando as metodologias mais utilizadas para a execução, suas principais características, limitações e problemas.

### 4.1 Propriedades mecânicas de misturas asfálticas

A tendência global no setor rodoviário é a adesão de métodos de dimensionamento mecanísticos para pavimentos, sejam eles flexíveis ou rígidos, novos ou restaurados (Pitangui, 2019). Esses métodos aplicam meios de análise estrutural para calcular tensões e deformações, permitindo a avaliação precisa dos mecanismos de fadiga e deformação permanente, cooperando para a eficiência e durabilidade das estruturas.

O dimensionamento de pavimentos por métodos mecanísticos requer a atenção para alguns parâmetros de entrada, como as propriedades de deformabilidade dos materiais, fatores ambientais e o volume de tráfego, além de critérios de aceitação, como a vida útil à fadiga e a resistência ao afundamento de trilhas de roda (Bastos, 2017), como apresentados na Figura 1. A caracterização mecânica dos materiais, por conseguinte, é fundamental para garantir a funcionalidade esperada do pavimento ao longo de sua vida útil. Nesse contexto, os ensaios dinâmicos ou de cargas repetidas, que visam expor as condições reais de tráfego, apresentam um papel importante na avaliação exata das propriedades dos materiais de pavimentação, favorecendo para a segurança e longevidade das estruturas rodoviárias (Bastos, 2017).

Figura 1- Deformação em pavimentos asfálticos



Fonte: Moraes (2019)

A designação da distribuição de tensões, deformações e deslocamentos estimulado pelo tráfego em pavimentos baseia-se na teoria da elasticidade (Ponte *et al.*, 2014). Ainda que muitos materiais de pavimentação não possuem um comportamento somente elástico, mostrando deformações plásticas a cada ciclo de carregamento, as análises embasadas em camadas elásticas-lineares são aceitas como uma aproximação confiável. Essa concordância justifica-se

pelo comportamento próximo ao elástico que os materiais demonstram ao serem sujeitos a cargas pequenas em relação à sua resistência e aplicadas repetidamente ao longo de muitos ciclos (Bertollo, 2002).

#### 4.1.1 Módulo de Resiliência

O termo "resiliência" foi adotado por Hveem em 1955, sendo uma nomenclatura própria para o desempenho de materiais de pavimentação. A diferença entre o módulo de elasticidade, vastamente utilizado em materiais como concreto e aço, e o módulo de resiliência é justificada pelas grandes deformações características dos pavimentos, um comportamento singular no campo da pavimentação e geotecnia.

O módulo de resiliência do concreto asfáltico é influenciado por diversos fatores. A granulometria da mistura influencia diretamente a espessura da camada de asfalto e a compactação, impactando a resistência. As particularidades do ligante asfáltico, como a viscosidade e a penetração, também são essenciais, visto que, maior viscosidade tende a aumentar a resiliência, em paralelo, maior penetração reduz o módulo de resiliência (Motta, 1998). A relação asfalto-fíler e a natureza do fíler (tipo de material usado) também influenciam a compactação e as propriedades mecânicas. Apesar de que o teor de ligante possua pouca influência quando estiver dentro dos limites usuais, ele pode impactar o desempenho em dosagens extremas (Bardini *et al.*, 2013). A correlação entre esses fatores é enigmática, tornando desafiador otimizar suas combinações a fim de obter o melhor desempenho do concreto asfáltico.

Tratando-se da rigidez das composições que contém RAP, alguns estudos (Lu *et al.*, 2019; Yousefi *et al.*, 2021, Arruda 2021, Centofante, 2016, entre outros) determinam que existe um aumento do módulo de resiliência para as misturas com maiores teores de RAP. Os pesquisadores alegam que o aumento de rigidez se dá pela presença do ligante envelhecido. No estudo realizado por Gardiner e Wagner (1999), as composições recicladas tinham 15% de RAP, oriundos de Georgia e Minnesota, nos resultados do ensaio de MR foi observado um aumento notável nas misturas com RAP. Centofante (2016) e Bohn (2017), identificaram que em relação a quantidade de material fresado, inserido no lugar do agregado virgem, a medida em que aumenta o RAP, em paralelo, existe um acréscimo no MR. Somente para Arshad *et al.* (2016), houve uma redução com o aumento da porcentagem de RAP na mistura, isto é, o MR diminuiu 47,39% e 50,75% nas misturas RAP15 e RAP25, respectivamente.

Tabela 1 - Módulo de resiliência de misturas asfálticas com RAP

<b>Autor</b>	<b>Até 25%</b>	<b>Resultado</b>
Gardiner & Wagner (1999)	x	aumentou
Arshad <i>et al.</i> (2016)	x	diminuiu
Centofante (2016)	x	aumentou
Bohn (2017)	x	aumentou

Fonte: o autor (2024)

É relevante deixar claro que com o envelhecimento do ligante asfáltico a longo do prazo, o módulo de resiliência das misturas asfálticas tende a variar. Esse processo de envelhecimento provém um enrijecimento do ligante, o que aumenta a rigidez dos revestimentos asfálticos (Bertollo, 2002). Esse fenômeno pode influenciar a durabilidade e o comportamento do pavimento, deixando-o mais vulnerável a fissuras e outros danos ao longo do tempo.

#### 4.1.2 Fadiga

Uma das manifestações mais frequentes nos pavimentos asfálticos é a fissuração por fadiga, que se origina com microfissuras e, após constantes carregamentos cíclicos, progride para rachaduras interligadas até provocar a ruptura estrutural do pavimento (Bernucci *et al.*, 2022). A fadiga normalmente acontece em temperaturas intermediárias e é agravada pelo aumento da dureza e pela falta de flexibilidade da mistura asfáltica. Essas fissuras comumente se originam no ligante asfáltico ou na conexão entre o ligante e os agregados (Hintz; Bahia, 2013), comprometendo a integridade do pavimento ao longo do tempo.

Portanto, a fadiga nos pavimentos asfálticos depende de uma gama de fatores, como as propriedades químicas e reológicas do ligante asfáltico, o processo de envelhecimento (*ageing*), as características e tamanho dos agregados, as propriedades volumétricas da mistura asfáltica, o carregamento aplicado e as condições ambientais (Takashi, 2020). A vida útil de fadiga de um revestimento asfáltico, isto é, o número de cargas básica até causar um determinado nível de trincamento, é respectiva à estrutura do pavimento. O estudo da fadiga em pavimentos asfálticos remonta ao trabalho de Hveem (1955), que constatou que o surgimento de trincas surge pela repetição de pequenas deformações elásticas ao longo do tempo.

Os efeitos das análises, com intuito de pressupor a vida de fadiga de misturas recicladas são bastante discordantes, como descrito na Tabela 2. É importante ressaltar que há vários ensaios e metodologias que são capazes de avaliar esse comportamento, fazendo com que essa comparação seja difícil. Huang *et al.* (2004) analisaram composições com 0, 10, 20 e 30% RAP e chegaram à conclusão de que nas porcentagens mais altas de RAP, a mistura se tornou mais

rígida, dessa forma, as características de fadiga das misturas recicladas são afetadas mediante o acréscimo do volume de RAP adicionado. Assim como, com Tomlinson (2012) foi constatado uma melhoria na vida em fadiga nas amostras com 20% de RAP, enquanto os resultados para as amostras com 40% de RAP foram inconclusivos. Wang *et al.* (2018) indicaram que a performance utilizando o RAP varia de acordo com o projeto da amostra e da estrutura do pavimento.

Tabela 2 – Vida de fadiga de misturas asfálticas com RAP

<b>Autor</b>	<b>Até 25%</b>	<b>Resultado</b>
Huang <i>et al.</i> (2004)	X	aumentou
Tomlinson (2012)	X	aumentou
Wang <i>et al.</i> (2018)	X	diminuiu

Fonte: o autor (2024)

### 4.1.3 Deformação Permanente

A deformação permanente ou deformação plástica acontece de maneira gradual ao longo da vida útil do pavimento, sendo responsável pela formação de flechas nas trilhas de rodas. Esse fenômeno atinge a segurança e o conforto do tráfego, na medida em que altera a regularidade da superfície do pavimento. As deformações permanentes podem dispor tanto ao revestimento asfáltico quanto às subcamadas do pavimento, ou, ainda, à interação desses dois componentes. O efeito é uma combinação múltipla de fatores que impactam o desempenho estrutural e funcional do pavimento (Bernucci *et al.*, 2022).

Acerca da avaliação de resistência à deformação permanente de misturas recicladas, verifica-se uma aptidão de ampliação para as composições com RAP, como descrito na Tabela 3. Gardiner e Wagner (1999), realizaram ensaio para determinar resistência a deformação permanente e verificaram que para os dois materiais coletados, Georgia e Minnesota, registrou uma queda de 20% no potencial de afundamento. Centofante (2016) e Bohn (2017), utilizando o método de *Flow Number*, identificaram um aumento do FN a medida em que o teor de RAP aumenta de 0, 10, 20 e 30% na técnica a quente, e 0, 25 e 50% na técnica morna, respectivamente.

Tabela 3 - Resistência à deformação permanente de misturas asfálticas com RAP

<b>Autor</b>	<b>Até 25%</b>	<b>Resultado</b>
Gardiner & Wagner (1999)	X	aumentou
Centofante (2016)	X	aumentou
Bohn (2017)	X	aumentou

Fonte: o autor (2024)

## 4.2 Reciclagem de misturas asfálticas

A busca por soluções sustentáveis é uma pauta que está sendo cada vez mais frequente na engenharia, principalmente na pavimentação, por causa do seu impacto ambiental. Assuntos como reciclagem e fontes renováveis são cada vez mais frequentes, e a academia tem papel fundamental na criação de inovações que contenham esses impactos. A assimilação entre pesquisa acadêmica e prática na pavimentação tende a levar formas mais ecológicas e suprir o apelo social por sustentabilidade (Gu *et al.*, 2019).

Assim, uma solução para esse impasse seria a reciclagem de pavimentos, que consiste na reconstrução parcial, reciclando materiais das camadas existentes, com ou sem a adição de novos componentes, para fortificar ou revestir a estrutura. Segundo Dias *et al.* (2015), isso minimiza resíduos, a extração de matérias-primas, custos de restauração, além de reduzir tempo e custos de transporte ao reaproveitar materiais da própria obra. Existem várias técnicas de reciclagem e, conseqüentemente, diversas formas de classificá-las.

*Asphalt Recycling & Reclaiming Association - ARRA* (2015) classifica em cinco diferentes métodos. A escolha correta de qual método será utilizado irá depender de alguns fatores como: grau de deterioração da camada a ser reciclada, grau de envelhecimento do ligante, profundidade a ser extraída da camada, nível de tráfego, entre outros. Esses métodos são:

- *Cold Planing* (CP)

O CP (fresagem) tira parcialmente a superfície do pavimento para reparar defeitos e restaurar o atrito, concedendo uso imediato. No entanto, a textura áspera pode diminuir o conforto dos usuários (Carvalho, 2022).

- *Hot Recycling* (HR)

A reciclagem de asfalto a quente mistura RAP com novos materiais, criando misturas recicladas que são aplicadas e compactadas com equipamentos convencionais em temperaturas altas, corrigindo defeitos e promovendo desempenho equivalente ou superior ao asfalto convencional (Takahashi, 2020).

- *Hot In-place Recycling* (HIR)

O processo de reciclagem a quente in situ engloba aquecimento do pavimento asfáltico, fresagem até a profundidade estabelecida e mistura completa do material fresco (RAP). Logo após, o material é espalhado e compactado com equipamentos convencionais de pavimentação. Todo o procedimento é realizado no local, usando uma combinação de pré-aquecedores, fresadoras, misturadoras, pavimentadoras e rolos compactadores. Apresenta benefícios como

eliminação de defeitos, rejuvenescimento do asfalto, pouco impacto no tráfego e redução de custos de transporte (Gaspar, 2019).

- *Cold Recycling (CR)*

A reciclagem de asfalto, CR (do inglês, *Cold Recycling*), é separada em duas subcategorias, onde o CCPR é a reciclagem de asfalto em usinas fixas ou semifixas, adicionando RAP com novos agregados e emulsões asfálticas, aplicado em camadas de 75 a 150 mm com métodos tradicionais. A CIR reaproveita o pavimento existente sem calor, com profundidade de 75 a 100 mm e emulsão asfáltica (Costa, 2022). As vantagens incluem reparo estrutural, melhoria da via, menos transporte de materiais e menor emissão de gases.

- *Full Depth Reclamation (FDR)*

O FDR reabilita pavimentos retirando e misturando asfalto e materiais subjacentes, criando uma base estabilizada. O tratamento de profundidade total varia de 100 a 300 mm, conforme a espessura do pavimento existente. Em alguns casos, é utilizado um aditivo estabilizador quando o material recuperado não apresenta a resistência necessária. O processo inclui fresagem, adição do aditivo, compactação e aplicação de uma camada de desgaste (Silva, 2013). As vantagens desse método são o tratamento de defeitos do pavimento, a conservação de recursos não renováveis, a redução de custos de transporte, a correção de deficiências no subleito e melhorias estruturais significativas, com o uso de poucos equipamentos.

Os cinco métodos apresentados anteriormente podem ser usados de forma conjunta ou separadamente. Para a definição da melhor alternativa a ser utilizada, alguns fatores devem ser analisados, como, as condições locais e os defeitos presentes no pavimento existente, a identificação das prováveis causas dos defeitos, entre outros. A Tabela 4 apresenta a recomendação da ARRA (1992) para a escolha do método de reabilitação do pavimento asfáltico conforme os tipos de defeitos apresentados no pavimento existente.

Tabela 4 – Métodos de reabilitação de pavimentos asfálticos

<b>Tipos de defeitos</b>	<b>Fresagem e recomposição</b>	<b>Reciclagem a quente em usina</b>	<b>Reciclagem a quente no local</b>	<b>Reciclagem a frio</b>	<b>Recuperação profunda</b>
<b>Defeitos superficiais</b>					
Desagregação	X	X	X		
Exudação	X	X	X		
Escorregamento	X	X	X		
<b>Deformação</b>					
Corrugação/ Ondulação	X	X	X		
Afundamento de trilha raso	X	X	X		
Afundamento de trilha profundo		X		X	X
<b>Trincamento (associado ao carregamento)</b>					
Jacaré		X		X	X
Longitudinal		X	X	X	X
Bordo		X		X	X
Derrapagem		X	X		
<b>Trincamento (não associado ao carregamento)</b>					
Bloco		X		X	X
Longitudinal		X	X		
Transversal (térmico)		X		X	X
Reflexão de trincas		X		X	X
<b>Reparos de Manutenção</b>					
Spray		X		X	X
Recapeamento		X		X	X
Buraco/Panela		X		X	X
Reparo profundo		X		X	X
Problemas de base/subbase					X
<b>Irregularidade</b>					
Generalizada	X	X	X		
Depressões locais	X	X	X		X
Pontos altos	X	X	X		X

Fonte: ARRA, 1992. (Adaptado)

### **4.3 Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)**

Os pavimentos sofrem degradação contínua devido ao tráfego, as condições climáticas e o envelhecimento dos materiais, iniciando logo após a construção, antes mesmo de sofrerem

carga (Veiga, 2013). Ao decorrer do tempo, as patologias se expandem, causando danos maiores. Quando a degradação é excessiva, o pavimento precisa ser renovado, e a camada de revestimento é retirada por fresagem ao fim de sua vida útil.

Esse material retirado na fresagem é conhecido como RAP, demonstrado na Figura 2, podendo ser reutilizado como agregado de alta qualidade. Segundo Unger Filho (2019) o RAP deve ser visto como um novo material de pavimentação e ser reutilizado. Sua reutilização diminui o uso de materiais virgens, além de diminuir o descarte em aterros e reduzir custos.

Figura 2 - Material retirado na fresagem



Fonte: Gewehr (2021)

Essa técnica tem se consolidado como uma alternativa economicamente viável em comparação aos métodos convencionais de manutenção, como tapa-buracos e outros serviços, pois, além de apresentarem custos elevados, esses métodos nem sempre oferecem resultados satisfatórios em termos de durabilidade, conforto e segurança para os usuários (Tavares, 2014).

No entanto, os teores de RAP em misturas recicladas ainda são baixos, pois dependem de alguns fatores, como, o processo de mistura, tipo de agente de reciclagem, tipo de usina e temperatura de produção (Sabahfar; Hossain, 2016). Ademais, a qualidade do RAP é influenciada pelo equipamento de fresagem, velocidade e profundidade de recuperação. Em países em desenvolvimento, a utilização de RAP é limitada devido à insuficiência de conhecimento sobre os processos de fabricação e desempenho das misturas recicladas. Contudo, os avanços tecnológicos podem aumentar o uso de RAP na pavimentação (Devulpalli *et al.*, 2019).

A reutilização de materiais de pavimentos antigos simboliza uma solução eficiente para reduzir o volume de resíduos gerados, amenizando o problema crônico da disposição inadequada em locais impróprios. Essa abordagem não apenas resolve desafios ambientais, mas também promove a sustentabilidade no setor de infraestrutura.

#### **4.4 Rejuvenescimento de misturas asfálticas**

A adição de RAP a uma mistura asfáltica influencia no seu desempenho, sendo capaz de causar trincas por fadiga, devido às propriedades alteradas do ligante envelhecido e dos

agregados (Moghaddam; Baaj, 2016). Ao reciclar uma camada de revestimento, é essencial analisar duas características principais do material fresado: a granulometria e o envelhecimento do ligante.

O envelhecimento do ligante asfáltico acontece devido a fatores como temperatura, oxigênio, chuva e tempo, o que aumenta sua consistência e promove o envelhecimento (Yang *et al.*, 2020). O ligante envelhecido é a principal barreira para aumentar o teor de RAP nas misturas asfálticas, visto que essas misturas se tornam mais vulneráveis à fadiga e rachaduras térmicas. Para recuperar as propriedades do ligante, é essencial adicionar agentes de reciclagem (AR), que restauram as características do ligante asfáltico oxidado (Gu *et al.*, 2019).

#### **4.4.1 Agentes de reciclagem**

Na reciclagem de pavimentos, a seleção do AR apropriado depende das condições de envelhecimento do ligante residual presente no revestimento a ser reciclado. Quanto mais envelhecido o ligante, analisado por meio de parâmetros como viscosidade e penetração, menor será a consistência do AR utilizado, garantindo a recuperação de suas propriedades originais (Silva, 2018). Entretanto, ao ser recuperado, o ligante envelhecido pode apresentar problemas de viscosidade devido à contaminação por solventes utilizados na extração do betume. Essa contaminação influencia na determinação da quantidade ideal de AR necessária para recuperar as características do ligante e garantir sua funcionalidade no pavimento reciclado (Silva, 2018).

Inicialmente, os agentes de reciclagem (AR) apenas diminuam a viscosidade do ligante envelhecido no RAP, sem recuperar suas propriedades químicas. Com o aprimoramento das técnicas de produção de misturas recicladas, foram desenvolvidos agentes rejuvenescedores, que ressarcem as propriedades do ligante (Suzuki, 2019). Com o aumento na variedade e composição dos ARs, estes passaram a ser classificados em agentes redutores e agentes rejuvenescedores. Dentro dos ARs redutores, existe uma subdivisão em agentes orgânicos e agentes surfactantes.

##### **4.4.1.1 Agentes de reciclagem orgânicos**

Os agentes de reciclagem orgânicos, como o nome supõe, são compostos à base de produtos orgânicos, apresentando vantagens e desvantagens. Eles reduzem a viscosidade do ligante a altas temperaturas, fazendo com que facilite a usinagem e compactação, além de melhorar a resistência a deformações permanentes em temperaturas intermediárias. No entanto,

conseguem diminuir a resistência à fadiga em baixas temperaturas e reduzir a resistência a deformações permanentes em altas temperaturas (de Medeiros *et al.*, 2022). Alguns exemplos desse material são: óleos orgânicos, *tall oil* e graxa vegetal.

#### **4.4.1.2 Agentes de reciclagem surfactantes**

Os agentes de reciclagem surfactantes são aditivos químicos que atuam como agentes ativos de superfície, melhorando a interação entre o ligante e o agregado, reduzindo a viscosidade. Ademais, esses aditivos elevam a adesividade e facilitam a trabalhabilidade da mistura durante o espalhamento e a compactação (Motta, 2011). Alguns exemplos dessa classe incluem: ADCAP WM, *Rediset* e *Sylvaroad*.

#### **4.4.1.3 Agentes rejuvenescedores**

Os agentes rejuvenescedores podem fornecer maltenos livres de compostos aromáticos, contribuindo para conter os impactos ambientais associados ao uso de produtos à base de petróleo (Bernucci *et al.*, 2022). A ausência de compostos aromáticos nesses agentes diminui a emissão de gases poluentes ao longo da produção de misturas asfálticas recicladas. Todavia, é fundamental que esses agentes apresentem alta compatibilidade com o ligante envelhecido, fazendo com que seja possível uma difusão eficiente e garantindo a recuperação das propriedades originais do ligante asfáltico (O'Sullivan, 2011).

Os agentes rejuvenescedores devem atender às necessidades de desempenho de curto e longo prazo dos pavimentos (Zaumanis *et al.*, 2014). No curto prazo, eles precisam disseminar rapidamente no ligante envelhecido do RAP, impulsionando-o e criando um revestimento uniforme. Têm de suavizar o ligante oxidado, fazendo uma mistura trabalhável que seja aplicada e compactada facilmente, sem gerar emissões excessivas. Além do mais, a difusão deve ocorrer antes do tráfego ser liberado, para evitar problemas como redução do atrito e suscetibilidade ao afundamento (Carvalho, 2022).

Embora os agentes rejuvenescedores ofereçam benefícios econômicos e ambientais, proporcionando maior incorporação de RAP em misturas asfálticas recicladas, algumas instituições permanecem relutantes em autorizar seu uso. Essa resistência acontece pelo potencial de formação de trilhas de roda, gerado pelo excesso de amolecimento do ligante (Martinez, 2018). Caso a interação entre o agente rejuvenescedor e o ligante envelhecido não seja eficiente, pode surgir uma camada superficial de baixa rigidez no RAP, gerando danos prematuros. Enquanto os agentes redutores são conhecidos por diminuir a viscosidade do

ligante oxidado, os agentes rejuvenescedores restauram suas propriedades físicas e químicas, promovendo um desempenho mais equilibrado e duradouro (Karlsson; Isacsson, 2006).

#### **4.5 Métodos de aplicações de agentes de reciclagem**

Abdo (2016) observa que, em misturas contendo até 15% de RAP, o Grau de Desempenho (PG) do ligante pode ser o mesmo utilizado em misturas asfálticas virgens. Entretanto, para teores de RAP entre 15% e 25%, é recomendado utilizar um ligante com PG inferior em um grau nas temperaturas altas e baixas. Quando o teor de RAP ultrapassa 25%, é necessária a realização de testes laboratoriais específicos, como análise de grau de PG, Resistência ao Fluxo não Recuperável (MSCR) e relevantes, para garantir a qualidade e o desempenho da mistura.

A aplicação de agentes rejuvenescedores em misturas asfálticas recicladas é recomendada diretamente sobre o RAP, com o objetivo de melhorar a integração entre os materiais. De acordo com a FHWA (2016), o processo de produção dessas misturas deve seguir uma sequência estruturada, que inclui: o aquecimento prévio do RAP, a incorporação do rejuvenescedor, a homogeneização inicial da mistura RAP e rejuvenescedor, a estabilização da temperatura da mistura, a adição de novos materiais, como agregados e ligante, e, enfim, a mistura completa dos componentes. Esse método propõe-se assegurar a eficiência do rejuvenescedor na restauração das características do ligante envelhecido garantindo a qualidade da mistura final.

Conforme destacado por Moghaddam e Baaj (2016), a aplicação direta do rejuvenescedor sobre o RAP é essencial para atender aos critérios de desempenho em curto e longo prazo, garantindo rápida difusão no ligante envelhecido e a restauração de suas propriedades. Entretanto, esse método requer um processo mais demorado e pode precisar de modificações estruturais na usina onde será produzida a mistura reciclada.

Durante o processo, o RAP é submetido a temperaturas elevadas visto que é exposto diretamente às chamas no tambor de mistura, com tempos prolongados de aquecimento (Devulpalli *et al.*, 2019). Essa exposição térmica prolongada pode intensificar o desgaste do ligante envelhecido, já fragilizado, além de comprometer as propriedades do agente rejuvenescedor ou do novo ligante adicionado (Gaspar, 2022). Como consequência, a mistura final pode apresentar maior sensibilidade à fragilidade, reduzindo seu desempenho e durabilidade.

A ausência de consenso sobre o momento ideal para a introdução dos agentes de reciclagem no processo de mistura asfáltica é um desafio significativo, dada uma ampla variedade de materiais disponíveis. Segundo Zhang *et al.* (2019), a falta de atenção aos parâmetros críticos dos processos de produção, como o tempo e a temperatura da mistura, bem como as condições de armazenamento, contribui para as variações no comportamento das misturas recicladas. Esses fatores, quando negligenciados, resultam em uma redução específica no desempenho mecânico e na durabilidade dessas misturas, evidenciando a necessidade de um controle mais rigoroso (Unger Filho, 2022). Enquanto a utilização do AR rejuvenescedor é altamente recomendada, em paralelo, não existe um consenso enquanto ao AR redutor.

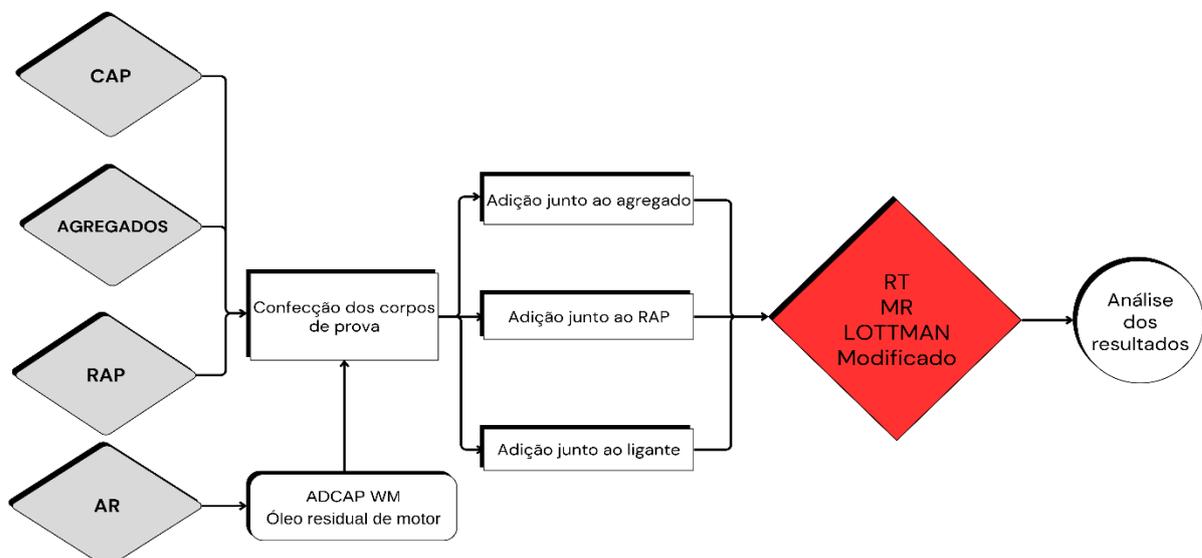
## 5 METODOLOGIA

O programa experimental desta pesquisa foi desenvolvido para investigar as propriedades mecânicas de misturas asfálticas com a adição de diferentes agentes de reciclagem, aplicados em etapas variadas ao longo do processo de produção. A pesquisa tem uma metodologia descritiva quantitativa, no qual analisa resultados dos ensaios. É importante frisar que esta pesquisa enfrentou algumas limitações metodológicas devido a dependência de dados de terceiros. Os ensaios de caracterização, dosagem, moldagem dos corpos de prova e ensaios mecânicos aconteceram no Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP), da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), pela supervisão do Dr. Daniel Beserra Costa.

Os materiais utilizados, foram os mesmos usados na tese de doutorado do pesquisador mencionado, sendo assim, o ligante asfáltico utilizado nessa pesquisa foi o ligante convencional (CAP 50/70), proveniente de doação da empresa de consultoria JBR Engenharia LTDA. Os agregados utilizados nessa pesquisa foram: Brita 12,5” e Pó de pedra. Os agregados são do tipo granítico e foram adquiridos junto à Construtora Rocha Cavalcante, localizada na cidade de Campina Grande, Paraíba. O RAP utilizado nessa pesquisa foi proveniente de doação da empresa de consultoria JBR Engenharia LTDA e extraído da BR-230/PB, Km 15 (Costa, 2022).

A dosagem dos corpos de prova (CPs) seguiu criteriosamente ao que foi estabelecido na metodologia da tese do Dr. Daniel Beserra Costa, utilizando os mesmos materiais em período similar (Costa, 2022). Por conseguinte, o estudo foi conduzido com base em um fluxograma geral, ilustrado na Figura 3, que organiza de maneira clara as etapas do experimento.

Figura 3 - Fluxograma geral



Fonte: o autor (2024)

Vale ressaltar que, os dados referentes aos ensaios mencionados na Figura 1, já foram executados pelo Dr. Daniel Beserra Costa e se encontram em posse do autor. Desse modo, restando realizar as análises e ponderações sobre o tema.

As execuções foram desenvolvidas utilizando o teor de adição de RAP de 25%. Nos Estados Unidos, o teor de 25% é muito utilizado nas usinas, visto que representa um nível abertamente aceito para o uso de RAP (Suzuki, 2019), assim, atuando como um ponto de referência para determinar a variabilidade dos resultados observados na atividade comercial. Em seguida, as curvas granulométricas foram definidas conforme descrito e desenvolvido na tese de Costa (2022), os CPs foram ajustados de acordo com os teores ótimos, proporcionando a análise das propriedades mecânicas.

O centro dessa pesquisa é a análise do momento correto de adição do agente de reciclagem. As adições foram inseridas diretamente no RAP, de acordo com as recomendações dos fornecedores de agentes de reciclagem adição junto ao acréscimo de agregado e adições junto ao ligante asfáltico. Essa análise é fundamental, visto que existe uma falta de consonância no momento e adição do agente de reciclagem a mistura asfáltica. É essencial precaver o desgaste demasiado durante a usinagem do RAP e dos novos elementos na mistura reciclada.

A exposição constante a altas temperaturas, para avivar o ligante envelhecido, pode danificar tanto o ligante quanto o agente de reciclagem, comprometendo a integridade da mistura. Para avaliar o efeito da exposição vagarosa nos agentes de reciclagem, foram elaboradas misturas com um acréscimo de +25%. Os teores que foram utilizados de ADCAP WM nessa pesquisa foi estabelecido de acordo com a indicação técnica do produto, que recomenda a adição de 0,5 a 2% de ADCAP WM em relação a massa total do ligante asfáltico. Para essa pesquisa os teores inseridos foram de, 2,5% em massa total do ligante presente no RAP, com adição de 25% de teor ótimo (S+). Para o óleo residual de motor, o teor utilizado nessa pesquisa foi estabelecido de acordo com a pesquisa realizada por Zaumanis *et al.* (2015), o teor usado foi de 15,0% em massa total do RAP, com adição de 25% do teor ótimo (O+).

O objetivo é averiguar prováveis perdas ou volatilização desses componentes ao longo da produção da mistura asfáltica reciclada. As composições são constatadas pelas abreviações apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Nomenclatura das amostras

Abreviatura	Teor de RAP (%)	Agente de reciclagem (AR)	Teor do AR	Momento de adição do AR
25P	25	-	-	-
25 L O+	25	ÓLEO RESIDUAL	15% MTR*	LIGANTE
25 A O+	25	ÓLEO RESIDUAL	15% MTR*	AGREGADO
25 R O+	25	ÓLEO RESIDUAL	15% MTR*	RAP
25 L S+	25	ADCAP WM	2,5% MTLR*	LIGANTE
25 A S+	25	ADCAP WM	2,5% MTLR*	AGREGADO
25 R S+	25	ADCAP WM	2,5% MTLR*	RAP

MTR\* - Massa Total do RAP

MTLR\* - Massa Total do Ligante presente no RAP

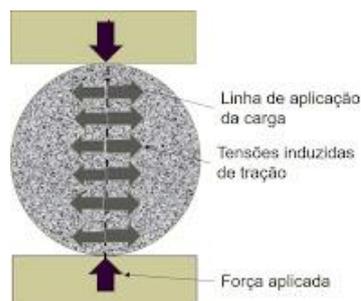
Fonte: O autor (2024)

Nesta pesquisa foram realizados os ensaios de resistência à tração por compressão diametral, módulo de resiliência e ensaio de LOTTMAN modificado. A rotina de ensaios, apresentados na Figura 3, será repetida para os 2 agentes de reciclagem analisados nessa pesquisa.

### 5.1 Resistência à tração por compressão diametral

O ensaio de Resistência à Tração por compressão diametral (RT) é utilizado para determinar a tensão máxima que a mistura asfáltica pode suportar antes de atingir a ruptura, sendo essencial para avaliar o desempenho mecânico do material (Silva, 2011). Este procedimento seguiu rigorosamente as normas ABNT (NBR 15087, 12) e DNIT (2018), garantindo confiabilidade e padronização dos resultados. Os corpos de prova (CPs) utilizados no ensaio apresentam dimensões padronizadas, com alturas variando entre 55 e 70 mm e diâmetros de  $100 \pm 2$  mm, conforme especificado pelas normas, e devem ser colocados em estufa, a uma temperatura de 25°C, por meio de 4 horas. Logo após, com a utilização de uma prensa mecânica, foi aplicada uma carga vertical de compressão, que assegura a correta aplicação da carga, até que o CP se rompa, como demonstrado na Figura 4.

Figura 4 - Corpo de prova e solicitações em ensaio de compressão diametral



Fonte: Alcantara (2021)

A carga foi aplicada de forma contínua e controlada com a velocidade de  $0,8 \pm 0,1$  mm/s em uma prensa mecânica, até a ocorrência da ruptura. Com o valor da carga de ruptura, será calculado a resistência à tração indireta do corpo de prova rompido por compressão diametral, utilizando a Equação 1:

$$RT = \frac{2P}{100\pi DH} \quad (1)$$

No qual:

RT = Resistência à tração, em MPa;

P = Carga de ruptura, em N;

D = Diâmetro do corpo de prova, em cm;

H = Altura do corpo de prova, em cm.

A resistência à tração realizada por compressão diametral da amostra da mistura asfáltica dos CPs é a média aritmética dos valores adquiridos nos três CPs, contanto que a variação entre os valores individuais e a média esteja em um intervalo de  $\pm 10\%$ . Em relação ao CP extraído da pista, a resistência à tração por compressão diametral está relacionada a cada um dos CPs ensaiados, necessitando de uma análise estatística para determinar a resistência à tração de cada um dos segmentos da via (DNIT, 2018).

## 5.2 Módulo de resiliência

OMR é expresso sendo a interação entre a tensão e a deformação de tração, que é gerada através do ensaio de compressão diametral, por uma carga constante. Para a realização desse experimento foram moldados, em laboratório, três corpos de prova, para o teor de material fresado de 25%, o ensaio foi executado com uma temperatura fixa de 25°C, na máquina *Universal Testing Machine* (UTM-25), conforme ilustra a Figura 5.

Figura 5 - Ensaio de Modulo de Resiliência



Fonte: Azevedo (2016)

O ensaio de Módulo de Resiliência (MR) foi conduzido em conformidade com a norma ABNT (NBR 16018, 2011) e realizado utilizando a prensa hidráulica UTM-25, da IPC. O procedimento envolveu a aplicação de uma carga com frequência de 60 ciclos por minuto (1 Hz), sendo cada ciclo composto por um tempo de aplicação de 0,10 segundo e 0,90 segundo de repouso ou descarregamento. Antes do início do ensaio, foi realizado um condicionamento prévio de 50 ciclos, conforme exigido pelo método. O deslocamento diametral recuperável, correspondente à tensão gerada, foi medido por meio de dois *Linear Variable Differential Transformer* (LVDT), posicionados horizontalmente no eixo diametral do corpo de prova. A carga aplicada durante o ensaio foi definida como 10% da resistência à tração por compressão diametral de cada mistura, garantindo representatividade e controle sobre os parâmetros avaliados. Este procedimento possibilitou uma análise precisa do comportamento resiliente das misturas asfálticas testadas.

### 5.3 Ensaio de Lottman Modificado

O ensaio de Lottman, também conhecido como ensaio de dano por umidade induzida, analisa a capacidade mecânica das misturas asfálticas em termos de Resistência à Tração (RT) considerando os efeitos prejudiciais da água em ciclos de temperaturas intermediárias e baixas (Bastidas Martinez, 2018), na Figura 6 está sendo representado uma das etapas do ensaio, denominada como saturação do CP.

Figura 6 - Ensaio de LOTTMAN modificado



Fonte: Stratura (2021)

Para realização do ensaio, a amostra é formada por seis CPs iguais da mistura asfáltica, onde foi dividida em dois conjuntos de três CPs. Para atingir a porcentagem de vazios, prescritas pela norma, de  $7\% \pm 1\%$ , os CPs foram compactados de forma experimental, nesse processo, a amostra é submetida por diferentes energias de compactação, alturas ou massa do molde, ademais, o teor de ligante asfáltico permanece sem alterações, mantendo-se igual ao projeto original. Assim, para verificar se a porcentagem de vazios presentes na amostra, utiliza-se a equação 2:

$$V_{ar} = 100 \left( \frac{1 - GMB}{GMM} \right) \quad (2)$$

No qual:

Var = volume de vazios com ar, em %;

GMB = massa específica aparente do corpo de prova a 25 °C;

GMM = massa específica máxima medida a 25 °C.

Com isso, calcula-se o volume de vazio do ar, para os primeiros três conjuntos de corpos de prova, utilizando a equação 3:

$$V_a = \frac{V_{ar}E}{100} \quad (3)$$

No qual:

Va = volume de vazios com ar, em cm<sup>3</sup>;

Var = volume de vazios com ar, em %;

E = volume do corpo de prova, em cm<sup>3</sup>.

O primeiro conjunto contendo três CPs será submetido ao procedimento de condicionamento, em que cada um foi submerso dentro d'água destilada, logo, foi aplicado vácuo por meio de uma bomba, com uma pressão variável de 13kPa e 67kPa, por cerca de 5 a 10 minutos. Logo após a pressão será interrompida, mantendo o CPs dentro d'água, por mais 5 a 10min. E por fim, os CPs serão retirados da água, eliminando o excesso de água superficial que ficou. O volume de água absorvido é calculado pela equação 4:

$$J = \frac{(B - A)}{0,99707} \quad (4)$$

No qual:

J= volume de água absorvido, em cm<sup>3</sup>;

A= massa do corpo de prova seco ao ar, em g.

Logo após, iniciou-se o processo de gelo e degelo, em que o CPs é embalado em plástico filme, colocado em um saco plástico com 10ml de água e lacrado. Esse saco será resfriado a  $-18,0 \pm 3,0^\circ\text{C}$  por no mínimo 16h. Em seguida, foi transferido para um banho d'água a  $60^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$  por 24h  $\pm$  1h. Após esse período, o corpo de prova foi imerso em água a  $25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$  por 2 a 3h, mantendo um equilíbrio na temperatura. Em seguida, foi realizado o ensaio de resistência a tração por compressão diametral, seguindo a norma do DNIT (2018). O segundo conjunto de CPs, passaram pelo mesmo ensaio de resistência à tração por compressão diametral.

Por fim, foi calculado o dano por umidade induzida que é estabelecido sendo a razão entre a resistência à tração por compressão diametral dos CPs condicionados e não

condicionados. Nomeada como a razão de Resistência à Tração Retida (RRT) na mistura asfáltica, encontrado utilizando a equação 5:

$$RRT = \frac{RT_c}{RT \times 100\%} \quad (5)$$

No qual:

RT<sub>c</sub> = média da resistência a tração por compressão diametral de três CPs que sofreram condicionamento, em Mpa;

RT = média da resistência à tração por compressão diametral de três CPs que não sofreram condicionamento, em Mpa.

Uma vez em que a razão de RRT ficar abaixo do limite estabelecido em projeto, todos os ensaios devem ser realizados novamente, alterando ou substituindo alguns componentes da mistura asfáltica, ou introduzindo um agente melhorador de adesividade (DNIT, 2018).

O ensaio de Lottman é bastante relevante para misturas especiais, como o SMA (*Stone Matrix Asphalt*) e o CPA (Camada Porosa de Atrito), por ser parte integrante do projeto dessas misturas, conforme descrito em especificações da AASHTO (2021). O ensaio é comumente adotado, destacando sua importância na análise da durabilidade e do desempenho das misturas asfálticas frente à ação da umidade.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão evidenciados e discutidos, os resultados encontrados a partir dos ensaios executados no quadro experimental dessa pesquisa.

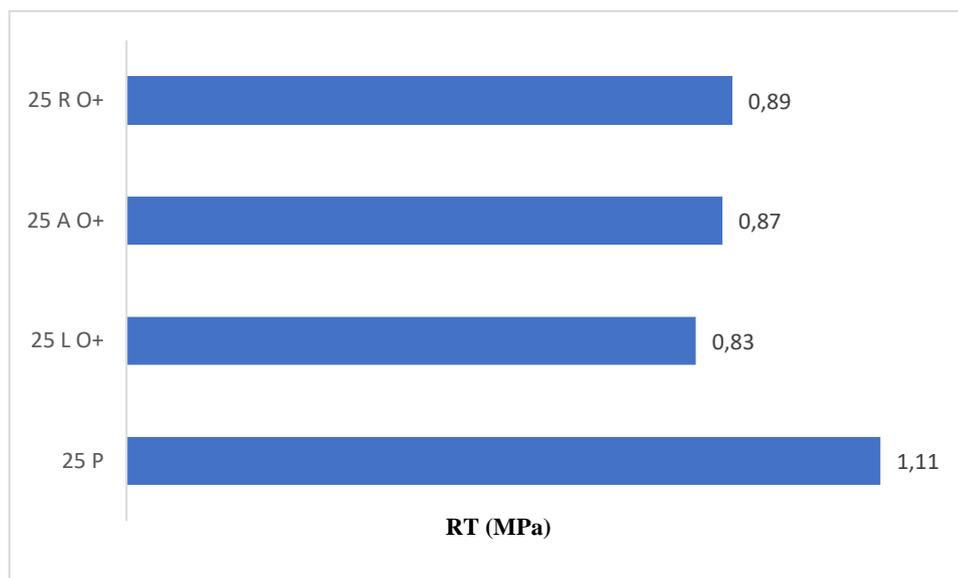
### 6.1 Resistencia a tração por compressão diametral

Os resultados analisados foram divididos quanto ao agente de reciclagem, com o intuito de ter uma análise mais precisa.

#### 6.1.1 Óleo residual

A Figura 7 apresenta os resultados de resistência à tração das amostras com adição de óleo residual de motor.

Figura 7 - RT (amostras de 25% + Óleo de motor)



Fonte: o autor (2024)

Ao analisar, de forma individualizada, os resultados de RT indicam que a aplicação do óleo residual de motor restituiu parcialmente as propriedades químicas do ligante envelhecido, caracterizada pela elevação da rigidez da mistura asfáltica. Haja visto que as misturas recicladas modificadas com óleo residual de motor apresentaram níveis menores de resistência a tração, pressupõem-se que o óleo residual de motor interagiu, mesmo que parcialmente, com o ligante envelhecido presente no RAP e, conseqüentemente, diminuiu sua rigidez.

Ao verificar os momentos de adição, é possível observar que as composições com adição junto ao agregado e junto ao RAP demonstraram resultados próximos com uma variação aproximada de 2%, entre elas. Esse comportamento indica uma menor influência, quanto aos momentos de adição do AR em questão, para esse ensaio. Contudo, a adição do AR junto ao ligante apresenta uma variação de, aproximadamente, 7%, se comparada ao acréscimo junto ao RAP, e 5%, se comparada ao acréscimo junto ao agregado.

Ao serem comparadas com a amostra de referência, 25P, houve uma queda na RT:

- Para amostra com acréscimo junto ao RAP (25 RO+), diminuição de 19,82%;
- Para amostra com acréscimo junto ao agregado (25 AO+), diminuição de 21,62%;
- Para amostra com acréscimo junto ao ligante (25 LO+), diminuição de 25,23%.

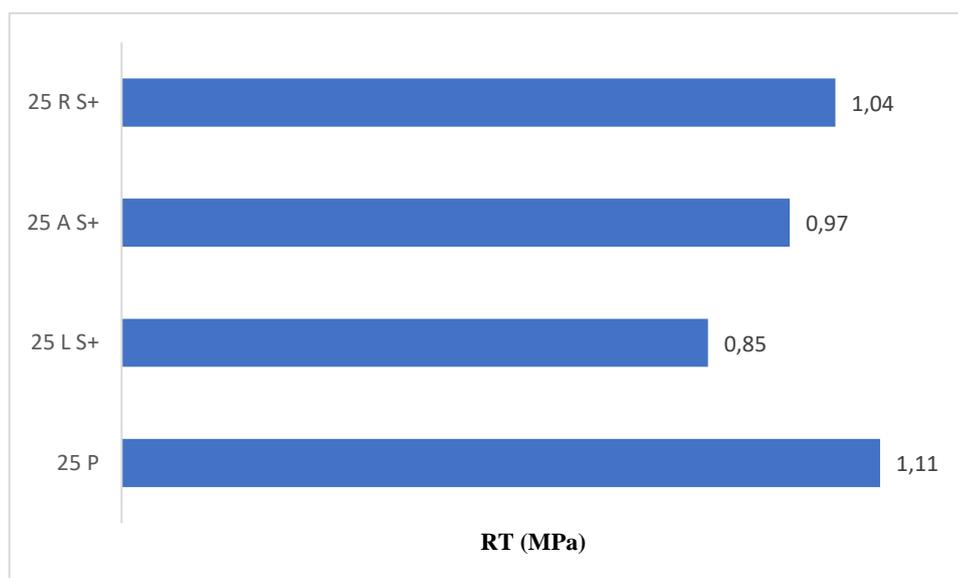
Nota-se que o acréscimo de óleo residual de motor sucedeu em um decréscimo relevante de RT das amostras ensaiadas, em comparação com a amostra 25P, por conseguinte, da rigidez das amostras. Dessa forma, observa-se uma possível propensão de redução de RT se houver um aumento do teor de óleo residual de motor adicionado. Entretanto, destaca-se que todas as amostras ensaiadas adicionadas com o óleo residual de motor mostraram resultados de RT superior ao prescrito na norma DNIT 031/06 – ES e DNIT 033/21 - ES.

Mamun e Al-Abdul Wahhab (2018) realizaram ensaios com misturas de até 50% de RAP, adicionando óleo residual de motor, os resultados de resistência a tração obtidos na pesquisa feita pelos autores, foram similares aos analisados, variando entre 0,6 e 0,8 Mpa, se tratando do momento de adição. Além do mais, outros estudos (Nabizadeh *et al.*, 2017; Leng *et al.*, 2018; entre outros) foram realizados, com outros tipos de AR orgânicos, e assim como o previsto, demonstraram a mesma propensão em relação aos resultados. Portanto, com os resultados adquiridos de RT utilizando óleo residual de motor como AR, existe a indicação que, as misturas recicladas analisadas, modificadas com óleo residual de motor podem ser utilizados em pavimentos asfálticos.

### **6.1.2 ADCAP WM**

A Figura 8 apresenta os resultados de RT da amostra com adição de ADCAP WM, considerando a adição ao RAP, agregado e ao ligante.

Figura 8 - RT (amostras de 25% + ADCAP WM)



Fonte: o autor (2024)

Os valores de resistência à tração das amostras com 25% de RAP, tendo em vista o momento de adição, alteraram entre 0,85 e 1,04 MPa, apresentando um intervalo com uma amplitude de 0,19 MPa. Ao contrário das amostras adicionadas com óleo de motor residual, as amostras modificadas com ADCAP WM, apresentaram grandes influências com o momento de adição do AR. Observa-se que o acréscimo junto ao ligante apresentou a maior redução de resistência entre as amostras ensaiadas, aproximadamente 22% comparado com 25 RS + e 14% comparado com 25 AS +, comportamento análogo a amostra modificada com óleo residual de motor junto ao ligante. Esse comportamento pode indicar maior efetividade do momento de adição do AR junto ao ligante, entretanto, é necessário a análise de todo o quadro experimental para confirmação.

Embora, sejam menores os valores de redução, as amostras com adição de AR junto ao agregado apresentam redução significativa de resistência, aproximadamente 7 % se comparada com a amostra 25 RS +. Enquanto, as amostras com adição do ADCAP WM junto ao RAP, apresentou pouca redução. Essa baixa redução das amostras com adição do ADCAP WM junto ao RAP pode indicar uma baixa interação entre o AR e CAP envelhecido, ou mesmo, volatilização do AR durante o processo de mistura, haja visto que, o RAP durante o processo de adição estava a 165 °C.

As amostras apresentaram um pequeno decréscimo de RT se comparado a amostra de referência, 25P:

- Para amostra com acréscimo junto ao RAP (25 RS+), diminuição de 6,30%;
- Para amostra com acréscimo junto ao agregado (25 AS+), diminuição de 12,61%;

- Para amostra com acréscimo junto ao ligante (25 LS+), diminuição de 23,42%.

Semelhante ao observado nas amostras modificadas com óleo de motor residual, as amostras modificadas com ADCAP WM apresentaram tendências de redução de resistência a tração com compressão diametral. Todavia, as variações ocorreram em diferentes escalas, sendo mais significativas para as amostras 25 LS + e menores para as amostras 25 RS +. Tais variações indicam a relevância do momento de adição dos ARs surfactantes, demonstrando a importância de se identificar as condições ideais de aplicação deles. Apesar do declínio dos resultados encontrados ao serem analisados pela amostra de referência, os ensaios utilizando o ADCAP WM, como AR, demonstraram resultados de RT acima do especificado pelo DNIT 031/06 – ES e DNIT 033/21 - ES.

Alguns estudos apresentaram resultados semelhantes aos obtidos nesta pesquisa (Omranian *et al.*, 2018; Lu *et al.*, 2019; entre outros), os quais identificaram uma propensão de redução da RT com a utilização de ARs surfactantes. Omranian *et al.* (2018) analisaram os efeitos de Evotherm, RH-WMA e RAP em misturas asfálticas, sendo que Evotherm e RH-WMA apresentaram uma redução na RT de 50%. Por sua vez, Lu *et al.* (2019) avaliaram o uso de Evotherm 3G em misturas mornas com RAP e Sylvaroad, nas quais as misturas com RAP e o agente de reciclagem resultaram em uma melhor resistência à fissuração por fadiga, atingindo 25% de eficácia quando comparadas à mistura de referência. Em contrapartida, em oposição ao que foi analisado, alguns pesquisadores identificaram um aumento de RT ao adicionar ARs surfactantes. Yu *et al.* (2012) constataram uma pequena redução nas propriedades das misturas de asfalto poroso contendo RAP e aditivadas com um agente surfactante, enquanto Yousefi *et al.* (2021) verificaram uma pequena elevação na RT em misturas com a adição de alguns agentes surfactantes (PAWMA, Kaowax, Sasobite e Zeolite). Dessa forma, fica evidente que não existe um consenso definitivo quanto ao uso de ARs surfactantes em misturas asfálticas.

### 6.1.3 Análise Geral

Analisando os resultados, houve uma redução média de aproximadamente 35% na resistência a tração utilizando o óleo residual de motor, em comparação com o ADCAP WM, diferença considerável em relação aos ARs. Essa diferença pode ter ocorrido pela singularidade de cada um dos AR, no caso, AR surfactante e AR orgânico. O AR orgânico tem essa tendência de diminuir a RT (da Ferreira, 2023). Torres *et al.* (2022) encontrou resultados semelhante, esse pesquisador identificou uma variação significativa no teor de óleo vegetal relacionado ao

comportamento de RT de misturas recicladas com 30% e 60% de RAP. Com o intuito de analisar se as misturas possuem um parâmetro de RT aceitável segundo as normas do DNIT, DER/SP, na Tabela 6 são apresentados os limites mínimos para as camadas de rolamento e de ligação.

Tabela 6 – Especificações de serviço do concreto asfáltico convencional e reciclado para RT

	DNIT		DER/SP		DER/MA	
	ES 033/2005 (reciclado)		ET-DE-P00/032 (reciclado)		-	
PARÂMETRO	Camada de rolamento	Camada de binder	Camada de rolamento	Camada de binder	Camada de rolamento	Camada de binder
RT, A 25°C	0,65	0,65	0,80	0,65	-	0,65

Fonte: O autor (2024)

De acordo com a Tabela 6, é possível notar que o valor mínimo de RT para camada de *binder* é igual para todos os órgãos, 0,65 MPa. Já, para camada de rolamento, o valor mínimo de RT é de 0,65 MPa de acordo com o DNIT, 0,80 MPa de acordo com o DER/SP e não tem nenhum parâmetro pré-definido para a DER/MA. Segundo as normas do DNIT 031/06 – ES e DNIT 033/21 - ES, que são responsáveis por determinar as especificações técnicas de serviço para CBUQ, CAP convencional e concreto asfáltico reciclado em usina quente, definem a RT mínima sendo maior que 0,65 MPa, com isso, viu-se que todas as amostras ensaiadas apresentaram um resultado de RT superior ao que foi exigido pela norma.

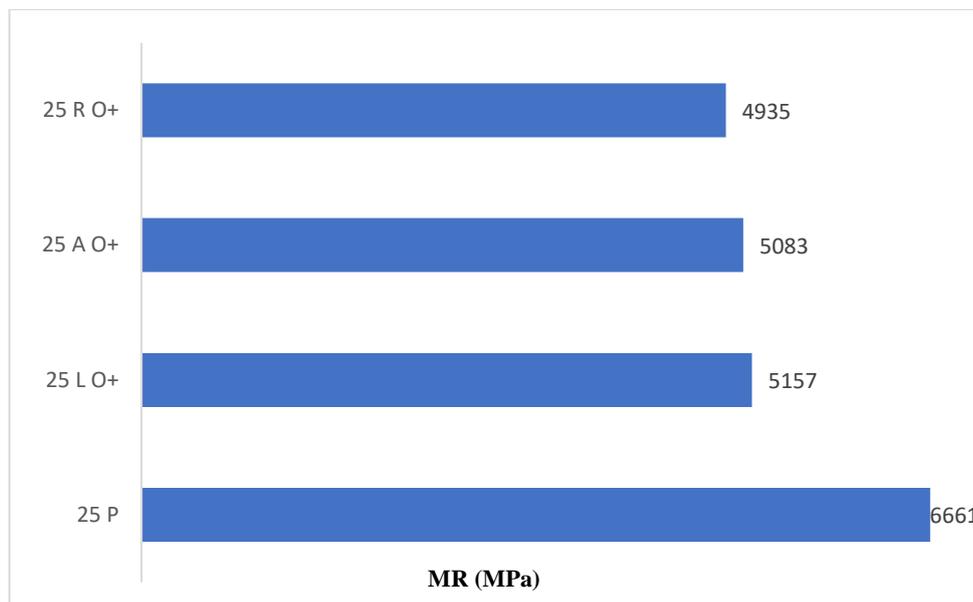
## 6.2 Módulo de resiliência

Houve uma variedade de resultados a serem analisados, devido a isso os resultados foram divididos quanto ao agente de reciclagem.

### 6.2.1 Óleo residual

Na Figura 9 foram apresentados os resultados do modulo de resiliência das composições, e que houve o acréscimo de óleo residual de motor.

Figura 9 - MR (amostras de 25%RAP + Óleo residual de motor)



Fonte: o autor (2024)

As amostras com acréscimo de óleo residual de motor apresentaram uma diminuição considerável do MR, ao ser comparado a amostra de referência, 25P:

- Para amostra com acréscimo junto ao RAP (25 RO+), diminuição de 25,91%;
- Para amostra com acréscimo junto ao agregado (25 AO+), diminuição de 23,69%;
- Para amostra com acréscimo junto ao ligante (25 LO+), diminuição de 22,58%.

Ao analisar os resultados apresentados na Figura 9, nota-se que os valores de MR das amostras modificadas com óleo residual de motor variaram entre 4935 e 5157 MPa. Observa-se que, as amostras que foram modificadas com o acréscimo ao RAP (R) apresentaram maiores reduções, de aproximadamente 26%, em relação a amostra de referência, 25P. No entanto, é necessário ressaltar que, não existe uma explicação concreta que esta redução excessiva pode beneficiar as misturas desenvolvidas. Para esse AR não houve uma variação significativa quanto ao momento de adição, indicando possibilidade de aplicação em qualquer etapa, esse comportamento apresentou similaridade com os resultados de RT, para as composições com acréscimo de óleo de motor residual.

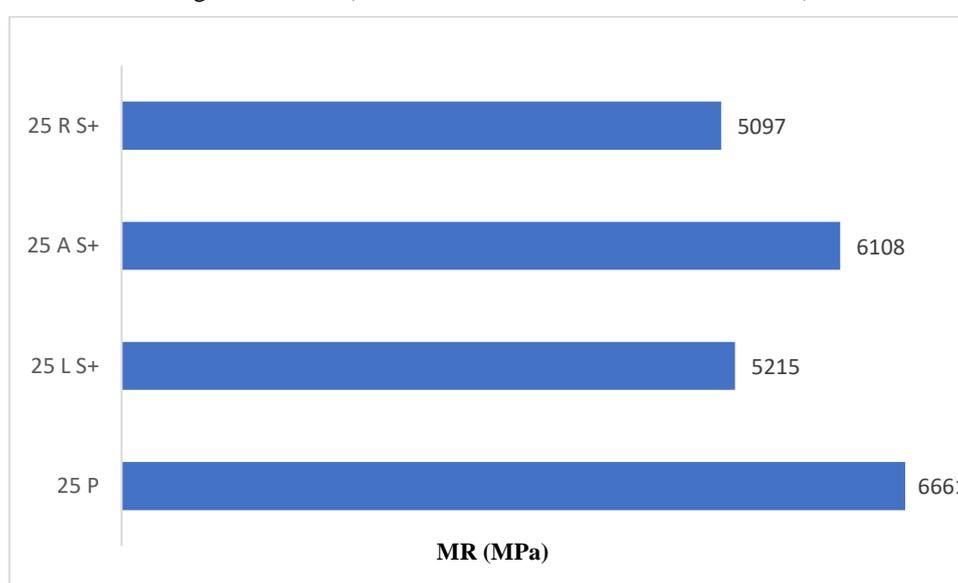
O acréscimo de óleo residual de motor gerou uma diminuição considerável das propriedades mecânicas das misturas analisadas, isto é, causou uma diminuição progressiva na rigidez das amostras. Todas as amostras que foram modificadas com a adição de óleo residual de motor demonstraram resultados inferiores ao comparar com as amostras da mistura de 25 P. Mamun e Al-Abdul Wahhab (2018), obtiveram esse mesmo comportamento nos estudos, no entanto, as reduções analisadas pelos pesquisadores não foram tão elevadas quanto as expressas

nessa pesquisa. Outras pesquisas (Nabizadeh *et al.*, 2017; Leng *et al.*, 2018; entre outros), realizadas com aditivos descritos como AR orgânicos, apresentaram a mesma propensão a esse comportamento.

### 6.2.2 ADCAP WM

A Figura 10, apresentam os resultados de modulo de resiliência das amostras que houve o acréscimo de ADCAP WM.

Figura 10 - MR (amostras de 25% de RAP + ADCAP WM)



Fonte: o autor (2024)

Ao analisar a Figura 10 é possível notar que as amostras apresentaram um pequeno decréscimo de MR se comparado a amostra de referência, 25P:

- Para amostra com acréscimo junto ao RAP (25RS+), diminuição de 23,48%;
- Para amostra com acréscimo junto ao agregado (25 RA+), diminuição de 8,30%;
- Para amostra com acréscimo junto ao ligante (25 LS+), diminuição de 21,71%.

É nítido a redução do módulo de resiliência gerada a partir da adição do ADCAP WM, houve uma variação perceptível em relação ao momento de adição, principalmente ao ser comparado a adição diretamente sob o agregado, em relação a adição junto ao RAP e ao ligante, os valores obtidos através da análise considerando 25% de RAP variaram entre 5097 e 6108 MPa, apresentando uma diferença considerável de mais de 1000 Mpa.

Observa-se que a adição junto ao agregado apresentou a menor redução de resistência entre as amostras ensaiadas, aproximadamente 17% comparado com 25 RS+ e aproximadamente 15% comparado com 25 LS+, a baixa redução das amostras com adição de

ADCAP WM junto ao agregado pode indicar baixa interação entre AR e CAP envelhecido, assim como o comportamento percebido nos resultados de RT. As amostras de LS+ e RS+ apresentaram tendências similares, que foram maiores reduções. No entanto, como dito anteriormente, não é evidente se esta redução excessiva pode ser benéfica para as misturas desenvolvidas, sendo necessário a análise de todo o quadro experimental para confirmação. Não há uma unanimidade em relação aos possíveis resultados de MR utilizando misturas recicladas. Estudiosos apresentam que o acréscimo de RAP tende a aumentar o MR, em paralelo, a adição de AR surfactante, como o ADCAP WM, tende a reduzir o MR (Lu *et al.*, 2019; Yousefi *et al.*, 2021; entre outros).

Com os resultados de MR adquiridos usando composições modificadas com ADCAP WM, sugerem que as amostras ensaiadas com 25% de RAP são passíveis a aplicação em pavimentos asfálticos. Ademais, é importante evidenciar a necessidade de práticas de simulações de compatibilidade entre as camadas, para que assim, ocorra validação do seu uso.

### 6.2.3 Análise geral

Ao analisar os resultados obtidos com o uso de AR orgânico e AR surfactantes, é possível observar que os valores de módulo de resiliência foram, na maioria dos casos, semelhantes, ocorrendo apenas uma única exceção, que foi o acréscimo diretamente sobre o agregado no caso do ADCAP WM, que apresentou um comportamento distinto, em relação ao momento de adição dos demais. Além disso, as tendências verificadas no ensaio de RT foram refletidas no ensaio de MR, evidenciando uma relação entre os dois parâmetros. De forma geral, as composições estudadas mostraram uma diminuição nos resultados de módulo de resiliência, entretanto, as variações entre os momentos de adição não foram significativas. Esse comportamento indica que o momento de adição não influenciou no desempenho das misturas recicladas nesse ensaio em particular.

Embora a rigidez da mistura asfáltica não seja, por si só, um fator de reprovação para uma mistura asfáltica, quando demasiada, pode provocar a necessidade de fortalecer as camadas internas do pavimento. Isso não apenas aumenta os custos de construção, mas também pode tornar o projeto menos viável do ponto de vista prático e econômico (Costa, 2023). Sob outra perspectiva, é preciso considerar que a taxa de trinca por fadiga e maior propensão à fratura das misturas asfálticas não é estipulada apenas pela rigidez, como também por parâmetros como valores de módulo resultantes da caracterização viscoelástica, número de vazios, adesão e coesão da mistura (Carvalho, 2022). Muitos estudos (Behbahani *et al.*, 2017; Rondón *et al.*,

2015, entre outros) esclareceram que o uso de RAP influenciou de forma positiva o MR das misturas.

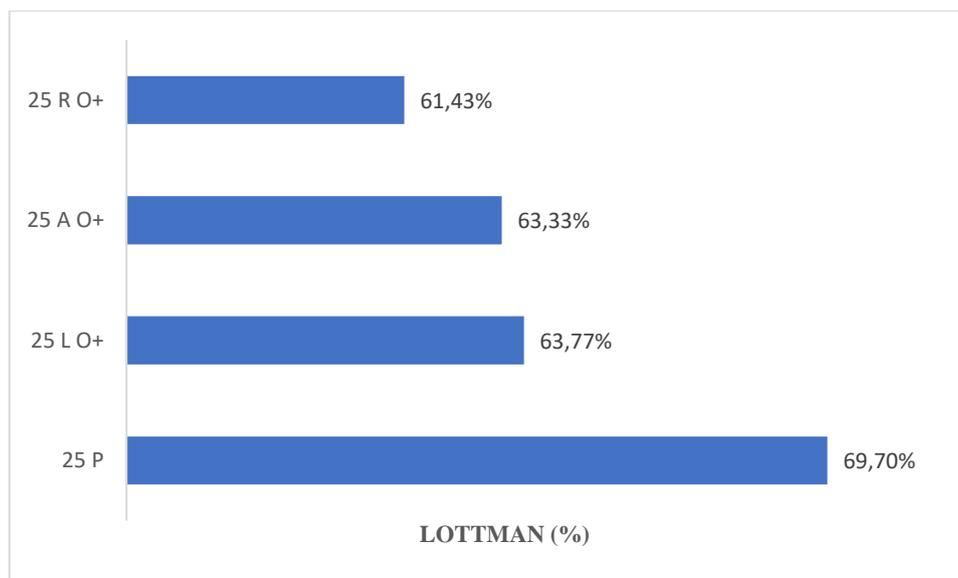
### 6.3 LOTTMAN modificado

Os resultados do ensaio de resistência ao dano por umidade induzida, os valores observados são relativos à média de três corpos de prova.

#### 6.3.1 Óleo residual de motor

A Figura 11 demonstra os resultados de resistência ao dano por umidade induzida das composições com adição de óleo residual de motor.

Figura 11 - LOTTMAN modificado (amostras de 25% de RAP + óleo residual de motor)



Fonte: o autor (2024)

Ao analisar a Figura 11 é possível notar que as amostras do ensaio de LOTTMAN modificado, apresentaram um pequeno decréscimo se comparado a amostra de referência, 25P:

- Para amostra com acréscimo junto ao RAP (25 RO+), diminuição de 11,87%;
- Para amostra com acréscimo junto ao agregado (25 AO+), diminuição de 9,14%;
- Para amostra com acréscimo junto ao ligante (25 LO+), diminuição de 8,51%.

A Figura 11 evidências de forma clara que as composições com 25% de RAP com acréscimo de óleo residual de motor demonstraram uma propensão a perda de resistência ao dano por umidade induzida. Essa diminuição variou entre 8 e 12%, se comparada com a amostra de 25P. Similarmente, o momento de adição não influenciou de forma relevante, visto que os

resultados obtidos foram próximos entre si, ou seja, não demonstraram tendência de aumentar ou reduzir as propriedades.

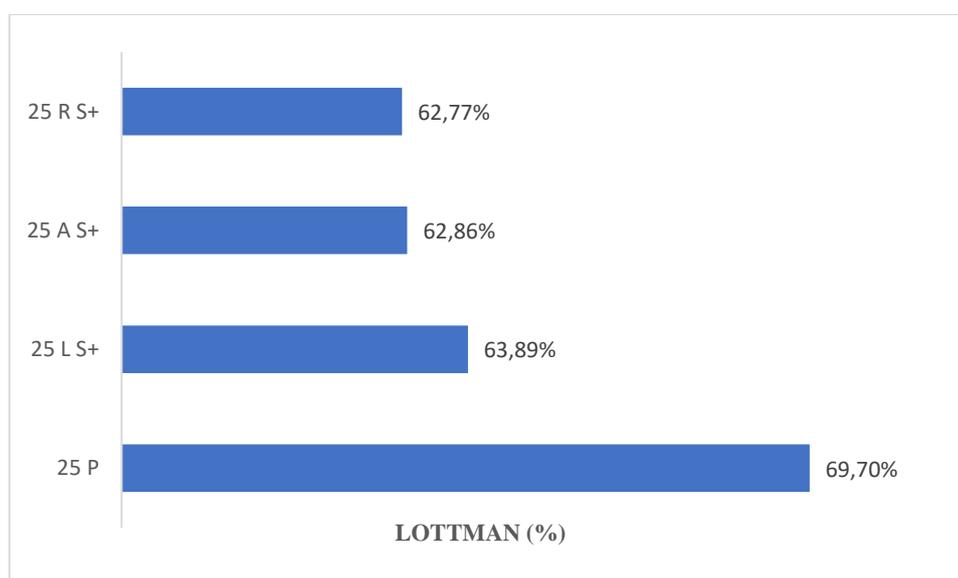
Como os dados evidenciam, a adição de óleo residual de motor na mistura apresentou resultados menores de resistência ao dano por umidade induzida. Contrapondo os resultados obtidos por Zaumanis *et al.* (2014). Os autores identificaram nos seus estudos que os produtos orgânicos se sobressaíram em relação aos aditivos à base de petróleo na maioria dos testes.

Com esses dados é possível pressupor que a adição do óleo residual de motor fragiliza as misturas recicladas quanto ao dano por umidade induzida. Embora que, só será possível definir os níveis de influência e graus de interação dessas composições, através de análise química.

### 6.3.2 ADCAP WM

A Figura 12 apresenta os resultados de resistência ao dano por umidade induzida das amostras com acréscimo de ADCAP WM.

Figura 12 - LOTTMAN modificado (amostras de 25% RAP + ADCAP WM)



Fonte: o autor (2024)

Ao analisar a Figura 12 é possível observar que as amostras apresentaram um pequeno decréscimo em relação ao LOTTMAN modificado se comparado a amostra de referência, 25P:

- Para amostra com acréscimo junto ao RAP (25 RS+), diminuição de 9,94%;
- Para amostra com acréscimo junto ao agregado (25 AS+), diminuição de 9,81%;
- Para amostra com acréscimo junto ao ligante (25 LS+), diminuição de 8,34%.

Identifica-se que as composições com 25% de RAP com acréscimo de ADCAP WM demonstraram uma redução da resistência entre 8 e 10%, se comparada com a amostra de referência, 25P. Os resultados apresentaram similaridade com as composições citadas anteriormente, com 25% de RAP acrescido de óleo residual de motor, indicando assim um provável comprometimento da composição. A variação entre o momento de adição do AR é muito baixa, cerca de 1%, com isso, nota-se que não houve uma influência no resultado obtido. Arruda (2021) obteve resultados próximos, apesar de que no estudo elaborado pelo autor o teor máximo de RAP foi de 50%, que se difere dessa pesquisa que chegou a apenas 25%.

Ainda não há uma concordância absoluta quanto as vantagens e desvantagens obtidos através do ensaio de resistência ao dano por umidade induzida aplicados a misturas recicladas. Alguns estudiosos (Luzzi, 2019; Yousefi *et al.*, 2021; entre outros) detectaram ganhos relevantes de resistência ao dano por umidade induzida, chegando a valores de até 90 e 100% nesse parâmetro. Costa (2022), identificou perdas da resistência ao dano por umidade induzida. Todavia, é importante ressaltar que, em todos os estudos as variações foram baixas, de 1% a 8%.

### 6.3.3 Análise Geral

Ao analisar, os resultados demonstrados, é perceptível que não houve uma diferença considerável nos valores entre a adição dos dois AR: óleo residual de motor, e ADCAP WM. O momento de adição variou em menos de 4% e 2%, respectivamente, inferior a 5%, estando abaixo do nível de significância. Esse fato evidencia que para essa pesquisa, o momento de adição não demonstrou influência nos resultados desse ensaio.

O ensaio de Lottman modificado tem como objetivo analisar a resistência à tração ao dano causado pela umidade, conforme abordado no tópico 5.3 desta pesquisa. Costa (2024) realizou um estudo em que identificou resultados que divergem dos dados apresentados aqui, constatou que a variação no tipo, teor e momento de adição do AR teve impacto considerável na resistência ao dano por umidade. No estudo, as misturas contendo WM demonstraram melhorias consideráveis na resistência ao dano por umidade, em todos os momentos de adição, e as misturas com óleo residual de motor também apresentaram melhorias, especialmente com um teor de 18%.

A resistência retida à tração (RRT) tende a aumentar de forma proporcional ao acréscimo de RAP, com misturas contendo maiores teores de RAP apresentando, em geral, valores mais elevados de RRT (Suzuki, 2019). Isso acontece porque os agregados presentes no

RAP já estão recobertos por uma película de ligante envelhecido, o que tende a reduzir possíveis problemas de adesividade com os agregados virgens. Esse fator esclarece que o maior valor de RRT observado na mistura com altos teores de RAP ou sem modificação por ARs (Zubaran, 2014).

## 7 CONCLUSÃO

A pesquisa foi realizada com o intuito de analisar as propriedades mecânicas de misturas recicladas, a partir do acréscimo de dois agentes de reciclagem: óleo residual de motor e ADCAP WM. Esses agentes de reciclagem foram inseridos sob o RAP, o ligante e o agente. Dessa forma, foram realizados os ensaios de resistência a tração por compressão diametral, módulo de resiliência e LOTTMAN modificado.

Ao analisar o momento de adição do agente de reciclagem, com os resultados obtidos, notou-se que não houve uma variação relevante entre as etapas. No entanto, uma etapa se destacou levemente das demais: o acréscimo do AR diretamente sobre o ligante. Essa etapa foi levemente destacada na adição de óleo residual de motor, enquanto as outras etapas de adição, sob o RAP e o agregado, apresentaram desempenho sutilmente menos relevante nas propriedades mecânicas analisadas. De forma semelhante, as amostras com adições de ADCAP WM apresentaram melhores resultados quando a modificação foi realizada junto ao ligante. Entretanto, observou-se que, na adição diretamente sobre o RAP, as resistências dos CPs modificados ensaiados estavam similares às dos CPs sem modificação, além de apresentarem menor resistência ao dano causado pela interação com a água. Esses resultados podem gerar menor interesse pela aplicação dessa condição de modificação em misturas recicladas. Dessa forma, é possível inferir que, para os aditivos analisados, a adição junto ao ligante se apresentou como a melhor alternativa, embora as outras etapas possam ser utilizadas, dada a pouca variação de desempenho entre elas.

Com os resultados obtidos nesta pesquisa, é perceptível que os acréscimos dos agentes de reciclagem geraram mudanças nos parâmetros das misturas ensaiadas, apresentando indícios de eficaz interação, ligante oxidado e AR, nas composições analisadas. A adição de AR orgânicos, como óleo residual de motor, resultou em uma redução na rigidez do ligante envelhecido, característica favorável para as misturas, visto que o RAP possui uma elevada rigidez devido ao ligante oxidado presente nele. Da mesma forma, a afirmação anterior pode ser atribuída à adição de AR surfactante, como o ADCAP WM, para as modificações junto ao ligante. No entanto, a adição junto ao RAP e a adição junto ao agregado apresentaram-se com rigidez elevada, com parâmetros próximos aos observados na composição sem modificação.

A partir da análise dos aditivos, é visível que a adição de óleo residual de motor gera uma tendência de diminuição da resistência à tração e redução da rigidez da mistura. No entanto, essa redução já era esperada, tendo em vista que o objetivo do acréscimo do AR é diminuir a rigidez da mistura reciclada causada pela interação com o ligante oxidado presente

no RAP. Dessa forma, dado que todas as misturas modificadas com óleo residual de motor apresentaram desempenho acima do estabelecido em norma, independentemente do momento de adição, é possível estabelecer que o óleo residual de motor é um AR efetivo e pode ser aplicado em camadas de rolamento ou binder. Destaca-se que a adição junto ao ligante apresentou a maior redução de rigidez, indicando que essa configuração de mistura pode ser a que apresenta maior interação entre AR e ligante envelhecido. Entretanto, é necessária uma avaliação química e mecânica mais minuciosa para consolidar essa afirmação. Com relação às amostras com ADCAP WM, os resultados também indicaram maior possibilidade de interação entre AR e ligante envelhecido nas adições junto ao ligante. Em contraponto, as adições junto ao RAP e ao agregado apresentaram menores reduções de rigidez, com as amostras com adição junto ao RAP apresentando as menores reduções e, possivelmente, as piores interações entre AR e ligante envelhecido. Dessa forma, é possível estabelecer que ambas as opções são viáveis quanto à aplicação em misturas recicladas, ficando as misturas modificadas com óleo residual de motor com leve vantagem, pois podem ser desenvolvidas independentemente da metodologia de adição, já que sua variação é quase insignificante.

Por fim, com os resultados analisados na pesquisa sobre o momento de adição do AR, conclui-se que todas as etapas são capazes de serem utilizadas, visto que não houve uma grande alternância entre elas, mas, ainda assim, a adição junto ao ligante se sobressaiu entre as demais. A adição junto ao RAP e junto ao agregado foram caracterizadas pela sua rigidez elevada, sem grandes mudanças em comparação à amostra base. As reduções da resistência apresentaram resultados acima do recomendado em norma, exceto em relação ao ensaio de LOTTMAN que, devido ao agregado utilizado, é comum resultados abaixo da norma, sendo necessária aplicação de doping, ou seja, aplicação de um aditivo que atua como um agente de adesividade na mistura asfáltica. De maneira geral, tanto o ADCAP WM, como o óleo residual de motor, demonstraram ser opções exequíveis em misturas recicladas, ressaltando que, as misturas modificadas com óleo residual de motor apresentaram uma vantagem sutil, podendo ser utilizadas independente da forma de adição.

## 7.1 Sugestões para pesquisas futuras

Com o intuito de aperfeiçoar o conhecimento em relação as misturas recicladas, propõe-se:

- Execução do quadro de análise com adições de diferentes tipos de agentes rejuvenescedores. A análise detalhada permitirá a identificação e desempenho de cada um dos grupos, classificando suas características individuais;
- Análise de adição de maiores teores de RAP, superando o teor de 25% de RAP, utilizado nessa pesquisa. A análise realizada com teores superiores poderá atingir maiores percentuais de RAP nas misturas recicladas;
- Examinar RAPs com diferentes faixas de envelhecimento. Aprofundar-se nesse estudo fará com que se tenha uma maior referência sobre a ação desses parâmetros na performance do RAP em misturas recicladas;

## REFERÊNCIAS

ABDO, A. M. A. Utilizing Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) Materials in New Pavements – A Review. **Int. J. of Thermal & Environmental Engineering** Volume 12, No. 1 61-66. 2016. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/287800595\\_Utilizing\\_Reclaimed\\_Asphalt\\_Pavement\\_RAP\\_Materials\\_in\\_New\\_Pavements\\_-\\_A\\_Review](https://www.researchgate.net/publication/287800595_Utilizing_Reclaimed_Asphalt_Pavement_RAP_Materials_in_New_Pavements_-_A_Review). Acesso em: 15 nov. 2024.

ALCANTARA, M. Ensaio mecânico do concreto: comparações entre os métodos para a avaliação e o conhecimento do valor da resistência à tração. **Ars Aedificativa**. 2024. Disponível em: <https://www.arsaedificativa.com/2021/11/ensaios-mecanicos-do-concreto.html>. Acesso em: 29 dez. 2024.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY TRANSPORTATION OFFICIALS. M 320. **Standard specification for performance-graded asphalt Binder**. Washington, D.C.: AASHTO, 2021.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY TRANSPORTATION OFFICIALS T 393. **Standard method of test for determining the fracture potential of asphalt mixtures using the Illinois flexibility index test (I-FIT)**. Washington, D.C.: AASHTO, 2021.

ARRUDA, S. M.; **Avaliação do comportamento mecânico e autorregenerativo de misturas asfálticas recicladas**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 2021. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/xmlui/handle/riufcg/21821>. Acesso em: 20 dez. 2024

ARSHAD, A. K. *et al.* Volumetric Analysis and performance of hot mix asphalt with variable RAP content. **MATEC Web of Conferences**. v.103, p.09004. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15087**: Misturas Asfálticas: Determinação da resistência à tração por compressão diametral. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16018**: Misturas asfálticas: Determinação da rigidez por compressão diametral sob carga repetida. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

ASPHALT RECYCLING AND RECLAIMING ASSOCIATION – ARRA. **Basic Asphalt Recycling Manual**. 2nd ed. Annapolis, Estados Unidos. 2015.

AZEVEDO, N. O. **Estudo das propriedades mecânicas de misturas asfálticas puras e modificadas com o politeraftalato de etileno (PET)**. 2016. Trabalho de Conclusão De Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual da Paraíba. Araruna, 2016. Disponível em: <https://dspace.bc.uepb.edu.br/jspui/bitstream/123456789/10301/1/PDF-%20Nath%C3%A1lia%20de%20Oliveira%20Azevedo.pdf>. Acesso em: 03 jan. 2025.

BARDINI, V.S.; KLINSKY, L.M.; FERNANDES, J.L. A importância do filler para o bom desempenho de misturas asfálticas. **Revista Minerva**, v.7, n.1, p. 71–78, 2013. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/002170999>. Acesso em: 05 nov. 2024.

BASTOS, J. B. S. **Considerações sobre a deformação permanente de pavimentos asfálticos no dimensionamento mecanístico-empírico**. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) - Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2017. Disponível em: [https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/23173/1/2016\\_tese\\_jbsbastos.pdf](https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/23173/1/2016_tese_jbsbastos.pdf). Acesso em: 10 nov. 2024.

BEHBAHANI, H.; AYAZI, M. J.; MONIRI, A. Laboratory investigation of rutting performance of warm mix asphalt containing high content of reclaimed asphalt pavement. **Petroleum Science and Technology**, v. 35(15), p. 1556–1561. 2017 Disponível em: 10.1080/10916466.2017.1316738. Acesso em: 04 jan. 2025

BERNUCCI, L. B. *et al.* **Pavimentação Asfáltica: Formação básica para engenheiros**. 2. ed. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2022. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/001735737>. Acesso em: 01 nov. 2024.

BERTOLLO, S. A. M. **Avaliação laboratorial de misturas asfálticas densas modificadas com borracha reciclada de pneus**. Tese (Doutorado em Transportes) - Universidade de São Paulo. São Paulo, 2002. Disponível em:< <https://doi.org/10.11606/T.18.2002.tde-14122015-152916>> Acesso em: 05 nov. 2024.

BOHN, K. A. **Avaliação de misturas asfálticas recicladas mornas com uso de ligantes convencional e modificado por polímero**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia civil) – Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Centro de Tecnologia, RS, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/13449>. Acesso em: 15 dez. 2024.

CARVALHO, J. R. *et al.* **Avaliação de diferentes tecnologias de misturas asfálticas mornas com a incorporação de elevadas quantidades de material fresado**. 2022. Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2022. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/xmlui/handle/riufcg/28732>. Acesso em: 02 nov. 2024.

CENTOFANTE, R. **Estudo laboratorial da utilização de material fresado em misturas asfálticas recicladas a quente**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Centro de Tecnologia, RS, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/7915>. Acesso em: 15 dez. 2024.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. Boletins técnicos CNT. Brasília, 2024. Acesso em: 12 jan. 2025. Disponível em: [www.cnt.gov.br/boletins](http://www.cnt.gov.br/boletins).

COSTA, D. B. *et al.* **Análise do envelhecimento, rigidez e suscetibilidade a presença de água em misturas recicladas com adição de agentes de reciclagem**. 2022. Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2022. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/xmlui/handle/riufcg/27481>. Acesso em: 01 nov. 2024.

COSTA, D. *et al.* Effects of recycling agents and methods on the fracture and moisture resistance of asphalt mixtures with high RAP contents. **Construction and Building Materials**, v. 367, p. 130312, 2023. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-023-31263-4>. Acesso em: 02 jan. 2025.

COSTA, D. B. *et al.* Efeitos do momento de adição e do agente de reciclagem no desempenho à rigidez e umidade de misturas recicladas. **38º ANPET**, v.3, nov. 2024. Disponível em: <https://proceedings.science/p/190768?lang=pt-br>. Acesso em: 01 jan. 2025

DA FERREIRA, L. *et al.* Determinação da ativação relativa do ligante RAP e avaliação da interferência de aditivos de reciclagem em misturas asfálticas produzidas com 100% RAP. **TRANSPORTES**, v. 31, n. 3, p. e2805-e2805, 2023. Disponível em: <https://revistatransportes.org.br/anpet/article/view/2805>. Acesso em: 05 jan. 2025.

DE MEDEIROS. M. N. *et al.* Viability of recycled asphalt mixtures with soybean oil sludge fatty acid. **Construction and Building Materials**, v.349, p.128728, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061822023856>. Acesso em: 04 nov. 2024.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES. **DNIT-ME 180/18**: Pavimentação: Misturas asfálticas – Determinação do dano por umidade induzida. Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: [https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/metodo-de-ensaio-me/dnit\\_180\\_2018\\_me-1.pdf](https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/metodo-de-ensaio-me/dnit_180_2018_me-1.pdf). Acesso em: 24 nov. 2024.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES. **DNIT – ME 136/18**: Determinação da resistência à tração por compressão diametral. Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: [https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/metodo-de-ensaio-me/dnit\\_136\\_2018\\_me-1.pdf](https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/metodo-de-ensaio-me/dnit_136_2018_me-1.pdf). Acesso em: 24 nov. 2024.

DEVULAPALLI, L.; KOTHANDARAMAN, S. K., SARANG, G. A Review on the mechanisms involved in Reclaimed Asphalt Pavement. **International Journal of Pavement Research and Technology**. p. 185-196. 2019. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s42947-019-0024-1>. Acesso em: 14 nov. 2024.

DIAS, P. S.; PINTO, I. E.; COSTA, C. Contribuição ao estudo de materiais fresados incorporados a um solo argilo siltoso para o uso em camadas de pavimentos flexíveis. **44ª RAPv–Reunião anual de pavimentação e 18º ENACOR–Encontro Nacional de Conservação Rodoviária**. Foz do Iguaçu, PR. 2015.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION RESEARCH AND TECHNOLOGY -FHWA. User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction. **Federal Highway Administration**, USA. 2016.

FRITZEN, M. A *et al.* Comportamento de misturas mornas por processo de espumação em diferentes temperaturas de usinagem e compactação. **Revista Estradas**, v. 11, p. 32-41, 2012.

GARDINER, M. S.; WAGNER, C. Use of reclaimed asphalt pavement in Superpave hot-mix asphalt applications. **Transportation Research Record**. v. 1681, p. 1-9. Washington, D. C. 1999. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.3141/1681-01>. Acesso em: 29 dez. 2024

GASPAR, M. S. **Mecanismos de ativação e interação entre ligantes na reciclagem asfáltica a quente e morna**. 2019. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade de São Paulo.

São Paulo, 2019. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-22082019-141237/en.php>. Acesso em: 12 nov. 2024.

GEWEHR, J. Uso de material asfáltico reciclado (RAP) em Usinas de Asfalto. **Asfalto de qualidade**. 2021. Disponível em: <https://asfaltodequalidade.blogspot.com/2021/09/uso-de-material-asfaltico-reciclado-rap.html>. Acesso em: 08 jan. 2025.

GODOI, I. C. **Aplicação do ensaio de flexão em amostra semicircular para avaliação de trincamento de misturas asfálticas**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, 2017. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/157860>. Acesso em: 30 nov. 2024.

GU, F. *et al.* Structural performance and Sustainability Assessment of cold central Plant and in- place Recycled Asphalt Pavements: A case study. **Journal of Cleaner Production**. v. 208, 20, p.1513-1523, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652618332487>. Acesso em: 12 nov. 2024.

GUATIMOSIM, F. V. **Comportamento mecânico e desempenho estrutural de materiais reciclados e estabilizados com espuma de asfalto**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade de São Paulo. São Paulo, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/D.3.2016.tde-07072016-153231>. Acesso em: 01 nov. 2024.

GUDURU, G.; TAVVA, T. L.; KUNA, K. Estimation of reclaimed asphalt pavement (RAP) characteristics using simple. **Road Materials and Pavement Design**. Kharagpur, 2020. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/14680629.2020.1845785>. Acesso em: 02 nov. 2024.

HINTZ, C.; BAHIA, H. Simplification of Linear Amplitude Sweep Test and Specification Parameter. **Transportation Research Record**, v.2370, n.1, p.10–16, 2013. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.3141/2370-02>. Acesso em: 02 nov. 2024.

HUANG, B.; VUKOSAVLJEVIC, D. Laboratory study of fatigue characteristics of HMA surface mixtures containing recycled asphalt pavement (RAP). **TRB Annual Meeting (CD-ROM)**. Transportation Research Board of National Academies, Washington, D.C., 2004. Disponível em: <https://trid.trb.org/View/902101>. Acesso em 02 jan. 2025.

HVEEM, F. N. Pavement deflection and fatigue failures. **Bulletin** n.144, HBR (TRB). p. 43-87. Washington, D.C., 1955. Disponível em: <https://trid.trb.org/View/104955>. Acesso em: 29/11/2024.

KARLSSON, R.; ISACSSON, U. Material-Related aspects of Asphalt Recycling-State-of-Theart. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 18, n. 1, p. 81–92. 2006. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/>. Acesso em: 29 nov. 2024

LEITE, L. M. F. *et al.* A importância das características dos agregados no desempenho das misturas asfálticas. **Informações básicas sobre materiais asfálticos**, p.191. Rio de Janeiro: IBP, 2021. Disponível em: <https://www.ibp.org.br/personalizado/uploads/2021/05/livro-agregados-asfalticos-site3.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2024.

LENG, Z., SREERAM, A., PADHAN, R. K., TAN, Z.; Value-added application of waste pet based aditives in bituminous mixtures containing high percentagem of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP). **Journal of Cleaner Production**, v. 196, p. 615-625, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652618317694>. Acesso em: 15 dez. 2024.

LU, D. X.; SALEH, M.; NGUYEN, N. H. T. Evaluatin of fracture and fatigue cracking chaacterization ability of nonstandardized semicircular-beding test for asphalt concrete. **American Society of Civil Engineers**. v. 32, n. 8, p. 04020215, 2020. Disponível em: [https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003292](https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003292). Acesso em: 25 dez. 2024.

LUZZI, F. C.; **Adaptação de usina para reciclagem a quente e avaliação laboratorial das misturas asfálticas produzidas**. 2019. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS. 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/19103>. Acesso em: 24 dez. 2024.

MAMUN, A. A.; AL-ABDUL WAHHAB, H. I. Evaluation of waste engine oil-rejuvenated asphalt concrete mixtures with high RAP contente. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2018, p. 8, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2018/7386256>. Acesso em: 10 dez. 2024

MARTINEZ, J. G. B. **Asfaltos e misturas modificadas com materiais alternativos**. 2018. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília. Brasília, 2018. Disponível em: <http://www.rlbea.unb.br/jspui/bitstream/10482/31645/1/2017>. Acesso em: 20 nov. 2024.

MOGHADDAM, T. B.; BAAJ, H. The use of Rejuvenating Agents in production of Recycled hot mix Asphalt: A Systematic Review. **Construction and Building Materials**. v. 114, p. 805–816, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061816305499>. Acesso em: 15 nov. 2024.

MOLENAAR, A. A. A.; LIU, X.; ERKENS, S. Semi-circular bending test: simple but useful?. **Asphalt Paving Technology: Association of Asphalt Paving Technologists-Proceedings of the Technical Sessions**. 2015. Disponível em: <https://khazna.ku.ac.ae/en/publications/semi-circular-bending-test-simple-but-useful>. Acesso em: 01 nov. 2024.

MORAIS, N. P. Análise comparativa entre métodos nacionais de dimensionamento de pavimentos asfálticos. **Brasil Escola**. 2019. Disponível em: <https://monografias.brasilecola.uol.com.br/engenharia/analise-comparativa-entre-metodos-nacionais-de-dimensionamento-de-pavimentos-asfalticos.htm>. Acesso em: 05 jan. 2025.

MOREIRA, I. S. *et al.* Impactos ambientais da produção de materiais estabilizados com emulsão de asfalto. **26º ENACOR - 49ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPv)**. p. 773-784. 2024. Disponível em: <chrome-extension://efaidnbmninnibpcjpcglclefindmkaj/https://rapv.enacor.com.br/anais/2024/TT517.pdf>. Acessado em 06 jan.2025.

MOTTA, L. M. G. Contribuição para a Estimativa do Modulo Resiliente de Misturas Asfálticas. **14º Encontro de Asfalto**. p. 30-39. 1998.

MOTTA, R.S. **Estudo de Misturas Asfálticas Mornas em Revestimento de Pavimentos para Redução de Emissão de Poluentes e de Consumo Energético**. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade de São Paulo. São Paulo, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/T.3.2011.tde-19072011-170629>. Acesso em: 04 nov. 2024.

NABIZADEH, H. Effects of rejuvenators on high-rap mixtures based on laboratory tests of Asphalt Concrete (AC) mixtures and Fine Aggregate Matrix (FAM) mixtures. **Construction and Building Material**. v. 152, p. 65 – 73. 2017. Disponível em: [https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003292](https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003292). Acessado em: 18 dez. 2024.

NSENGIYUMVA, G.; KIM, Y.; YOU, T. **Development of a semicircular bend (SCB) test method for performance testing of Nebraska**. Nebraska, 2015. Disponível em: <https://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1171&context=ndor>. Acesso em: 17 nov. 2024.

OMRANIAN, S. R., *et al.* Evaluation of asphalt mixture behavior incorporating warm mix additives reclaimed asphalt pavement. **Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)**. v. 5, p. 181-196. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095756416302252>. Acesso em: 28 dez. 2024.

O’SULLIVAN, K. A. **Rejuvenation of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) in hot mix asphalt recycling with high rap content**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Worcester Polytechnic Institute. Worcester, MA. 2011. Disponível em: <https://digital.wpi.edu/downloads/4t64gn280>. Acesso em: 10 nov. 2024.

PITANGUI, L. C. **Análise comparativa do método do DNER com o método mecânico empírico MeDiNa**. 2019. Trabalho de Conclusão De Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade De Brasília, Brasília, 2019. Disponível em: <https://www.passeidireto.com/arquivo/118776977/2019-lara-cordeiro-pitangu-i-tcc>. Acesso em: 18 nov. 2024

PONTE, R. S. *et al.* Avaliação de diferentes metodologias para obtenção do Módulo de Resiliência de misturas asfálticas. **Transportes**, v. 22, n. 2, p. 85- 94, 2014. Disponível em: <https://revistatransportes.org.br/anpet/article/view/792/517>. Acesso em: 02 nov. 2024.

RAUL, C. M. **Avaliação a nível de ligantes da aplicabilidade de material fresado na execução de misturas asfálticas antirreflexão de trincas**. 2019. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/D.3.2020.tde-07012020-153048>. Acesso em: 12 nov. 2024.

REIS, A. C. D. C. **Propriedades mecânicas de misturas asfálticas em usina protótipo de escala reduzida**. 2013. Dissertação (Mestrado em Ciência em Engenharia dos Transportes) - Curso de Mestrado em Engenharia de Transportes, Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: <https://bdex.eb.mil.br/jspui/bitstream/123456789/8130/1/>. Acesso em: 29 out. 2024.

RONDÓN, H. A.; HERNÁNDEZ, J. A.; REYES, F. A. A Review of Warm Mix Asphalt Technology: Technical, Eco-nomical and Enviromental Aspects. **Ingeniería e Investigación**,

v. 35(3), p. 5–18. 2015 Disponível em: [10.15446/ing.investig.v35n3.50463](https://doi.org/10.15446/ing.investig.v35n3.50463). Acesso em: 01 jan. 2025.

SABAHFAR, N., HOSSAIN, M. **Effect of Asphalt Rejuvenating agent on aged Reclaimed Asphalt Pavement and Bind Properties**. Kansas State University, 2016. Disponível em: <https://www.proquest.com/openview/c470e75d62a4855c80884388d3d0ecb4/1?pq-origsite=gscholar&cbl=18750>. Acesso em: 01 nov. 2024.

SAHA, G.; BILIGIRI, K.P. Fracture properties of Asphalt mixtures using semi-circular bedding test: A State-of-the art review and future research. **Construction and Building Materials**, v. 105, p. 103- 112, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061815307200>. Acesso em: 03 nov. 2024.

SILVA, E. S. **Utilização de resíduo de fresagem de pavimentos asfálticos em bases estabilizadas granulometricamente e em revestimentos asfálticos na cidade de Manaus**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Amazonas. Manaus, 2013. Disponível em: <https://tede.ufam.edu.br/handle/tede/4622>. Acesso em: 20 nov. 2024.

SILVA, J.P.S.; FARIAS, M.M. Avaliação química e ambiental de misturas asfálticas rejuvenescidas. **Revista Matéria**, v.23, n.3, Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/HDQvNmDbJjK7KWg9vttXbrR/>. Acesso em: 10 nov. 2024.

SILVA, J.P.S. **Avaliação dos efeitos de produtos rejuvenescedores em misturas Asfálticas**. 2011. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Programa de Pós- graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília. 2011. Disponível em: <http://www.rlbea.unb.br/jspui/handle/10482/8705>. Acesso em: 12 nov. 2024.

SUZUKI, K. Y. **Avaliação de misturas asfálticas recicladas a quente com diferentes teores de material fresado**. 2019. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/D.3.2019.tde-21082019-141957>. Acesso em: 20 nov. 2024.

STRATURA. **Solução em Produtos e Projetos**. 2021. Disponível em: <https://stratura.com.br/tecnologias/solucoes-em-produtos-e-projetos/>. Acesso em: 07 jan. 2025.

TAKAHASHI, M. M. **Avaliação do envelhecimento e rejuvenescimento de ligantes asfálticos**. 2020. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/D.3.2020.tde-25012021-101332>. Acesso em: 10 nov. 2024.

TAVARES, R. R. S. *et al.* **Drenagem, Pavimentação e Urbanização de Vias: Composições de Custos Unitários**. Brasília: Abepv, 2014. Disponível em: [https://www.confea.org.br/sites/default/files/201905/Obras\\_de\\_InfraEstrutura\\_Urbana\\_livro-compactado.pdf](https://www.confea.org.br/sites/default/files/201905/Obras_de_InfraEstrutura_Urbana_livro-compactado.pdf). Acesso em: 04 nov. 2024.

TOMLINSON, Christopher. **The effect of high RAP and high asphalt binder content on the dynamic modulus and fatigue resistance of asphalt concrete**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Virginia Polytechnic Institute and State University. Virginia, 2012.

Disponível em: <https://vtechworks.lib.vt.edu/items/c4efdfca-215f-4175-83c1-8bc279e140c6>. Acesso em: 03 jan. 2025.

TORRES, P.R.B. *et al.* Análise do comportamento mecânico de misturas asfálticas recicladas modificadas com a adição de óleo vegetal residual. **Transportes**, v. 30, n. 1, p. 2585. 2022. Disponível em: <https://www.revistatransportes.org.br/anpet/article/view/2585>. Acessado em: 02/01/2025.

UNGER FILHO, W. **Estudo de misturas asfálticas recicladas a frio produzida com 100% de revestimento asfáltico fresado e agente de reciclagem emulsificado**. 2019. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Eng. De Transportes. São Paulo, SP. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/D.3.2019.tde-25032019-102457>. Acesso em: 30 out. 2024.

VEIGA, J. M. R. C. **Modelos de previsão de deformação permanente de pavimentos rodoviários**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Ciência e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2013. Disponível em: [https://run.unl.pt/bitstream/10362/18382/1/Veiga\\_2013.pdf](https://run.unl.pt/bitstream/10362/18382/1/Veiga_2013.pdf). Acesso em: 27 nov. 2024.

WANG, Y. D.; KESHAVARZI, B.; KIM, Y. R. Fatigue Performance Analysis of Pavements with RAP Using Viscoelastic Continuum Damage Theory. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 22 (6), p. 2118-2125. 2018. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12205-018-2648-0>. Acesso em 28 dez. 2024.

YANG, C. *et al.* Enhancement Mechanism of induction heating on bleeding efficiency of RAP – Virgin Asphalt in Steel Slag Recycled Asphalt Mixtures. **Construction and Building Materials**, v. 269, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061820333225>. Acesso em: 02 dez. 2024.

YOUSEFI, A. *et al.* Performance evaluation of asphalt mixtures containing warm mix asphalt (WMA) additives and reclaimed asphalt pavement (RAP). **Construction and Building Materials**, Vol. 268, p. 0950-0618, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061820332049>. Acesso em: 24 dez. 2024.

YU, B.; WANG, Y.; ZHANG, M. Research of mechanical Properties of asphalt pavement materials with WMA and RAP. **Applied Mechanics and Materials**. v. 204-208, p. 3934-3937. Trans Tech Publications, Ltd. Disponível em: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.204-208.3934>. Acesso em: 27 dez. 2024.

ZAUMANIS, M.; MALLICK, R. B.; FRANK, R. Evaluation of different recycling agents for restoring aged asphalt binder and performance of 100% Recycled Asphalt. **Materials and Structures**, v.48, p. 2475-2488. 2015. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1617/s11527-014-0332-5>. Acesso em: 14 nov. 2024.

ZHANG, K.; HUCHET, F.; HOBBS, A. A review of thermal processes in the production and their influences on performance of asphalt mixtures with reclaimed asphalt pavement (RAP). **Construction and Building Materials**, v.206, p. 609–619. 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095006181930354X>. Acesso em: 31 out. 2024.

ZUBARAN, M. **Avaliação do comportamento de misturas asfálticas recicladas mornas em laboratório e usina de asfalto.** (2014) Dissertação (Mestrado em ciências em Engenharia Civil) - Instituto Adalberto Luiz Coimbra de pós-graduação e pesquisa de engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/http://objdig.ufrj.br/60/teses/coppe\\_m/MarceloZubaran.pdf](chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/http://objdig.ufrj.br/60/teses/coppe_m/MarceloZubaran.pdf). Acesso em: 09 jan. 2025.