



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE**  
**Centro de Tecnologia e Recursos Naturais – CTRN**  
**Unidade Acadêmica de Engenharia Civil – UAEC**  
**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGECA**  
**Área de Concentração: Geotecnia**

**SONALY MENDES ARRUDA**

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO E  
AUTORREGENERATIVO DE MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS**

Campina Grande - PB  
2021

SONALY MENDES ARRUDA

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO E AUTORREGENERATIVO DE  
MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre (Msc) em Engenharia Civil e Ambiental.

Área de concentração: Geotecnia

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> DSc. Lêda Christiane de Figueirêdo Lopes Lucena

Coorientador: DSc. Jonny Dantas Patrício

Campina Grande - PB  
2021

A779a Arruda, Sonaly Mendes.  
Avaliação do comportamento mecânico e autorregenerativo de misturas asfálticas recicladas / Sonaly Mendes Arruda. – Campina Grande, 2021.  
119 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2021.  
“Orientação: Profa. Dra. Lêda Christiane de Figueirêdo Lopes Lucena, Prof. Dr. Jonny Dantas Patrício”.

Referências.

1. Mistura Asfáltica Reciclada. 2. Envelhecimento de Longo Prazo. 3. Autorregeneração. 4. Geotecnia. 5. *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP). I. Lucena, Lêda Christiane de Figueirêdo Lopes. II. Patrício, Jonny Dantas. III. Título.

CDU 625.85(043)

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECÁRIA SEVERINA SUELI DA SILVA OLIVEIRA CRB-15/225



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
POS-GRADUACAO ENGENHARIA CIVIL AMBIENTAL  
Rua Aprigio Veloso, 882, - Bairro Universitario, Campina Grande/PB, CEP 58429-900

### REGISTRO DE PRESENÇA E ASSINATURAS

1. **ATA DA DEFESA PARA CONCESSÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**
2. **ALUNA: SONALY MENDES ARRUDA / COMISSÃO EXAMINADORA: DR.<sup>a</sup> LÊDA CHRISTIANE DE FIGUEIREDO LOPES LUCENA - PPGECA/UFMG (PRESIDENTE) - ORIENTADORA, DR. JONNY DANTAS PATRÍCIO - COORIENTADOR, DR. ADRIANO ELÍSIO DE FIGUEIREDO LOPES LUCENA - PPGECA/UFMG - EXAMINADOR INTERNO, DR.<sup>a</sup> JAMILLA EMI SUDO LUTIF TEIXEIRA – UFES – EXAMINADORA EXTERNA (PORTARIA 39/2021). / TITULO DA DISSERTAÇÃO: “AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO E AUTORREGENERATIVO DE MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS” / ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: GEOTECNIA / HORA DE INICIO: 14:00 HORAS / FORMA DA SESSÃO: POR VÍDEO CONFERÊNCIA.**
3. **EM SESSÃO REALIZADA POR VÍDEO CONFERÊNCIA, APÓS EXPOSIÇÃO DE CERCA DE 40 MINUTOS, O CANDIDATO FOI ARGUIDO ORALMENTE PELOS MEMBROS DA COMISSÃO EXAMINADORA, TENDO DEMONSTRADO SUFICIÊNCIA DE CONHECIMENTO E CAPACIDADE DE SISTEMATIZAÇÃO NO TEMA DE SUA DISSERTAÇÃO, SENDO-LHE ATRIBUÍDA O CONCEITO “EM EXIGÊNCIA”, SENDO QUE A POSSIBILIDADE DE APROVAÇÃO ESTÁ CONDICIONADA À AVALIAÇÃO DA NOVA VERSÃO DO TRABALHO FINAL, SEGUINDO PROCEDIMENTOS PREVISTOS NA RESOLUÇÃO DO PROGRAMA. O PRESIDENTE DA COMISSÃO EXAMINADORA, OUVIDOS OS DEMAIS MEMBROS, DEVERÁ FICAR RESPONSÁVEL POR ATESTAR QUE AS CORREÇÕES SOLICITADAS NA LISTA DE EXIGÊNCIAS FORAM ATENDIDAS NA VERSÃO FINAL DO TRABALHO. A COMISSÃO EXAMINADORA CUMPRINDO OS PRAZOS REGIMENTAIS, ESTABELECE UM PRAZO MÁXIMO DE 30 DIAS PARA QUE SEJAM FEITAS AS ALTERAÇÕES EXIGIDAS. APÓS O DEPÓSITO FINAL DO DOCUMENTO DE DISSERTAÇÃO, DEVIDAMENTE REVISADO E MEDIANTE ATESTADO DO ORIENTADOR, O CONCEITO "EM EXIGÊNCIA" PASSARÁ IMEDIATAMENTE PARA O DE “APROVADO”. NA FORMA REGULAMENTAR, FOI LAVRADA A PRESENTE ATA, QUE É ASSINADA POR MIM, WELLINGTON LAURENTINO DOS SANTOS, SECRETÁRIO, ALUNO E OS MEMBROS DA COMISSÃO EXAMINADORA PRESENTES.**
4. **CAMPINA GRANDE, 31 DE AGOSTO DE 2021**
- 5.
6. \_\_\_\_\_
7. **JONNY DANTAS PATRÍCIO - COORIENTADOR**
- 8.
9. \_\_\_\_\_
10. **JAMILLA EMI SUDO LUTIF TEIXEIRA – EXAMINADORA EXTERNA**

Documento assinado eletronicamente por **LEDA CHRISTIANE DE FIGUEIREDO LOPES LUCENA, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 31/08/2021, às 17:12, conforme horário oficial de



Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **ADRIANO ELISIO DE FIGUEIREDO LOPES LUCENA, CHEFE**, em 31/08/2021, às 17:15, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Sonalý Mendes Arruda, Usuário Externo**, em 03/09/2021, às 11:09, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Jonny Dantas Patricio, Usuário Externo**, em 03/09/2021, às 13:46, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **WELLINGTON LAURENTINO DOS SANTOS, SECRETÁRIO (A)**, em 08/09/2021, às 14:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufcg.edu.br/autenticidade>, informando o código verificador **1700639** e o código CRC **02FC2F68**.



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

**PROTOCOLO DE ASSINATURA**



O documento acima foi assinado digitalmente com senha eletrônica através do Protocolo Web, conforme Portaria UFES nº 1.269 de 30/08/2018, por  
JAMILLA EMI SUDO LUTIF TEIXEIRA - SIAPE 1889093  
Departamento de Engenharia Civil - DEC/CT  
Em 14/09/2021 às 15:35

Para verificar as assinaturas e visualizar o documento original acesse o link:  
<https://api.lepisma.ufes.br/arquivos-assinados/267228?tipoArquivo=O>

## EPÍGRAFE

“Prepara-se o cavalo para o dia da batalha,  
mas o Senhor é que dá a vitória.”

(Provérbios 21:31)

## AGRADECIMENTOS

À Deus, pelo dom da vida, pela oportunidade de realizar os sonhos, pela saúde e pela fé, mesmo diante das tribulações. A Ele dedico todos os meus passos.

Aos meus pais, Carlos e Janete; meus irmãos, Matheus e Amanda e à minha linda Letícia, agradeço pelo apoio incondicional, pelo amor genuíno, pela força nos momentos difíceis, pela paciência e suporte. A vocês dedico o meu amor e a certeza de que esta vitória é nossa!

Ao meu namorado, amigo e companheiro de trabalho, Conrado Cesar Vitorino. Agradeço o amor, a paciência, a fé depositada em mim, o incentivo constante, a dedicação e a ajuda na realização deste trabalho. Você é parte fundamental na conclusão desta etapa da minha vida.

Aos meus familiares, pelas palavras de incentivo, pela ajuda na caminhada.

À minha orientadora, professora Lêda Lucena, por me mostrar o valor do desafio de estar fora da zona de conforto, por me ajudar a vencer esta etapa tão importante, pela oportunidade de aprender e crescer com sua experiência e inteligência. Sou muito grata pela sua perseverança em me orientar.

Ao meu coorientador, Jonny Dantas, pelas ideias sempre eficazes na solução dos problemas práticos que, na minha ótica de orientanda, pareciam sempre grandes demais.

Aos professores Jamilla Teixeira e Adriano Lucena pela disponibilidade e prestatividade em avaliar este trabalho e, principalmente, pelas importantes contribuições feitas.

Às professoras Carina Silvani e Izabelle Marie, pela amizade, pelo apoio, pelo acolhimento e pelas oportunidades a mim oferecidas desde a graduação. Vocês foram e continuam sendo grandes responsáveis pelo meu crescimento.

A Daniel, Priscila, Laiana, Hélio, Marcela, Mateus e Thamires, com quem compartilhei a caminhada na vida e na pesquisa. Agradeço a ajuda na coleta dos materiais, na realização dos ensaios, nas discussões diárias dos resultados, no apoio emocional, nas conversas descontraídas e por dividirmos os bons e maus momentos desta etapa.

A Arthur Monteiro, pela disposição e presteza na realização da etapa reológica desta pesquisa e por viabilizar os ensaios no laboratório LAMMEN, na UFRN e SupraMat, da UFPE, onde estendo meu agradecimento ao mestrando José Daniel Fonseca, pela ajuda nos ensaios lá realizados.

A Fabiano Cavalcante pela valiosa contribuição no desenvolvimento desta pesquisa, desde a sua concepção. A Jamacy Andrade, pela viabilização da coleta do RAP.

Aos demais professores do PPGECA, John Kennedy, Adriano Lucena, Olavo Santos e Veruschka Escarião, pela formação. Aos técnicos do LEP, Jadilson e Joseildo e a Ladjane pelo bom convívio e pelo auxílio sempre presentes durante a realização deste trabalho.

Aos demais cujos nomes não foram citados, mas que fazem parte da história da minha vida, contribuindo direta e indiretamente para a construção de ser quem sou até aqui, lhes dedico minha gratidão.

## RESUMO

Uma vez que a qualidade do pavimento seja considerada insatisfatória, após uma vida de serviço exposto a intempéries e diversas condições de tráfego, a reconstrução de um novo pavimento depende remoção do antigo. Esta remoção é comumente realizada mediante emprego de técnicas de fresagem, que geram, como subproduto, o material fresado. O descarte inadequado deste material ocasiona um passivo ambiental relevante, além de representar um desperdício de insumo de boa qualidade e com potencial de reaproveitamento. Quando utilizado em novas misturas, esse material recebe o nome de *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP). As pesquisas que envolvem o uso do RAP em misturas asfálticas têm se expandido, mas o conhecimento do comportamento de um revestimento reciclado a longo prazo ainda é incipiente, senão, ainda inexistente. Neste sentido, esta pesquisa objetivou avaliar o desempenho mecânico e a capacidade de autorregeneração de misturas asfálticas recicladas com incorporação de asfalto fresado nos teores de 0%, 10%, 30% e 50% por peso, antes e após envelhecimento. O estudo foi dividido em quatro etapas: na primeira, as propriedades mecânicas das misturas recicladas foram avaliadas por meio dos ensaios de Resistência à Tração por Compressão Diametral (RT), Módulo de Resiliência (MR), Dano por Umidade Induzida (DUI), Resistência à Deformação Permanente (*Flow Number*) e Resistência à Fadiga (RF); a segunda fase consistiu no estudo da capacidade de autorregeneração por meio do ensaio de vida de fadiga; as terceira e quarta fases foram a realização dos mesmos ensaios, desta vez, nas misturas submetidas ao envelhecimento. Os ensaios de MR, RT e *Flow Number* indicaram um aumento de rigidez e diminuição da deformabilidade à medida que se aumenta o teor de RAP na composição da mistura, sendo esse comportamento mais acentuado nas misturas envelhecidas. Para os teores de RAP estudados, não foram identificadas alterações no resultados de DUI das misturas asfálticas em ambas as condições de envelhecimento. A resistência à fadiga aumentou à medida em que o teor de RAP aumentou e o comportamento das misturas de referência (0% de RAP) e 10% de RAP se assemelham, assim como das misturas com 30% e 50% de RAP. A tendência observada, com relação à capacidade de autorregeneração, foi de que o índice de autorregeneração diminui com o aumento do teor de RAP na composição, com o aumento do dano prévio aplicado e com o envelhecimento. As misturas envelhecidas foram mais resistentes à fadiga, uma vez que apresentaram acréscimo no número de ciclos até a ruptura, bem como diminuição da deformabilidade em comparação às misturas na condição não envelhecida, devido ao aumento da rigidez observado. Portanto, por meio dos resultados obtidos nessa pesquisa foi possível inferir que o uso do RAP torna as misturas asfálticas mais rígidas, que essas misturas recicladas têm seu comportamento fortemente afetado pelo envelhecimento e que a inserção de RAP afeta negativamente o índice de autorregeneração do revestimento. Devido ao observado é necessário atentar para a compatibilidade de rigidez das camadas constituintes do pavimento para que o uso da mistura asfáltica reciclada seja satisfatório.

**Palavras-chave:** RAP, envelhecimento de longo prazo, propriedades mecânicas, autorregeneração.

## ABSTRACT

After a lifetime of service exposed to bad weather and various traffic conditions, the pavement quality declines until it becomes unsatisfactory. To rebuild a new pavement, it is necessary to remove the old one using milling techniques. Milling the pavement generates, as a by-product, the milled asphalt. The inappropriate disposal of this material causes a relevant environmental liability, in addition to representing a waste of potentially reusable good quality material. When used in new mixtures, this material is called Reclaimed Asphalt Pavement (RAP). Research involving the use of RAP in asphalt mixtures has expanded, but knowledge of the behavior of a recycled coating in the long term is still incipient, if not non-existent. In this sense, this research aimed to evaluate the mechanical performance and self-regeneration capacity of recycled asphalt mixtures with the incorporation of milled asphalt at levels of 0%, 10%, 30% and 50% by weight, before and after ageing. The study has four stages: the first, when the mechanical properties of the recycled mixtures were evaluated through the Tensile Strength by Diametral Compression (RT), Resilience Modulus (MR), Induced Moisture Damage (DUI), Resistant to Permanent Deformation (Flow Number) and Fatigue Resistance (RF); the second phase consisted of the study of the self-healing using the fatigue life test; in the third and fourth phases, the same tests were made on mixtures subjected to long-term oven ageing. The MR, RT and Flow Number tests indicated an increase in stiffness and a decrease in deformability as the RAP content in the mixture composition increases, and the ageing accentuate these properties. The moisture damage susceptibility was not affected for the inserted RAP contents, neither in the aged condition. Fatigue resistance increased as the RAP content increased and the behavior of the reference mixtures (0% RAP) and 10% RAP were similar, as well as the mixtures with 30% and 50% of RAP. The aged mixtures were more resistant to fatigue. They presented an increase in the number of cycles until failure, as well as a decrease in deformability compared to the mixtures in the non-aged condition, due to the observed increase in stiffness. Therefore, the results shows that the use of RAP makes the asphalt mixtures more rigid, and strongly affected by ageing. The addition of RAP negatively affects the self-healing index of the coating layer. Due to what has been observed, it is necessary to pay attention to the rigidity compatibility of the pavement's constituent layers so that the use of recycled asphalt mixture is satisfactory.

**Keywords:** RAP, Long term ageing, mechanical properties, self-healing.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Relação custo x benefício da reciclagem de pavimentos .....	24
<b>Figura 2</b> - Superfície de um pavimento após procedimento de fresagem .....	25
<b>Figura 3</b> - Unidade de reciclagem a frio in situ em operação.....	26
<b>Figura 4</b> - Remoção de pavimento em total profundidade .....	27
<b>Figura 5</b> - Pilha de RAP de múltiplas origens contaminada por sujeira (círculo em vermelho) .....	28
<b>Figura 6</b> - Mobilização do ligante envelhecido durante processo de aquecimento do RAP .	31
<b>Figura 7</b> - Fluxograma de dosagem de misturas recicladas pelo método Marshall ou Hveem .....	33
<b>Figura 8</b> - Blending chart para determinação do teor de RAP admissível em uma mistura reciclada .....	35
<b>Figura 9</b> - Fluxograma de dosagem Superpave para misturas com RAP .....	37
<b>Figura 10</b> - Estado de tensões nas camadas de um pavimento devido às ações do tráfego, da precipitação e do intemperismo .....	38
<b>Figura 11</b> - Domínios típicos do comportamento de misturas asfálticas convencionais.....	39
<b>Figura 12</b> - Diagrama esquemático do mecanismo de desenvolvimento da deformação permanente .....	41
<b>Figura 13</b> - Regiões da curva de deformação plástica em ensaio de Flow Number .....	42
<b>Figura 14</b> - Flow Number das misturas estudadas por Al-Qadi et al. (2012).....	43
<b>Figura 15</b> - Resultados do ensaio Duriez para misturas a quente (HMA) e mornas (WMA), com 0 e 50% de RAP, com e sem agente rejuvenescedor.....	45
<b>Figura 16</b> - Modos de desenvolvimento de trincas: (a) Modo de abertura; (b) Modo de cisalhamento e (c) Modo de rasgamento da face.....	47
<b>Figura 17</b> - Espectro FTIR típico de um ligante novo e um ligante envelhecido.....	50
<b>Figura 18</b> - Etapas do envelhecimento de ligantes asfálticos .....	51
<b>Figura 19</b> - Estágios da autorregeneração a nível molecular.....	53
<b>Figura 20</b> - Observação do mecanismo de autorregeneração de uma trinca obtida por tomografia computadorizada em diferentes períodos de descanso.....	55
<b>Figura 21</b> - Índices de extensão da vida de fadiga de amostras versus (a) temperatura de indução da autorregeneração e (b) amplitudes de deformação .....	57
<b>Figura 22</b> - Fluxograma representativo do método utilizado nesta pesquisa .....	60
<b>Figura 23</b> - Coleta de amostras de RAP: (a) Pilha de estocagem ao ar livre e (b) Aspecto visual do material fresado .....	61
<b>Figura 24</b> - Distribuição granulométrica das amostras de RAP antes e após a extração de ligante.....	62
<b>Figura 25</b> - Rotoevaporação do ligante dissolvido em tricloroetileno .....	63

<b>Figura 26</b> - Ligante recuperado por rotoevaporação em estufa a vácuo.....	63
<b>Figura 27</b> - Espectro FTIR das amostras recolhidas durante o processo de recuperação do ligante asfáltico do RAP.....	64
<b>Figura 28</b> - Curvas viscosidade versus temperatura para os ligantes virgem e recuperado do RAP.....	66
<b>Figura 29</b> - Blending chart das misturas estudadas.....	67
<b>Figura 30</b> - Distribuição granulométrica dos agregados virgens.....	68
<b>Figura 31</b> - Curvas granulométricas inferior, intermediária e superior da amostra de referência.....	69
<b>Figura 32</b> - Curvas granulométricas finais das amostras de referência e com RAP.....	71
<b>Figura 33</b> - Corpos de prova em estufa a 85°C por 5 dias para simulação do envelhecimento.....	72
<b>Figura 34</b> - Corpos de prova acondicionados à temperatura ambiente após o envelhecimento.....	72
<b>Figura 35</b> - Procedimento para mensuração da autorregeneração: (a) confinamento do CP no molde PVC após ciclos de dano; (b) CPS em estufa a 45°C por 4 horas; (c) plano de indução das trincas marcado na superfície do CP e (d) posicionamento do CP no aparato do ensaio.....	78
<b>Figura 36</b> - Fluxograma do procedimento utilizado na mensuração da capacidade de autorregeneração.....	78
<b>Figura 37</b> - Resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral nas amostras não-envelhecidas e envelhecidas.....	79
<b>Figura 38</b> - Corpos de prova rompidos após ensaio de tração por compressão diametral, das misturas: (a) AREF; (b) ARAP10; (c) ARAP30; (d) e (e) ARAP50.....	80
<b>Figura 39</b> - Resultados do ensaio de módulo de resiliência para todas as misturas avaliadas antes e após o envelhecimento.....	81
<b>Figura 40</b> - Resistência retida à tração das amostras de referência e com RAP estudadas, antes e após o envelhecimento.....	83
<b>Figura 41</b> - Resultados dos ensaios de resistência à deformação permanente das misturas não-envelhecidas.....	84
<b>Figura 42</b> - Resultados dos ensaios de resistência à deformação permanente das misturas de referência e com 50% de RAP, não-envelhecidas e envelhecidas.....	86
<b>Figura 43</b> - Corpos de prova após o ensaio de Flow Number: (a) mistura AREF; (b) mistura ARAP50; (c) misturas AREF-E (à esquerda) e ARAP50-E (à direita).....	87
<b>Figura 44</b> - Número de ciclos até a ruptura versus diferença de tensões para as amostras não-envelhecidas.....	88

<b>Figura 45</b> - Número de ciclos até a ruptura versus deformação específica resiliente para as amostras não-envelhecidas .....	88
<b>Figura 46</b> - Deflexão do atuador de cargas versus número de ciclos para as amostras não-envelhecidas.....	89
<b>Figura 47</b> - Ruptura do corpo de prova .....	90
<b>Figura 48</b> - Número de ciclos até a ruptura versus diferença de tensões para as amostras envelhecidas.....	92
<b>Figura 49</b> - Número de ciclos até a ruptura versus deformação específica resiliente para as amostras envelhecidas .....	92
<b>Figura 50</b> - Comparação do número de ciclos até a ruptura versus deformação específica resiliente entre as amostras não-envelhecidas e amostra de referência envelhecida .....	94
<b>Figura 51</b> - Índice de autorregeneração das amostras não-envelhecidas versus nível de dano .....	97
<b>Figura 52</b> - Extensão da vida de fadiga das amostras não-envelhecidas versus nível de dano .....	97
<b>Figura 53</b> - Comparação do número de ciclos até a ruptura <i>versus</i> diferença de tensões para as amostras não-envelhecidas antes e após a autorregeneração de 25% do dano.....	99
<b>Figura 54</b> - Comparação do número de ciclos até a ruptura versus diferença de tensões para as amostras não-envelhecidas antes e após a autorregeneração de 50% do dano...	100
<b>Figura 55</b> - Comparação do número de ciclos até a ruptura versus diferença de tensões para as amostras não-envelhecidas antes e após a autorregeneração de 75% do dano...	100
<b>Figura 56</b> - Índice de autorregeneração das amostras envelhecidas versus nível de dano	101
<b>Figura 57</b> - Extensão da vida de fadiga das amostras envelhecidas versus nível de dano	101
<b>Figura 58</b> - Comparação do número de ciclos até a ruptura versus diferença de tensões para as amostras AREF, AREF-E, ARAP50 e ARAP50-E antes e após a autorregeneração de 25% do dano.....	103
<b>Figura 59</b> - Comparação do número de ciclos até a ruptura versus diferença de tensões para as amostras AREF, AREF-E, ARAP50 e ARAP50-E antes e após a autorregeneração de 50% do dano.....	103
<b>Figura 60</b> - Comparação do número de ciclos até a ruptura versus diferença de tensões para as amostras AREF, AREF-E, ARAP50 e ARAP50-E antes e após a autorregeneração de 75% do dano.....	104
<b>Figura 61</b> - Fluxograma de sequência de dano supostamente real para uma mistura com 50% de RAP durante o envelhecimento e vida de fadiga.....	104

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Temperatura de usinagem necessária para aquecer os agregados virgens com base na umidade do RAP .....	30
<b>Tabela 2</b> - Classes das misturas asfálticas determinadas em virtude do Flow Number .....	42
<b>Tabela 3</b> - Caracterização preliminar do RAP .....	61
<b>Tabela 4</b> - Caracterização dos ligantes recuperado e virgem utilizados .....	65
<b>Tabela 5</b> - Temperaturas de usinagem e compactação das misturas de referência e com RAP .....	66
<b>Tabela 6</b> - Caracterização física dos agregados virgens .....	68
<b>Tabela 7</b> - Parâmetros volumétricos das curvas inferior, intermediária e superior da amostra de referência.....	70
<b>Tabela 8</b> - Percentuais finais dos materiais nas misturas estudadas nesta pesquisa .....	70
<b>Tabela 9</b> - Parâmetros volumétricos finais das misturas estudadas nesta pesquisa .....	71
<b>Tabela 10</b> - Equações características das curvas de vida de fadiga das misturas não-envelhecidas.....	88
<b>Tabela 11</b> - Equações características das curvas de vida de fadiga das misturas envelhecidas.....	92
<b>Tabela 12</b> - Número de ciclos médio correspondente à ruptura por fadiga de todas as misturas não-envelhecidas e das misturas de referência e 50% de RAP envelhecidas .....	95
<b>Tabela 13</b> - Índices de autorregeneração e extensão percentual da vida de fadiga das misturas .....	95
<b>Tabela 14</b> - Índices de autorregeneração da mistura com 50% de RAP na sequência de dano supostamente real .....	105

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 1</b> - Nomenclaturas e descrição das amostras na etapa inicial .....	59
<b>Quadro 2</b> - Nomenclaturas e descrição das amostras na etapa de autorregeneração .....	76

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
AMPT	Asphalt Mixture Performance Tester
ASTM	American Society for Testing and Materials
ATR	Afundamento da Trilha de Roda
BR	Black Rock
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CIR	Cold In-place Recycling
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DoA	Degree of Binder Activity
DoB	Degree of Blending
FDR	Full Depth Reclamation
FHWA	Federal Highway Administration
FN	Flow Number
FTIR	Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier
FWD	Falling Weight Deflectometer
$G_{mm}$	Massa específica máxima medida
HIR	Hot In-place Recycling
LEP	Laboratório de Engenharia de Pavimentos
LTOA	Long-term Oven Ageing
LVDT	Linear Variable Differential Transducer
MAUQ	Mistura Asfáltica Usinada à Quente
MR	Módulo de Resiliência
NAC	Teor de asfalto nuclear
NBR	Norma Brasileira Técnica
NCAT	NSW Civil and Administrative Tribunal
NCHRP	National Cooperative Highway Research Program
PB	Partial Blending
PG	Performance Grade
RAP	Reclaimed Asphalt Pavement
RRT	Resistência Retida à Tração
RT	Resistência à Tração por Compressão Diametral
RTc	Resistência à Tração Condicionada
RTnc	Resistência à Tração Não-Condicionada
RTFO	Rolling Thin Film Oven
SHRP	Strategic Highway Research Program

SGP	Sistema de Gerência de Pavimentos
STOA	Short Term Oven Ageing
TCE	Solvente Tricloroetileno
TMM	Tamanho Nominal Máximo
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande
UFPE	Universidade Federal do Pernambuco
UFRN	Universidade Federal do Rio Grande do Norte

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	20
1.1 OBJETIVOS .....	22
1.1.1 Objetivo Geral.....	22
1.1.2 Objetivos Específicos.....	22
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	23
2.1 Reciclagem de pavimentos.....	23
2.2 Misturas asfálticas recicladas à quente .....	29
2.3 Dosagem de misturas asfálticas recicladas a quente .....	32
2.4 Propriedades mecânicas de misturas asfálticas recicladas a quente.....	38
2.4.1 Módulo de resiliência .....	39
2.4.2 Deformação Permanente .....	41
2.4.3 Dano por umidade .....	44
2.4.4 Fenômeno da fadiga e surgimento de trincas .....	45
2.5 Comportamento de misturas asfálticas sob a ação do tempo.....	48
2.5.1 Envelhecimento .....	48
2.5.2 Capacidade de autorregeneração das misturas asfálticas ( <i>self healing</i> ) .....	52
2.6 Considerações Finais .....	57
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	59
3.1 Materiais.....	60
3.1.1 RAP .....	60
3.1.2 Ligante asfáltico.....	65
3.1.3 Agregados .....	67
3.2 Métodos .....	69
3.2.1 Dosagem Superpave .....	69
3.2.2 Protocolo de envelhecimento .....	71
3.2.3 Ensaio mecânicos .....	73
3.2.4 Mensuração de autorregeneração .....	75
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	79

4.1 Resistência à tração por compressão diametral - RT .....	79
4.2 Módulo de Resiliência - MR.....	81
4.3 Resistência ao dano por umidade induzida .....	82
4.4 Resistência à deformação permanente .....	84
4.5 Vida de Fadiga .....	87
4.5.1 Efeito do RAP no trincamento por fadiga de misturas asfálticas recicladas .....	87
4.5.2 Efeito do envelhecimento na vida de fadiga das misturas asfálticas recicladas ...	91
4.6 Autorregeneração.....	95
<b>5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES .....</b>	<b>106</b>
5.1 Sugestões para Pesquisas Futuras .....	107
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>109</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A indústria da pavimentação demanda elevadas quantidades de agregados pétreos, oriundos das atividades de mineração e beneficiamento, e de ligante asfáltico de petróleo e seus derivados. Além disto, o pavimento asfáltico, após ser fresado ou removido ao fim da sua vida útil, se descartado na natureza, gera um passivo ambiental relevante, tendo em vista que na composição do ligante asfáltico existem hidrocarbonetos pesados e aproximadamente 10% de heteroátomos (MARDER e MALYSZ, 2016).

A preocupação com os impactos ambientais provenientes da atividade da pavimentação somada ao aumento do preço do petróleo e seus derivados, principalmente a partir da crise ocorrida na década de 1970, alavancaram os estudos sobre a reciclagem de pavimentos asfálticos até os dias de hoje. O RAP, sigla em inglês para *Reclaimed Asphalt Pavement*, é o produto obtido a partir da fresagem dos revestimentos asfálticos e tem sido incorporado em novas misturas asfálticas em porcentagens que vão até 100%. Segundo Unger Filho (2015) todos os anos são produzidas cerca de 100 milhões de toneladas de RAP nos Estados Unidos e todo este material é reaproveitado em novas misturas. A essas misturas, dá-se o nome de mistura asfáltica reciclada que, no Brasil, ainda é uma técnica ainda é incipiente, com poucos trechos construídos com a utilização deste material.

As misturas asfálticas recicladas, apesar da contribuição para desenvolvimento sustentável, apresentam alguns aspectos que merecem atenção e mais entendimento para que sua utilização também seja satisfatória do ponto de vista técnico. Canchanya (2017) afirma que à medida em que se aumenta o percentual de RAP nas misturas asfálticas recicladas, promove-se o enrijecimento destas, haja vista o significativo teor de ligante envelhecido oriundo do RAP disponível para interagir com os demais materiais virgens na nova mistura.

A quantidade de ligante do RAP que efetivamente se mistura ao ligante virgem é quem determina esse enrijecimento. O RAP pode atuar como agregado negro (*black rock*), quando não há nenhuma mobilização do ligante que envolve o agregado pétreo; pode atuar como agregado branco, quando todo o seu ligante é mobilizado e misturado ao ligante virgem e, ainda, esta quantidade de ligante mobilizada pode ser variável, quando apenas parte dele é efetivamente ativado.

Os procedimentos para a mobilização do ligante do RAP requerem a adoção de altas temperaturas, responsáveis por também envelhecer o ligante virgem a ser adicionado e contribuir para o acréscimo de rigidez, que segue aumentando durante toda a vida útil do novo pavimento reciclado (GENNESSAUX, 2015). Neste sentido, a simulação, em laboratório, do envelhecimento a longo prazo em campo é uma ferramenta eficaz para prever os possíveis efeitos do acréscimo de rigidez de misturas asfálticas recicladas e avaliar a manutenção de suas propriedades mecânicas, tais como resistência à tração, módulo de resiliência, vida de

fadiga e capacidade de autorregeneração (MORILHA JUNIOR, 2004; YIN *et al.*, 2017; GÓMEZ-MEIJIDE *et al.*, 2018).

A compatibilidade da rigidez entre as camadas que compõem o pavimento é relevante, neste sentido, para que o revestimento tenha, em campo, o desempenho observado em laboratório. Em misturas recicladas, o principal aspecto a ser considerado é a sua resistência ao trincamento por fadiga, i.e., dano resultante de esforços repetitivos de cargas que eventualmente levam a ruptura do pavimento. Por serem mais rígidas que misturas convencionais, as trincas em misturas rígidas são menores, mas a ruptura do material tende a ocorrer de forma abrupta (GÓMEZ-MEIJIDE *et al.*, 2018). O fato das misturas com RAP tenderem a possuir este comportamento característico de materiais frágeis, ainda que suportem um elevado número de ciclos de carga repetitiva até a falha, é amplamente conhecido. Entretanto, a avaliação destes efeitos a longo prazo e possíveis efeitos de autorregeneração (*self-healing*) das trincas ainda é pouco explorado na literatura (MULLAPUDI *et al.*, 2020).

A capacidade de autorregeneração é inerente à mistura asfáltica e atua em menor grandeza do que o dano por fadiga. No entanto, não a considerar pode levar ao superdimensionamento de estruturas de pavimento (XU *et al.*, 2018). Este fenômeno descreve a selagem espontânea de fissuras referentes aos danos em menor escala (microtrincas), pela mobilização do ligante até o local da trinca que, após certo período de repouso, se acomoda e leva à recuperação da resistência e resiliência iniciais da mistura.

Em misturas recicladas, dada a natureza envelhecida do ligante do RAP, o fenômeno de autorregeneração tende a ser dificultado, mas ainda é passível de ocorrer. Portanto, a investigação do comportamento mecânico de misturas asfálticas recicladas a curto e longo prazo, que contam com elevados valores de rigidez inicial, considerando os possíveis efeitos positivos da autorregeneração, é importante para que se possa ter um entendimento de todos os mecanismos que atuem a favor do dano e no combate dele.

Desta forma, este trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho mecânico e a capacidade de autorregeneração de misturas asfálticas recicladas. Com isso, espera-se contribuir para utilização de materiais reciclados em maior escala, com qualidade técnica satisfatória e que alie sustentabilidade à eficiência.

## **1.1 OBJETIVOS**

### **1.1.1 Objetivo Geral**

Avaliar o desempenho mecânico e a capacidade de autorregeneração de misturas asfálticas recicladas a curto e longo prazo.

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

- analisar o efeito da incorporação de diferentes percentuais de RAP no desempenho mecânico de misturas asfálticas;
- verificar a influência do envelhecimento de longo prazo no comportamento mecânico de misturas asfálticas com diferentes teores de RAP;
- analisar o efeito da adição de RAP na capacidade de autorregeneração de misturas asfálticas recicladas;
- avaliar o efeito da magnitude do dano inicial na autorregeneração de misturas asfálticas recicladas;
- comparar o efeito do envelhecimento no comportamento regenerativo de uma mistura convencional e uma mistura com adição de 50% de material fresado para avaliar a influência do ligante do RAP neste aspecto.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

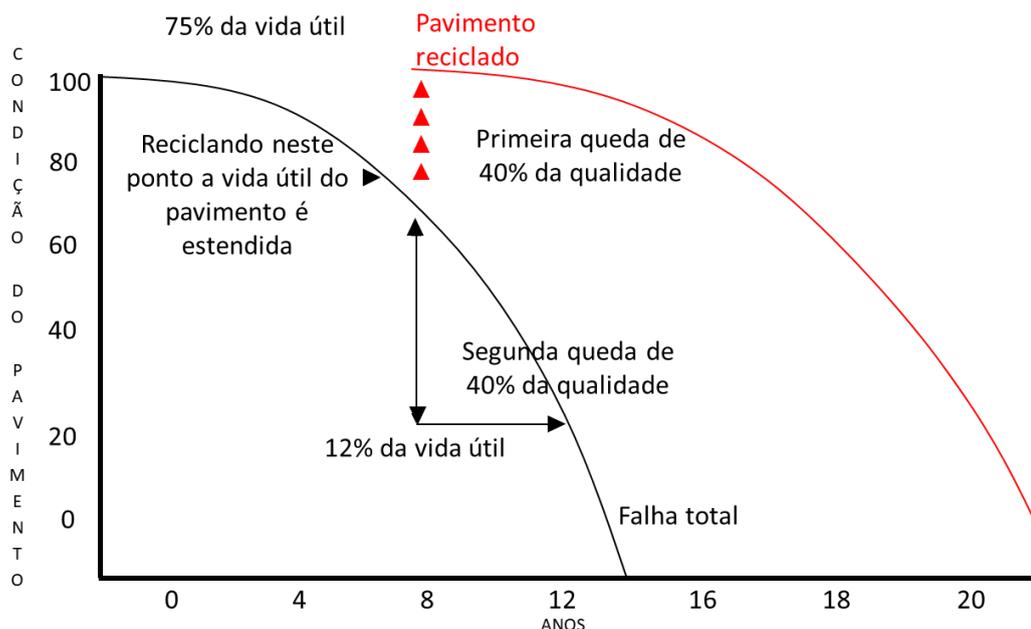
Este capítulo apresenta os tópicos importantes para o entendimento da pesquisa desenvolvida, tais como: contextualização da reciclagem de pavimentos e as complexidades na implementação desta técnica nas boas práticas da pavimentação; a adaptação do procedimento de dosagem SUPERPAVE para produção de misturas asfálticas recicladas; estudos de comportamento mecânico de mistura asfálticas recicladas em comparação às misturas convencionais a curto e longo prazo e estudos sobre o mecanismo autorregenerativo em misturas asfálticas convencionais e recicladas, mostrando as recentes pesquisas nacionais e internacionais sobre o tema. Dessa forma, busca-se neste capítulo um embasamento teórico sobre como o pavimento reciclado se comporta ao longo do tempo, e como a capacidade de autorregeneração pode influenciar na durabilidade deste tipo de mistura.

### **2.1 Reciclagem de pavimentos**

A deterioração do pavimento ocorre em razão do tempo de serviço, volume de tráfego, peso e pressão das rodas, variações laterais da passagem de veículos, qualidade dos materiais e dos efeitos do clima. Uma avaliação frequente da qualidade do pavimento, realizada por um sistema de gerência de pavimentos (SGP), faz com que a realização tardia de intervenções com ações emergenciais de reconstrução ou restaurações de grande porte sejam evitáveis, pois, seus custos são significativamente superiores aos de manutenção e conservação (GONÇALVES e ESPÍNDOLA, 2020).

Segundo a ARRA (2015) se a qualidade ao rolamento (e condições de serventia) do pavimento reduzisse 80% do valor inicial sem intervenção, o custo de manutenção seria entre \$5,00 e \$7,00 (unidades de moeda) para restaurá-lo. No entanto, se o pavimento for recuperado até a primeira queda de 40% de sua qualidade inicial, este custo seria reduzido a \$1,00 e haveria uma extensão de cerca de 12% da vida útil (Figura 1). Dentre os métodos de reabilitação de um pavimento asfáltico – remendo, reforço ou reconstrução –, a reciclagem pode ser uma alternativa viável, entretanto deve-se considerar as condições do pavimento existente, a qualidade da mistura asfáltica remanescente e a tecnologia disponível para este fim.

**Figura 1 - Relação custo x benefício da reciclagem de pavimentos**



Fonte: Adaptado de ARRA, 2015

A reciclagem de pavimentos é uma técnica que consiste na remoção e reaproveitamento dos materiais asfálticos, em conjunto ou em separado, com ou sem beneficiamento. Segundo afirmam Newcomb *et al.* (2007) este procedimento data do início do século XX, mas foi difundido mundialmente apenas na década de 1970, devido aos embargos impostos pelos países árabes da Organização dos Países Exportadores de Petróleo que, indiretamente, “forçaram” os países europeus a adotar a técnica e descobrir como torná-la eficiente.

A necessidade de reciclar o pavimento, aproveitando o material fresado (denominado RAP deste ponto em diante do trabalho), provém tanto do apelo ambiental, dada a possibilidade de redução significativa na exploração de novas jazidas de agregados, do consumo de ligante asfáltico, quanto da economia de espaços físicos para a deposição de RAP e recursos financeiros. Para McDaniel e Anderson (2001) além do RAP possuir alto valor agregado, ainda que esteja desgastado, as misturas à quente com RAP podem apresentar desempenho tão satisfatório quanto misturas asfálticas produzidas somente com materiais novos, o que justifica e incentiva a prática da reciclagem.

A reciclagem de um pavimento também permite a correção de um possível erro de dosagem no projeto inicial da mistura, sem a necessidade de desperdiçá-lo. Para isto, a análise laboratorial do material removido é de suma importância e contribui para o aprimoramento do serviço de pavimentação. Para a remoção do pavimento inservível e reaproveitamento do RAP podem ser definidos os cinco tipos de reciclagem a serem desenvolvidas.

I) *Cold planing* – termo traduzido livremente como “aplainamento a frio”, para descrever a remoção controlada a frio da camada de revestimento a uma certa profundidade e inclinação. Este procedimento remove saliências, sulcos e deformidades da superfície do pavimento, deixando uma textura plana, uniforme e texturizada (Figura 2). O procedimento de fresagem é realizado por um tambor rotativo que corta, coleta e transporta o material fresado até um caminhão que segue em conjunto, para a remoção do material do local. A este material, dá-se o nome de *Recyclable Asphalt Pavement* ou *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP), que pode ser utilizado em novas misturas à quente, a frio, em estabilização granulométrica de bases ou como base negra, isoladamente.

**Figura 2** - Superfície de um pavimento após procedimento de fresagem



**Fonte:** FHWA, 2017

II) *Cold in-place recycling (CIR)* – a reciclagem a frio in situ consiste no reprocessamento do RAP assim que removido. Para isso, são empregados agentes rejuvenescedores, emulsões asfálticas e/ou agregados virgens, misturados ao RAP em usinas portáteis a frio, reaplicados e compactados, em um processo contínuo. A Figura 3 ilustra uma unidade de reciclagem a frio *in situ*. No entanto, podem ser utilizadas unidades encarrilhadas, compondo um trem de duas ou mais unidades, a depender da necessidade de profundidade de fresagem e reconstrução, e da celeridade desejada.

**Figura 3** - Unidade de reciclagem a frio in situ em operação



Fonte: FHWA, 2017

III) *Hot recycling in asphalt plant* – o RAP proveniente dos serviços de fresagem/moagem a frio são transportados para usinas, combinados com agregados virgens, ligante asfáltico virgem e/ou aditivos, tais como agentes rejuvenescedores, agentes recicladores, polímeros etc. Neste tipo de reciclagem é necessário adaptar a usina, seja gravimétrica ou volumétrica, para receber, aquecer separadamente e incluir o RAP, a depender do teor adicionado e da capacidade calorífica do sistema.

IV) *Hot in-place recycling (HIR)* – a reciclagem a quente in situ é realizada no próprio trecho a ser recomposto. O RAP é aquecido e removido de cerca de 2 a 4 centímetros da superfície do pavimento anterior, e em seguida, é remisturado com adição de uma nova mistura a quente ou apenas de novo ligante e reaplicado. Dentre as possibilidades de execução é possível recompor apenas a camada escarificada ou adicionar profundidade, com a construção de camada de reforço, de revestimento e/ou de micro revestimento. Quanto aos equipamentos, pode-se utilizar um trem de remixagem de passagem única ou repavimentadores de várias passagens, a critério dos custos e disponibilidade.

V) *Full depth reclamation (FDR)* – a recuperação da profundidade total do pavimento é o método de reciclagem em que toda a seção do pavimento e, ainda, parte do material subjacente são tratados para compor uma base estabilizada para um novo pavimento. Neste são empregados aditivos, tais como emulsões asfálticas, cal hidratada, cimento Portland, cinzas volantes, entre outros, além de novos agregados, caso necessário. A FHWA (2017) aponta que, a principal vantagem desta técnica de reciclagem, é a melhora significativa da estrutura do pavimento sem a alteração da geometria e com baixo custo de

execução. Os equipamentos empregados no método são de escarificação robustos, tais como rolo pé de carneiro, motoniveladora com dentes escarificadores, moinhos de martelo autopropelidos, misturadores rotativos e escavadeiras (Figura 4).

**Figura 4** - Remoção de pavimento em total profundidade



**Fonte:** West, 2015

A forma de remoção do pavimento, nos casos apresentados, é fator determinante para a destinação do resíduo. O RAP pode ser obtido a partir da demolição de um pavimento (conforme previsto na norma DNIT 085/2006-ES), das sobras e refugos de usinas e das operações de fresagem de pavimentos deteriorados, sendo esta última a mais comum (SUZUKI, 2019).

Até meados nos anos 1970, o processo de reciclagem de pavimentos consistia apenas na escarificação do pavimento e seu reprocessamento, o que gerava grandes blocos, que dificultavam a homogeneização com a nova mistura. Apenas na segunda metade dessa década a máquina fresadora foi desenvolvida e incorporada aos serviços de remoção de pavimentos, permitindo a obtenção de materiais soltos, em granulometria compatível com a adição em novas misturas (GENNESSAUX, 2015).

Para Bonfim (2007) a operação de fresagem é a técnica de desbaste ou corte de materiais por meio de uma engrenagem motora, constituída de cortador giratório em ângulos diversos, num movimento giratório contínuo. O mesmo autor indica que a fresagem pode ser realizada à frio ou à quente: no primeiro caso há o corte e a quebra dos grãos de agregados pelo impacto e atrito durante a operação e, na fresagem à quente, o pré-aquecimento do revestimento reduz a resistência ao desgaste e, desta forma, a granulometria é pouco afetada.

Antunes *et al.* (2019) apontam como vantagem da fresagem o fato de evitar sobrecargas não programadas em subleitos e em estruturas de pontes, a boa aderência entre a camada fresada e a camada subjacente devido à rugosidade do procedimento e a

eficiência das máquinas na remoção da superfície pretendida e; como desvantagens tem-se o elevado consumo energético dos equipamentos e a geração de muitos finos.

Quanto à profundidade de fresagem, Bonfim (2007) afirma que a determinação dela depende do objetivo da operação (melhoria da rugosidade do revestimento, recuperação de parte ou de todo o revestimento) e as classifica como superficial, rasa ou profunda. A rugosidade resultante na pista fresada pode ser, então, padrão, fina ou microfresada, a depender do tipo de cilindro e da quantidade e forma dos dentes de desgaste.

Os volumes de pavimento fresado são comumente estocados em pilhas ao ar livre, quando não imediatamente utilizados (Figura 5). Este armazenamento inadequado contribui para a heterogeneidade do RAP e para formação de uma espessa camada de poeira firmemente aderida ao agregado RAP, além da camada de poeira superficial solta que pode ser facilmente removida por peneiramento ou lavagem (SINGH *et al.*, 2017).

**Figura 5** - Pilha de RAP de múltiplas origens contaminada por sujeira (círculo em vermelho)



**Fonte:** West, 2015

O acondicionamento inadequado do material fresado acarreta contaminação deste por poeira, materiais particulados leves, matéria orgânica etc., acúmulo de umidade e perda de frações da granulometria de material, principalmente os materiais mais finos. Estes materiais apresentam superfície específica maior que a das frações mais grossas do agregado, o que resulta numa maior concentração de ligante asfáltico nesta fração fina, tornando-a de maior interesse nos processos de reciclagem dos pavimentos, uma vez que esse ligante pode ser remobilizado e aproveitado.

West (2015) afirma que uma das maiores e mais importantes decisões no desenvolvimento de misturas asfálticas com RAP é a união ou separação de materiais de origens diversas. O autor esclarece que utilizar o material proveniente apenas de uma fonte

pode produzir misturas mais eficientes, no entanto, torna a dosagem restritiva e financeiramente onerosa. Quando utilizados materiais de diferentes origens é recomendável que haja o beneficiamento – homogeneização, britagem, peneiramento e separação de frações - para reduzir a variabilidade, e que a remoção do RAP da pilha seja feita lateralmente, de forma a contemplar todas as camadas depositadas em diferentes momentos.

O aproveitamento do RAP tem crescido em todo o mundo. Além das misturas convencionais à quente e a frio (produzidas com a mistura de RAP, agregados e emulsões asfálticas), as misturas mornas podem viabilizar a inclusão de maiores percentuais de RAP, em processos de usinagem cerca de 30°C a 40°C inferiores às misturas à quente (GENNESSAUSX, 2015). Para Pleşcan e Pleşcan (2015) o uso de RAP em misturas asfálticas recicladas pode resultar em pavimentos com desempenho estrutural similar ou até melhor que àqueles utilizando misturas à quente com agregados virgens, desde que se conheça e considere as propriedades e variações das misturas recicladas.

## **2.2 Misturas asfálticas recicladas à quente**

A natureza termoviscoelástica das misturas asfálticas indica que a forma mais eficiente de aproveitar o RAP é aquecendo-o. Diversos autores estudaram as misturas recicladas à quente e verificaram a necessidade de altas temperaturas nestas misturas para a mobilização do ligante presente no RAP e efetiva mistura de ligantes. Pode-se mencionar estudos de Shu *et al.* (2008), Shirodkar *et al.* (2011), Al-Qadi *et al.* (2012), Reyes-Ortiz *et al.* (2012), Islam *et al.* (2014), West (2015), Gennessaux (2015), Ma *et al.* (2016), Arámbula-Mercado *et al.* (2018), Luzzi (2019), Suzuki (2019), Sabouri (2020), dentre outros.

No Brasil, a norma DNIT 033/2021 – ES especifica os procedimentos a serem adotados na execução de camada de pavimento com mistura asfáltica reciclada produzida em usina a quente e estabelece as especificações dos materiais, equipamentos, condicionantes ambientais, controle de qualidade e critérios de conformidade dos serviços.

Dentre os desafios da implementação da reciclagem à quente destacam-se a definição do teor máximo de RAP possível, a manutenção das temperaturas de usinagem, a variabilidade do material fresado, a adaptação do procedimento de dosagem Superpave e o entendimento do processo de mistura (*blending activity*) entre o ligante virgem e o ligante envelhecido do RAP (ISLAM *et al.*, 2014; TAPSOBA *et al.*, 2014; LO PRESTI *et al.*, 2019).

Na reciclagem a quente, em geral, o teor de RAP a ser adicionado na mistura é definido pelo aparato da usina, pela capacidade calorífica do equipamento e pela forma de aquecimento utilizada. As usinas gravimétricas e volumétricas podem receber tanto o RAP a frio e úmido, quanto quente e seco.

O uso do material fresado requer uma série de avaliações complementares, além das comumente utilizadas em misturas asfálticas quentes. Segundo Luzzi (2019) o

desenvolvimento de uma mistura asfáltica reciclada à quente requer cuidados no momento da incorporação do RAP, pois a incidência da temperatura exigida pelo fresado pode influenciar negativamente nas características da mistura.

O teor de umidade do RAP é um importante aspecto na execução da mistura a quente em usina pois, quanto maior a umidade, maior o gasto energético durante o processo de secagem e, em dadas circunstâncias, a capacidade do equipamento de atingir a temperatura necessária fica comprometida (WEST, 2015). A Tabela 1 apresenta uma estimativa das temperaturas necessárias para aquecer misturas com percentuais distintos de RAP, numa variação de umidade de 0 a 5% e a partir dela, é possível inferir que maiores teores de RAP exigem um melhor acondicionamento, do contrário, a usinagem se torna inexecutável.

**Tabela 1** - Temperatura de usinagem necessária para aquecer os agregados virgens com base na umidade do RAP

Teor RAP	Umidade RAP (%)	Temperatura final da mistura reciclada (°C)				
		104	116	127	138	165
10%	0	121	138	152	163	198
	1	127	143	154	168	202
	2	132	146	157	171	202
	3	138	149	163	174	204
	4	141	152	166	177	207
	5	143	157	168	182	213
20%	0	138	154	168	182	219
	1	146	160	177	191	228
	2	154	168	182	196	230
	3	163	177	191	204	238
	4	171	185	199	213	247
	5	179	193	207	221	255
30%	0	157	174	191	207	248
	1	168	185	202	218	259
	2	182	199	216	232	273
	3	196	213	229	246	287
	4	210	227	243	260	301
	5	224	241	257	274	315
40%	0	179	199	218	238	284
	1	199	218	238	257	303
	2	218	238	257	277	323
	3	243	260	279	299	343
	4	260	279	299	321	368
	5	285	302	321	341	385
50%	0	210	235	257	282	338
	1	241	268	288	310	365
	2	271	293	318	343	399
	3	302	327	349	374	430
	4	338	360	379	404	454
	5	366	391	413	438	494

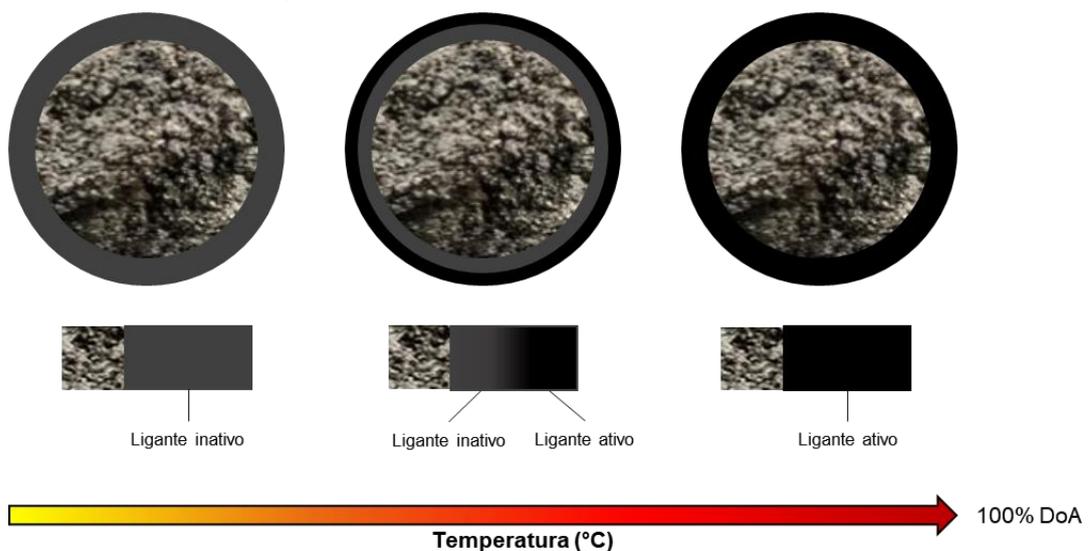
Fonte: Adaptado West, 2015

Elevadas temperaturas também são necessárias para desprender o ligante que envolve o agregado do RAP e, neste sentido, existem três condições a serem consideradas: (i) nenhum desprendimento; (ii) desprendimento parcial e (iii) desprendimento total. No cenário (i), em que se considera nenhum desprendimento, o RAP cumpre a função apenas de agregado, contribuindo na estabilidade da mistura, e é denominado *Black Rock* (BR). Considera-se que o ligante que envolve o agregado do RAP não interage com o ligante virgem e, no processo de dosagem, o diâmetro do grão utilizado para compor a mistura é aquele obtido do peneiramento do material sem qualquer beneficiamento (ZAUMANIS e MALLICK, 2015; ZAPPE, 2020).

No segundo e mais complexo cenário, ocorre o que se chama na literatura de *partial blending* (PB) ou, em tradução livre, mistura parcial. De acordo com Shirodkar *et al.* (2011) é provável que todas as misturas trabalhem com mistura parcial de ligantes, no entanto, quantificar o ligante do RAP que efetivamente se mistura ao ligante virgem é um processo difícil.

Para mensurar a quantidade de ligante do RAP reativada e a capacidade de mistura entre os ligantes, dois parâmetros são utilizados: o DoA (*Degree of Binder Activity*) e o DoB, (*Degree of Blending*). O DoA representa a quantidade mínima de ligante envelhecido disponibilizada pelo RAP e serve, primordialmente, para classificá-lo e quantificar o ligante novo a ser adicionado de forma mais precisa. Este parâmetro é intrínseco do tipo de RAP avaliado, no entanto, a temperatura de usinagem parece ser um importante fator que influencia este parâmetro (LO PRESTI *et al.*, 2019). A Figura 6 demonstra a evolução da mobilização do ligante com o aumento da temperatura.

**Figura 6** - Mobilização do ligante envelhecido durante processo de aquecimento do RAP



De acordo com Lo Presti *et al.* (2019) o parâmetro DoB, pode ser definido como a fração de ligante envelhecido do RAP que efetivamente se mistura ao ligante virgem e representa um indicador que descreve qual a contribuição deste ligante envelhecido para as propriedades finais da mistura de ligantes e de agente de reciclagem. Segundo Navaro *et al.* (2012) este parâmetro pode ser controlado, de acordo com a relação tempo-temperatura no processo de mistura: quanto maior a temperatura utilizada, menor é o tempo de mistura necessário, e a relação contrária também é verdadeira, adotando o mesmo DoB alvo.

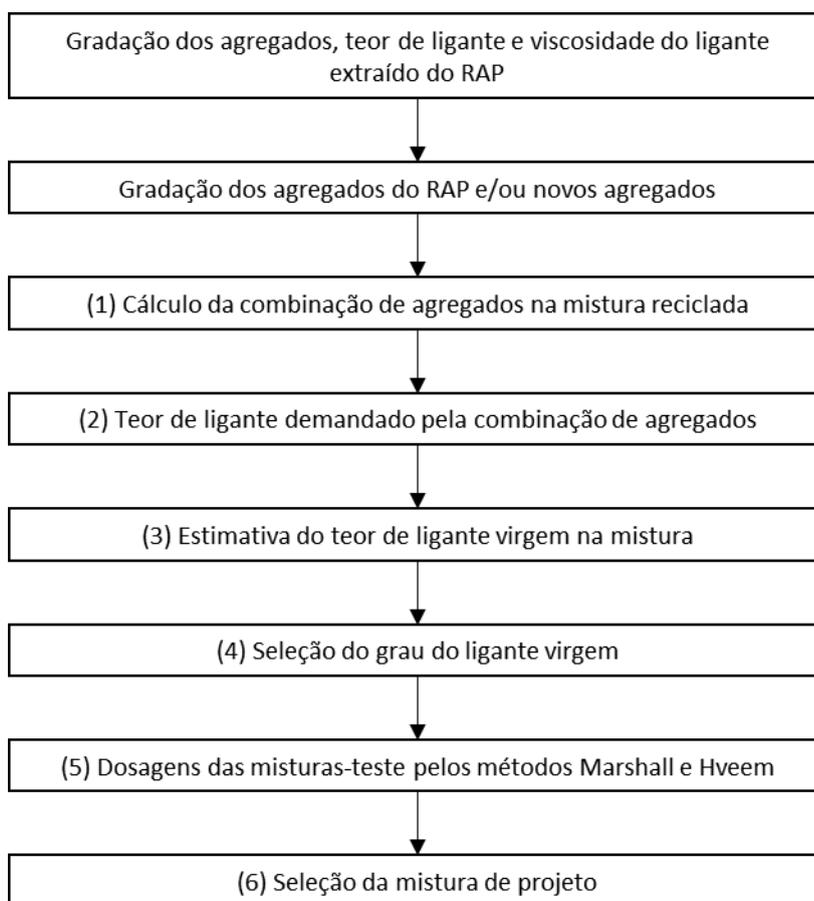
O cenário (iii) é aquele em que se considera o *full blending* ou, em tradução literal, mistura completa. Kriz *et al.* (2014) afirmam que é comum que as especificações para uso de fresado em misturas asfálticas considerem o cenário de completo desprendimento e mistura entre os ligantes remanescente e novo. Entretanto, é importante frisar que este é um processo complexo e não acontece instantaneamente. Para Coffey *et al.* (2013) assumir o *full blending* durante a dosagem pode onerar significativamente os custos da execução da mistura, mas não comprometerá o desempenho do pavimento.

### **2.3 Dosagem de misturas asfálticas recicladas a quente**

Em uma cooperação do *North Central Superpave Center* e do *Asphalt Institute*, o conselho de pesquisa da *Transportation Research Board* publicou uma série de manuais técnicos que tratam do uso do RAP em misturas asfálticas quentes desenvolvidas pelo método Superpave, no NCHRP Project 9-12, intitulado *Incorporation of Reclaimed Asphalt Pavement in Superpave System*. Este produto é uma evolução do guia MS-20, publicado pelo *Asphalt Institute*, em 1986, cuja dosagem foi desenvolvida para os métodos Marshall e Hveem, mas que foi precursora na determinação das etapas básicas de desenvolvimento de uma dosagem com RAP (Figura 7).

Os autores instruem que os agregados do RAP devem ser misturados com novos agregados, necessários para a obtenção de uma distribuição granulométrica combinada que atenda aos requisitos do órgão rodoviário em questão. Uma vez que os percentuais de cada material sejam determinados, o consumo total de ligante virgem é calculado e, então, o tipo do ligante virgem é selecionado (mais agente de reciclagem, se necessário) para restaurar o asfalto envelhecido até que o ligante final atenda aos requisitos funcionais das especificações dos órgãos rodoviários asfalto, ao mesmo tempo em que atende à demanda de asfalto da mistura (ASPHALT INSTITUTE, 1986).

**Figura 7** - Fluxograma de dosagem de misturas recicladas pelo método Marshall ou Hveem



**Fonte:** Adaptado Asphalt Institute, 1986

Para McDaniel e Anderson (2001) isto se torna possível ao extrair, recuperar e testar as propriedades do ligante do RAP. No entanto, este processo se faz necessário apenas em casos específicos, pois misturas com teores entre 10 e 20% de RAP não necessitam deste estudo complementar, visto que não há quantidade de ligante envelhecido e endurecido suficiente para alterar as propriedades do ligante final. A norma AASHTO M 323 (2017) convencionou que este percentual – que define misturas com baixo teor de RAP – seja de 15%.

Em misturas com maiores teores de RAP, os efeitos negativos do ligante envelhecido e oxidado nas propriedades reológicas do ligante final da mistura precisam ser corrigidos. Para isso, a adição de agentes rejuvenescedores tem sido amplamente estudada e fornece boa capacidade de restauração da vida útil da mistura asfáltica nas pesquisas de Karlsson e Isacsson (2006), Im *et al.* (2014), Zaumanis *et al.* (2014), Zaumanis *et al.* (2018), Zhang *et al.* (2019) e Hussein *et al.* (2020). Esses agentes têm a função básica de “amolecer” o ligante rígido, contribuindo para o aumento da resistência à deformação permanente e da vida de fadiga e favorecendo a ativação e interação do ligante do RAP (SUZUKI, 2019).

Além dos agentes comerciais, o uso de ligantes virgens mais moles é comum na busca da melhoria das propriedades da mistura reciclada. McDaniel e Anderson (2001) apontam que

é possível selecionar o ligante com um grau de desempenho (PG) inferior ao da mistura desejada, quando teores intermediários de RAP são adicionados, sem que seja necessário avaliar reologicamente a mistura de ligantes. Assim, é possível dosar de forma rápida e eficiente, como assume a norma AASHTO M 323 (2017), misturas com teores de RAP entre 15% e 25%.

A mesma norma define que, caso sejam adicionados teores de RAP acima de 25%, cada mistura seja avaliada individualmente, utilizando um gráfico de interação de ligantes denominado *blending chart*. Este gráfico relaciona as propriedades reológicas do ligante virgem e do ligante envelhecido e pode ser utilizado:

- (i) para determinar o teor de ligante de RAP máximo a ser utilizado, quando se conhece o PG do ligante virgem e o da mistura final são previamente especificados;
- (ii) para determinar o grau do ligante virgem quando o PG da mistura e o teor de adição de RAP são previamente especificados;
- (iii) para determinar o grau da mistura, quando o grau do ligante virgem e o teor de adição de RAP são previamente especificados.

Em todos os casos, a informação do PG do ligante do RAP é essencial e, para obtê-la, é preciso extrair e recuperar de forma a preservar as propriedades originais. Esta extração pode ser feita por remoção com solvente em centrífuga, por refluxo, pelo método do vácuo, extração SHRP, micro extração, extração automática, medidor de teor de asfalto nuclear (NAC), método do picnômetro e método de ignição. No entanto, apenas a remoção por solvente permite a sua recuperação. As principais preocupações acerca deste processo são que a variedade de solventes pode afetar o conteúdo de ligante, alterando a sua rigidez, e que o aquecimento para a remoção do solvente promova o superaquecimento da mistura (MIKHAILENKO *et al.*, 2020).

A forma mais comum e difundida para a extração com solvente é o uso da centrífuga. O método é descrito pelas normas ASTM D 2172 e AASHTO T 164, e mencionado na norma que descreve a recuperação do asfalto em solução pelo método de Abson (ASTM D 1856 e AASHTO T170), pois para Sondag *et al.* (2002), a centrifugação com solvente é mais eficiente e segura do que empregar temperatura na remoção do ligante do agregado. Além do método de Abson, os métodos do Rotavapor® e SHRP modificado (AASHTO TP2 modificado) são os mais indicados para a recuperação do ligante em mistura com solvente.

Uma vez conhecido o PG do ligante recuperado (temperatura crítica superior do ligante do RAP), a temperatura crítica superior do ligante virgem ou da mistura pode ser determinada tomando por base o parâmetro %RAP, que indica o teor de RAP a ser adicionado à mistura, como apresenta a Equação 1 (WEST *et al.*, 2013) e, dessa forma, o ligante virgem que se adequa a esta temperatura poderá ser estabelecido.

$$T_{virgem} = \frac{T_{mistura} - (\%RAP \times T_{RAP})}{(1 - \%RAP)} \quad (\text{equação 1})$$

Onde,

$T_{virgem}$  é a temperatura crítica do ligante virgem;

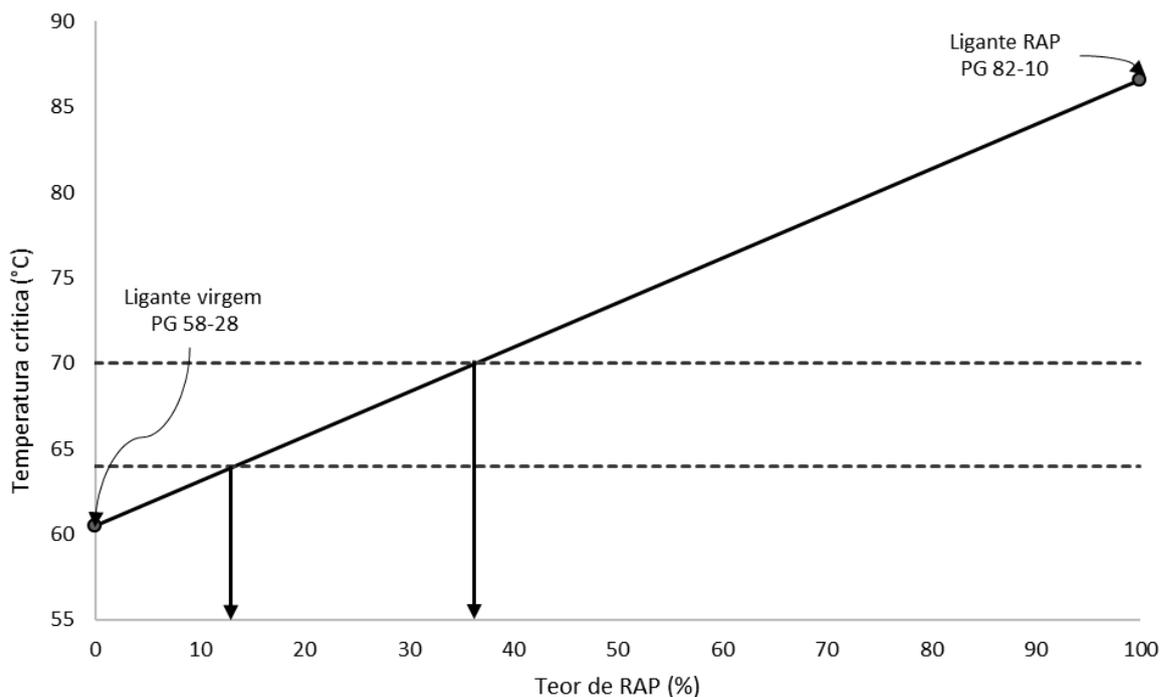
$T_{RAP}$  é a temperatura crítica do ligante do RAP;

$T_{mistura}$  é a temperatura crítica da mistura de ligantes.

Embora a classificação PG não seja utilizada no Brasil, Suzuki (2019) aponta que a variação climática condiciona a escolha do ligante virgem à avaliação regional. Desta forma, os parâmetros de temperaturas intermediária e baixa, determinados a partir dos valores de  $m$  value e BBR *stiffness*, também devem ser aplicados à Equação 1 quando necessário.

McDaniel e Anderson (2001) apresentam um processo de dosagem no qual há o interesse em incorporar a maior quantidade possível de um RAP com PG 82-10, em uma usina que opera com ligante virgem de PG 58-28, para obter uma mistura com PG final entre 64-28 e 70-28. As temperaturas altas críticas, neste caso, são 60,5°C e 86,6°C, para o ligante virgem e o recuperado, respectivamente e o *blending chart* resultante é aquele apresentado na Figura 8.

**Figura 8** - Blending chart para determinação do teor de RAP admissível em uma mistura reciclada



A observação da Figura 10 e o cálculo do teor de RAP de acordo com a Equação 2 indicam que seria possível inserir entre 13,4% e 36,5% de RAP nesta mistura (WEST *et al.*, 2013).

$$\%RAP = \frac{T_{mistura} - T_{virgem}}{T_{RAP} - T_{virgem}} \quad (\text{equação 2})$$

Hajj *et al.* (2012) afirmam que o *blending chart* é um mecanismo baseado na hipótese que o *full blending* acontece sempre e seria inválido considerá-lo, caso os ligantes novo e envelhecido não interajam adequadamente, mas, é preciso entender que quanto maior o teor de RAP desejado, maior a demanda energética para a efetiva mistura entre seus ligantes.

Definidos o teor de RAP e o tipo de ligante virgem, a dosagem segue o procedimento Superpave padrão, com a necessidade de avaliação dos agregados, seleção granulométrica e compactação para determinação do teor de ligante virgem adicional, cujo valor é descontado do teor de ligante remanescente do RAP a ser ativado.

A massa específica da mistura dos agregados, no entanto, depende da combinação de agregados e da combinação de ligantes. A determinação da massa específica do RAP ( $G_{mm(RAP)}$ ) é feita considerando-o como mistura independente, pelo *Rice Test*, normatizado pela AASHTO T 209 para, então, permitir a determinação da massa específica efetiva dos agregados do RAP ( $G_{se(RAP)}$ ), mediante emprego da Equação 3 (ASPHALT INSTITUTE, 2014).

$$G_{se(RAP)} = \frac{100 - P_{b(RAP)}}{\frac{100}{G_{mm(RAP)}} - \frac{P_{b(RAP)}}{G_{b(RAP)}}} \quad (\text{equação 3})$$

Onde,

$P_{b(RAP)}$  é o teor de ligante do RAP

$G_{b(RAP)}$  é a massa específica do ligante do RAP

Comumente adota-se o valor de 1,04 para a massa específica do ligante do RAP, dada a consideração que o envelhecimento e a perda de frações leves (aumento dos asfaltemos) contribuem para o aumento da massa específica. Outro valor a ser assumido é o de absorção de ligante pelo agregado do RAP que, com base na repetição de ensaios e dosagens, foi convencionado 1,2% (ASPHALT INSTITUTE, 2014). Portanto, a massa específica aparente dos agregados do RAP  $G_{sb(RAP)}$  pode ser calculada utilizando a Equação 4.

$$G_{sb(RAP)} = \frac{G_{se(RAP)}}{\frac{P_{ba(RAP)} \times G_{se(RAP)}}{100 \times G_{b(RAP)}} + 1} \quad (\text{equação 4})$$

Onde,

$G_{se(RAP)}$  é a massa específica dos agregados do RAP

$P_{ba(RAP)}$  é a absorção do agregado do RAP

$G_{b(RAP)}$  é a massa específica do ligante do RAP

O procedimento de dosagem segue com a determinação do tipo do ligante virgem, de acordo com as condições climáticas do local de implantação do pavimento e com as características reológicas do ligante do RAP e dos ligantes virgens disponíveis. A seleção granulométrica considera a distribuição granulométrica do RAP, no teor determinado, e a quantidade complementar de agregados virgens para atender os requisitos da dosagem Superpave e das especificações dos órgãos rodoviários competentes. A Figura 9 apresenta um fluxograma que resume o procedimento de dosagem Superpave estabelecido pelo documento NCHRP Report 452 (MCDANIEL e ANDERSON, 2001).

**Figura 9 - Fluxograma de dosagem Superpave para misturas com RAP**



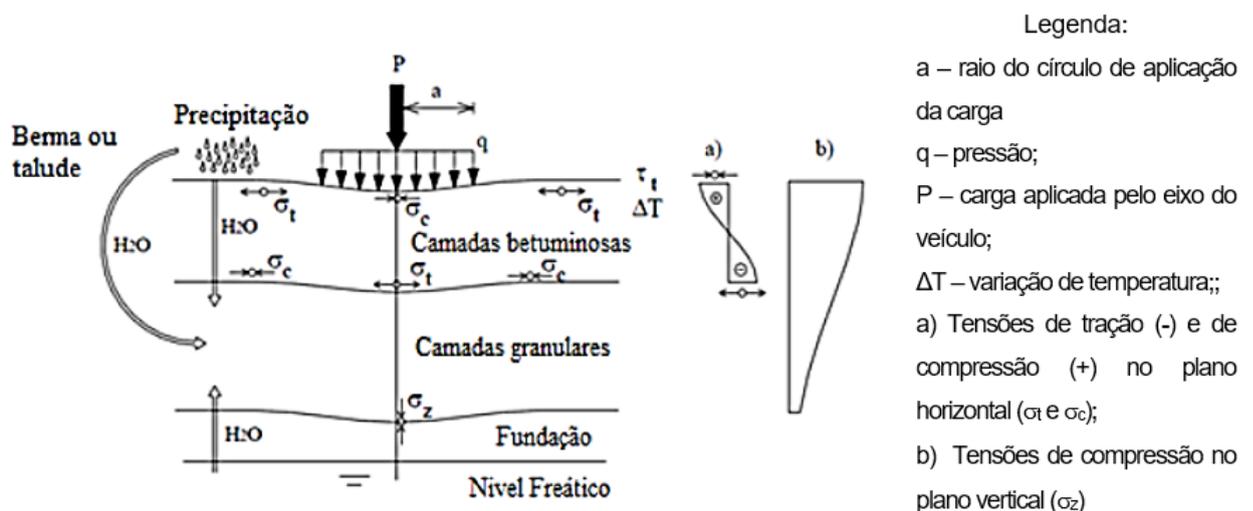
Fonte: Adaptado de McDaniel e Anderson, 2001

## 2.4 Propriedades mecânicas de misturas asfálticas recicladas a quente

A mecânica de pavimentos se dedica a calcular as tensões e deformações solicitantes, a compreender os mecanismos de deterioração tais como fadiga, resistência e deformabilidade de misturas asfálticas para, então, dimensionar uma estrutura capaz de resistir aos diversos esforços a que se submetem (MEDINA e MOTTA, 2015).

O estado de tensões em um pavimento resulta da combinação das ações geradas durante a aplicação de uma carga de tráfego, das ações de precipitação e intemperismo e da tensão vertical gerada pela elevação sazonal do nível freático, como ilustra a Figura 10 (FRANCISO, 2012). Segundo Fontes (2009) estas tensões ainda variam e evoluem, a depender das características dos materiais empregados na estrutura do pavimento.

**Figura 10** - Estado de tensões nas camadas de um pavimento devido às ações do tráfego, da precipitação e do intemperismo

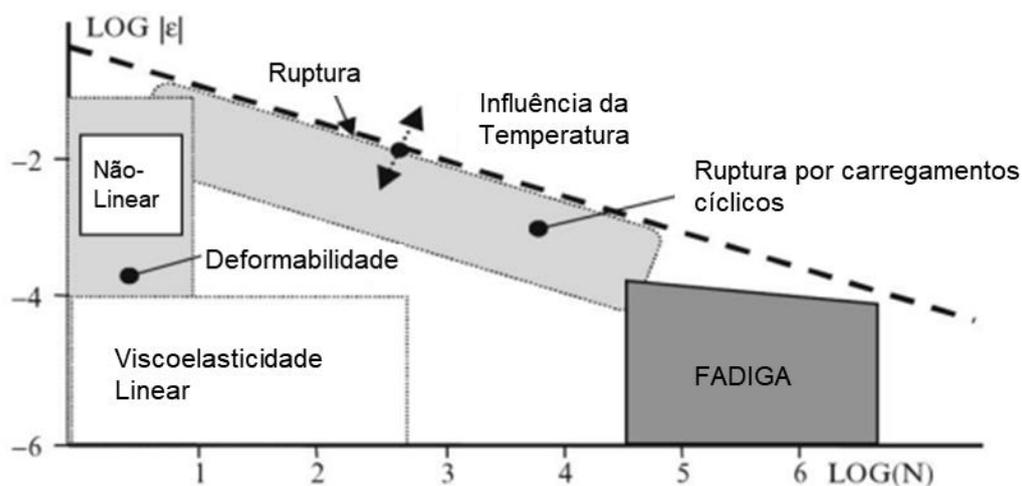


**Fonte:** Adaptado de Minhoto, 2005 *apud* Francisco, 2012

Mangiafico (2014) cita que, macroscopicamente, a mistura asfáltica pode ser considerada contínua, homogênea e isotrópica, influenciada pela temperatura, pela amplitude da carga e pelo número de ciclos aplicados. Portanto, o comportamento mecânico típico de uma mistura, em função da deformação e do número de ciclos de carga, é semelhante ao que se observa na Figura 11, que ilustra que, em pequenas deformações e com reduzido número de ciclos, o comportamento do revestimento é meramente viscoelástico linear.

Ao se reduzir o número de ciclos ocorre aumento na magnitude da carga que perturba a propagação da deformação e, conseqüentemente, o comportamento mecânico deixa de ser linearmente previsível. O aumento do tráfego implica no acúmulo de pequenas deformações, que contribuem para o afundamento trilha de roda (ATR) e, enfim, para grandes volumes de carga, o fenômeno da fadiga é preponderante na ruptura e falha do pavimento.

**Figura 11** - Domínios típicos do comportamento de misturas asfálticas convencionais



Fonte: Adaptado Di Benedetto *et al.*, 2013

O mecanismo de desempenho mecânico depende da variação de um parâmetro importante: a rigidez da mistura. Em misturas asfálticas recicladas, Valdés *et al.* (2011) observaram que quanto maior o teor de RAP incorporado, maior a rigidez, o que melhora a resistência à deformação permanente, mas tende a reduzir a resistência da mistura ao trincamento por fadiga.

Este aumento de rigidez da mistura está relacionado à rigidez do próprio ligante envelhecido do RAP. A estrutura do asfalto é coloidal, composta de asfaltenos insolúveis e polares dispersos em maltenos solúveis que, por sua vez, são compostos de resinas, aromáticos e saturados. O fenômeno de envelhecimento a longo prazo envolve a conversão dos aromáticos do asfalto em resinas e das resinas em asfaltenos, cuja rigidez supera a dos maltenos, assim como a sua concentração ao longo do tempo (NCAT, 2014).

#### 2.4.1 Módulo de resiliência

Huang (1993) cita que, embora as misturas asfálticas não possuam um comportamento puramente elástico, a aplicação de pequenas cargas repetidas vezes gera deformações completamente recuperáveis e, neste domínio, pode ser considerada elástica. Este comportamento pode ser observado na relação entre deformação e ciclos de carga.

O conceito de deformação perfeitamente recuperável é incorporado ao termo “resiliência”, utilizado em pavimentação pela primeira vez por Hveem (1995). Resiliência é a energia potencial de deformação em um corpo deformado elasticamente, que retorna ao seu estado inicial quando cessadas as cargas e, matematicamente, seu módulo assemelha-se ao módulo de elasticidade de corpos elásticos: a relação entre a tensão aplicada ( $\sigma$ ) e a deformação correspondente ( $\epsilon$ ), conforme apresenta a Equação 5.

$$MR = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (\text{equação 5})$$

Em misturas asfálticas, a determinação do módulo de resiliência pode ser feita sob a aplicação de uma carga repetida no plano diametral de um corpo de prova cilíndrico, com a medição do deslocamento no plano axial de acordo com a Equação 6 que determina o valor de módulo de resiliência (DNIT ME 135/2018):

$$MR = \frac{P}{|\Delta H|t} (0,2692 + 0,9976\mu) \quad (\text{equação 6})$$

Onde,

P é a carga cíclica aplicada;

$\Delta H$  é o deslocamento horizontal medido

t é a espessura (altura) do corpo de prova

$\mu$  é o coeficiente de Poisson (adotado comumente como 0,3)

Bernucci *et al.* (2010) afirmam que embora permita a determinação da rigidez nas misturas asfálticas considerando o comportamento elástico linear baseado na Lei de Hooke, o MR não representa um parâmetro puramente elástico, uma vez que seu cálculo está associado a um pulso e à deformação viscoelástica, contabilizada como elástica.

O uso de RAP confere às misturas asfálticas recicladas uma rigidez inicial mais elevada em relação à rigidez uma mistura nova constituída apenas de materiais virgens. Os estudos de Sondag *et al.* (2002) e West *et al.* (2012) apontam para o aumento do módulo de resiliência à medida em que se aumenta o teor de material fresado sendo que, para West *et al.* (2012), que monitorou trechos experimentais com pavimentos com 50% de RAP em mistura quente e morna, os módulos foram obtidos a partir de retroanálise de levantamento FWD. A mesma observação foi conclusão dos estudos de Centofante (2016), Bohn (2017), Luzzi (2019) e Suzuki (2019).

Sondag *et al.* (2002) e West *et al.* (2012) também indicaram uma forte influência da temperatura de operação do pavimento. Os módulos de resiliência e dinâmicos obtidos por retroanálise de um levantamento deflectométrico por FWD (*Falling Weight Deflectometer*) variaram de acordo com a profundidade da camada e da temperatura do pavimento. Os módulos foram os mais elevados dentre os observados nas seções com altos teores de RAP.

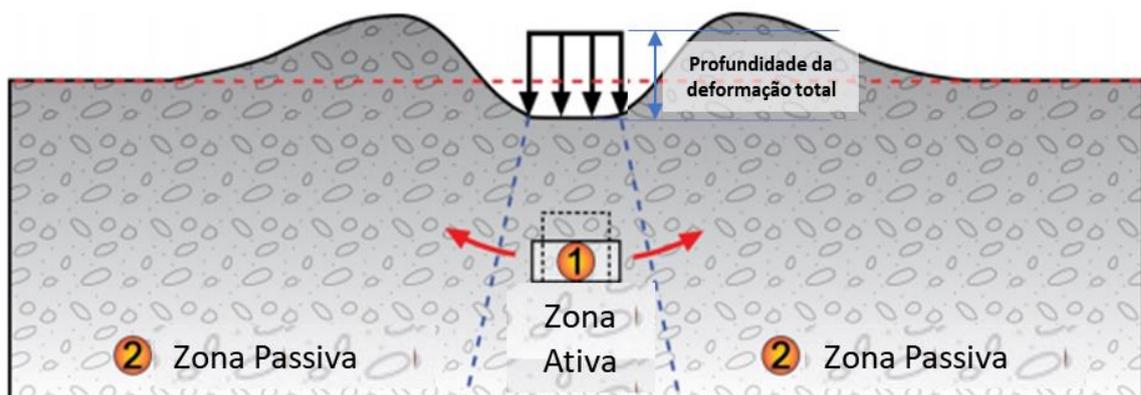
O estudo de Zappe (2020) não observou tendência de comportamento clara entre o módulo de resiliência e o teor de RAP, pois os teores estudados (10, 20 e 30%) foram muito baixos ou muito próximos, o que indica pequena sensibilidade com a variação de adição do fresado (apenas notável entre baixo, intermediário e alto teor).

## 2.4.2 Deformação Permanente

Borges (2014) definiu a deformação permanente em pavimentação como a depressão longitudinal que aumenta com as cargas repetidas impostas pelo tráfego de veículos que acontece, segundo Nascimento *et al.* (2008) devido à densificação das camadas (por acomodação ou pelo cisalhamento), ou devido a algum problema no projeto da mistura asfáltica.

Guimarães (2009) considera que a deformação permanente total de um pavimento é função das deformações individuais de cada camada (subleito, bases e revestimento). De acordo com Choi (2013), na camada de revestimento, individualmente, a área inferior à trilha de roda está sob tensão de compressão na direção vertical durante a aplicação da carga pela roda do veículo que trafega. A este local, dá-se o nome de zona ativa e, às suas laterais, zonas passivas: massas solevadas pela zona ativa, que respondem com o aumento da tensão de confinamento (Figura 12).

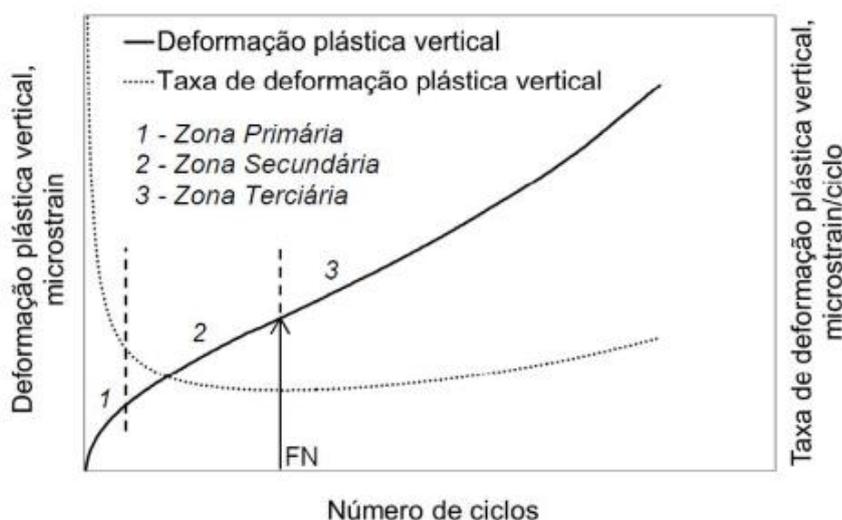
**Figura 12** - Diagrama esquemático do mecanismo de desenvolvimento da deformação permanente



**Fonte:** Adaptado de Choi, 2013

O ensaio uniaxial de carga repetida tem se consolidado na determinação da resistência à deformação permanente, utilizando um parâmetro denominado *Flow Number*. Este número, é definido como o número de repetições durante o início de uma deformação puramente plástica por cisalhamento, e marca a zona terciária de deformação (Figura 13). (ZHANG *et al.*, 2021).

**Figura 13** - Regiões da curva de deformação plástica em ensaio de *Flow Number*



Fonte: ANBT NBR 16505, 2016

O *Flow Number* compõe um importante critério de classificação de misturas asfálticas em métodos mecânicos-empíricos de dimensionamento de pavimentos. O método MeDiNa, por exemplo, utiliza a divisão por classes de misturas definida por Nascimento (2004), numa tentativa de se prevenir a deformação permanente no revestimento, pois no MeDiNa é desconsiderada a potencial parcela de deformação permanente da camada asfáltica no cálculo do afundamento trilha de roda, desde que as misturas se enquadrem nas classes de desempenho apresentadas na Tabela 2.

**Tabela 2** - Classes das misturas asfálticas determinadas em virtude do *Flow Number*

Classe	Flow Number (FN)	N Recomendado Condições Normais	N Recomendado Condições Severas
1	FN ≤ 100 ciclos	$N < 1 \times 10^6$	Não recomendado
2	100 ciclos ≤ FN ≤ 300 ciclos	$1 \times 10^6 \leq N < 1 \times 10^7$	$N < 1 \times 10^6$
3	300 ciclos ≤ FN ≤ 750 ciclos	$1 \times 10^7 \leq N < 1 \times 10^8$	$1 \times 10^6 \leq N < 1 \times 10^7$
4	750 ciclos ≤ FN ≤ 2000 ciclos	$N \geq 1 \times 10^8$	$1 \times 10^7 \leq N < 1 \times 10^8$
5	FN ≥ 2000 ciclos	-	$N \geq 1 \times 10^8$

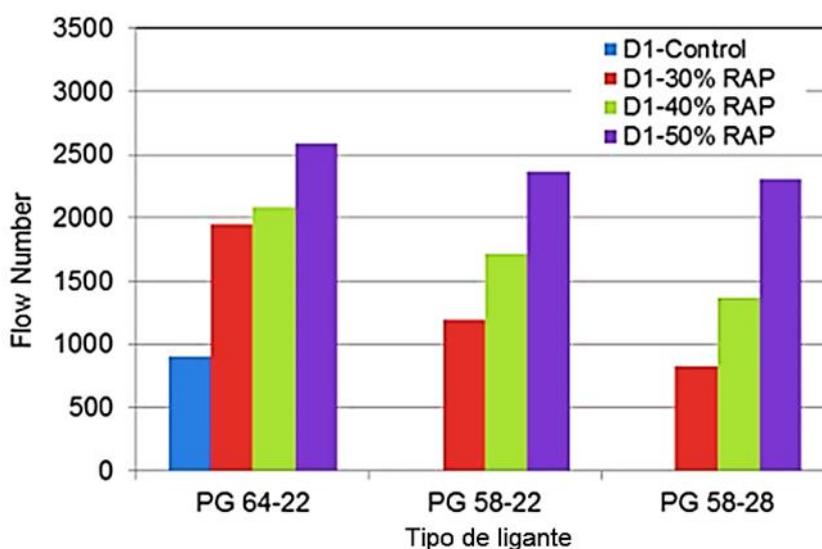
Fonte: Adaptado Nascimento, 2014

Os estudos conduzidos por Al-Qadi *et al.* (2012), West *et al.* (2012), Gennesaux (2015), Centofante (2016) e Bohn (2017) buscaram avaliar a deformação permanente de misturas recicladas. Centofante (2016) e Bohn (2017) demonstraram o ganho de ciclos de *Flow Number* até a deformação permanente à medida em que se aumentava o teor de RAP, o que demonstra que a rigidez do ligante envelhecido que envolve o esqueleto pétreo reduz o acúmulo de deformações.

No estudo de West *et al.* (2012) a mistura de referência (sem adição de RAP) foi mais resistente à deformação permanente do que a mistura reciclada com 50% de RAP, em laboratório. No entanto, a avaliação no trecho experimental demonstrou a situação inversa: o afundamento trilha de roda foi maior nos trechos de mistura convencional e menor nos trechos com pavimento reciclado.

O afundamento trilha de roda (ATR) é verificado, na prática, por meio da avaliação objetiva de pavimentos e, em laboratório, simulada pelo método *Wheel Tracking*. Os estudos de Al-Qadi *et al.* (2012) utilizaram esta metodologia de laboratório e demonstraram que há uma redução do potencial de afundamento de trilha de roda, conforme aumenta o teor de RAP, como pode ser observado na Figura 14. Da mesma forma, Gennessaux (2015) aplicou a metodologia *Wheel Tracking* com misturas recicladas mornas e quentes, envelhecidas a curto e longo prazos. A autora afirma que o material envelhecido é mais resistente à deformação permanente e que tanto o uso da técnica morna, quanto o uso de RAP, por si só, conduzem a um melhor comportamento em termos de características de afundamento.

Figura 14 - Flow Number das misturas estudadas por Al-Qadi *et al.* (2012)



Fonte: Adaptado de Al-Qadi *et al.*, 2012

Izaks *et al.* (2015) realizaram testes *Wheel Tracking* em misturas com RAP e observaram que, quanto maior o teor de RAP, aliado à menor quantidade de ligante total, maior deve ser a resistência à deformação permanente. As deformações obtidas para a mistura com 30% de RAP em seus estudos foram, em média, 1,8 mm a uma taxa de deformação de 0,04mm/1000 ciclos.

Centofante (2018) estudou misturas asfálticas recicladas com 10%, 20% e 30% de material fresado e observou que à medida em que o teor de ligante antigo é maior, a resistência à deformação permanente também é maior. A autora obteve FN de 60 ciclos na

amostra de referência (0% de RAP), 150 ciclos para 10% de RAP, 262 ciclos para 20% de RAP e 540 ciclos para 30% de RAP.

### **2.4.3 Dano por umidade**

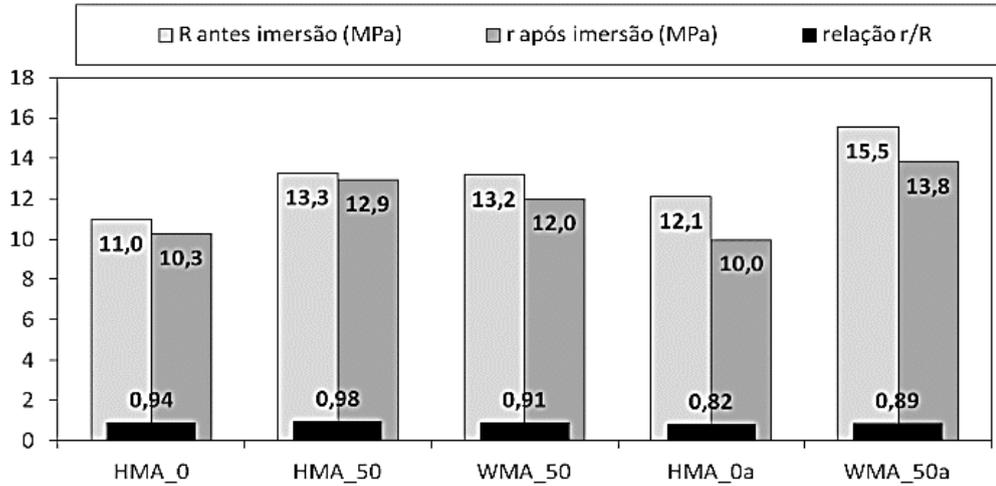
A susceptibilidade à presença de água de um pavimento é um problema sério e mensurá-la é um desafio, assim como interpretar os resultados (ASPHALT INSTITUTE, 2014). A avaliação da umidade é importante no estudo da durabilidade de misturas asfálticas, pois as diferentes técnicas e materiais podem contornar de maneira satisfatória a ação deletéria da água ao longo da vida útil do pavimento.

O principal mecanismo atuante na resistência ao dano por umidade em misturas asfálticas é propriedade de adesão ligante-agregado. Em misturas asfálticas recicladas, além de avaliar a adesividade entre o ligante virgem e os agregados virgens, deve-se considerar a adesividade entre o ligante do RAP e os agregados virgens, uma vez que o caráter envelhecido e as alterações químicas do ligante do RAP pode prejudicá-la. Uma forma de contornar este problema é o uso de filers ativos, como a cal hidratada que, segundo a ARRA (2015), atua na prevenção do descolamento da película de ligante da superfície do agregado (*stripping*).

Zhao *et al.* (2012) propuseram a inserção de teores até 50% de RAP em misturas mornas e observaram que há um aumento de até 22% no valor de resistência ao dano por umidade nestas misturas em relação a misturas à quente convencionais. Os autores afirmam que isto se deve ao fato de o agregado do RAP estar coberto de ligante envelhecido e esta ligação ser mais forte que de um agregado com ligante virgem.

Gennessaux (2015) avaliou misturas com teores de 0 e 50% de RAP com e sem adição de agente rejuvenescedor, variando as técnicas de usinagem morna e quente, e afirmou que não houve efeito negativo na resistência à ação deletéria da água na mistura a quente com 50% de RAP. A relação de resistência à tração entre os corpos de prova condicionados e não condicionados (parâmetro R/r) medida em Ensaio Duriez (EN 12697-12) não variou significativamente dentre as misturas avaliadas (Figura 15), o que levou a autora a concluir que nem a adição de RAP, nem o uso das técnicas a quente e morna influenciam na susceptibilidade à água em misturas asfálticas, enfatizando a importância da contribuição da reciclagem de pavimentos.

**Figura 15** - Resultados do ensaio Dureiz para misturas a quente (HMA) e mornas (WMA), com 0 e 50% de RAP, com e sem agente rejuvenescedor



Fonte: Genessaux, 2015

#### 2.4.4 Fenômeno da fadiga e surgimento de trincas

O termo “fadiga” foi aplicado por Wöhler em 1870 para explicar a relação entre a magnitude das repetições das tensões aplicadas até a falha dos materiais metálicos, definida em número de ciclos. O grande ganho dos estudos do autor foi a observação de que, quanto maiores forem as tensões aplicadas, menores os ciclos até a falha do material e isto foi ampliado não somente para os materiais metálicos, mas para diversos outros (SCHUSTER, 2018).

Em revestimentos asfálticos, o fenômeno da fadiga está associado à repetição da rolagem de cargas variadas na superfície. Colpo (2014) afirma que esta forma de carregamento gera tensões de tração na base do revestimento asfáltico, fazendo com que surjam microfissuras na fase inicial, que evoluem para trincas e, assim, levam à falha do pavimento. Ao entrar em fase de fadiga, a mistura asfáltica rapidamente perde a sua rigidez característica e passa a acumular maiores valores de deflexão, o que representa a chegada à zona de falha do pavimento.

Durante o processo de trincamento, as fissuras se propagam em direção à superfície, formando trincas longitudinais ou transversais que, interligadas, compõem as trincas couro de jacaré, resultando em defeitos superficiais perceptíveis ao usuário da rodovia.

Huang *et al.* (2013) tratam do dano à fadiga por duas vertentes: como método fenomenológico e segundo a teoria da mecânica da fratura. Considerá-la um fenômeno significa entender o mecanismo baseado na relação tensão-deformação do material, por meio da indução da ruptura por fadiga em ensaios de tensão controlada ou deformação controlada. Desta forma, o parâmetro de mensuração da resistência ao dano à fadiga é a vida de fadiga.

De acordo com Silva e Farias (2020) a vida de fadiga (N) é definida como o número total de aplicações de uma carga necessária à ruptura total da amostra, em uma dada temperatura. Os autores afirmam que, em quaisquer condições de teste, a vida de fadiga é expressa pelo número de solicitações que, em ensaio de tensão controlada, é calculado a partir das Equações 7 e 8.

$$N = k_1 \left(\frac{1}{\Delta\sigma}\right)^{n_1} \quad (\text{equação 7})$$

$$N = k_3 \left(\frac{1}{\varepsilon_i t}\right)^{n_3} \quad (\text{equação 8})$$

Onde,

$\Delta\sigma$  é a diferença de tensões;

$\varepsilon_i$  é a deformação específica resiliente;

$k_1, n_1, k_3, n_3$  são parâmetros experimentais determinados em ensaio.

Em ensaios com deformação controlada, a Equação 7 transforma-se na Equação 9, na qual  $\varepsilon t$  é a deformação específica e  $k_2, n_2$  são parâmetros experimentais determinados em ensaio.

$$N = k_2 \left(\frac{1}{\varepsilon t}\right)^{n_2} \quad (\text{equação 9})$$

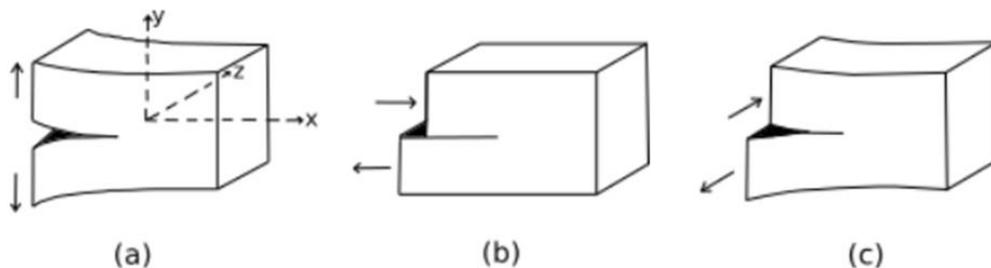
As tensões no corpo de prova são produto da consideração de que este seja constituído de material elástico, isotrópico e sem danos, no entanto, durante o ensaio de fadiga, há o acúmulo de dano progressivo resultante do carregamento cíclico imposto (BERNUCCI *et al.*, 2010). A curva de fadiga, plotada em termos de número de ciclos *versus* a diferença de tensões e número de ciclos *versus* deformação específica resiliente, indica a durabilidade e a deformabilidade da mistura asfáltica ao longo da imposição de cargas de tráfego. Em misturas com RAP, estes parâmetros são essenciais na análise da qualidade e custo-benefício do emprego de misturas asfálticas recicladas, além de indicar a sustentabilidade do uso de RAP na construção de rodovias (LUZZI, 2019).

De acordo com Barros (2019) a teoria da Mecânica da Fratura adota a premissa de que todos os materiais de engenharia se apresentam inerentemente com falhas e assim, considera-se que a vida de fadiga seja a diferença entre o ponto de falha inicial até a falha crítica, ou ruptura total.

Os estudos de Griffith (1921) e Irwin (1957) apontaram os três modos triviais de desenvolvimento de trincas previstos na teoria da Mecânica da Fratura, cujas propagações se relacionam com o deslocamento relativo à face da trinca. Estes modos de fratura foram explicitados por Vargas (2016):

- (a) abertura, no qual as forças atuantes são perpendiculares à fenda, comuns em sollicitações de tração (Figura 16 (a));
- (b) cisalhamento, cujas forças atuantes são paralelas à fenda que se abre, comuns em esforços gerados pelo rolamento de eixos sobre o pavimento, que tende a formar trincas deslizantes entre si, de diferentes magnitudes (Figura 16 (b));
- (c) rasgamento da face, resultante da atuação de forças transversais à fenda que movimentam as superfícies para fora de seus planos iniciais (Figura 16 (c)).

**Figura 16** - Modos de desenvolvimento de trincas: (a) Modo de abertura; (b) Modo de cisalhamento e (c) Modo de rasgamento da face



**Fonte:** Adaptado de Rodrigues, 1991

Obando (2016) afirma que o modo de abertura é comumente observado em trincas decorrentes de esforços de tráfego e variações de temperatura e o modo de cisalhamento, também comum a trincas decorrentes do tráfego. O modo de rasgamento, no entanto, é particularmente observado no movimento longitudinal das placas de pavimentos rígidos (de concreto), e tende a acontecer também em misturas recicladas, tamanha a rigidez que elas podem apresentar.

Os estudos de Izaks *et al.* (2002), Lima (2003), Huang *et al.* (2004), West *et al.* (2012), Al-Qadi *et al.* (2012), Gennessaux (2015), Centofante (2016), Wang *et al.* (2018), Suzuki (2019) e Luzzi (2019) estabeleceram conclusões, por vezes divergentes, acerca da fadiga em misturas recicladas.

Izaks *et al.* (2002) avaliou misturas com teores de 30 a 50% de RAP a partir do ensaio de flexão de viga apoiada em quatro pontos e concluíram que a resistência à fadiga decresce, à medida em que aumenta a quantidade de material fresado. Lima (2003) que caracterizou misturas com 0, 10, 30 e 50% de fresado e Al-Qadi *et al.* (2012) que avaliou teores de 30, 40 e 50% de RAP observaram exatamente o oposto de Izaks *et al.* (2002): para um dado nível de tensão, houve um aumento de até 30% na vida de fadiga com o aumento do teor de material fresado, indicando que as misturas com maior MR apresentaram maior vida de fadiga, o que se pode relacionar com a rigidez do ligante.

Huang *et al.* (2004) avaliaram misturas com 0, 10, 20 e 30% de RAP e, assim como Lima (2003) e Al-Qadi *et al.* (2012) obtiveram como resposta o aumento de cerca de 50% na vida de fadiga, exceto para a mistura com 30% de RAP, que teve seu desempenho comprometido e tornou a avaliação global inconclusiva. Centofante (2016) e Luzzi (2019) também foram inconclusivos ao avaliar a vida de fadiga, pois seus resultados não conseguiram definir um comportamento que relacionasse a inserção de RAP e o desempenho à fadiga das misturas recicladas.

Os estudos de West *et al.* (2012) foram realizados no trecho experimental da NCAT, por meio do ensaio de flexão de viga apoiada em quatro pontos, em seções com mistura morna e quente, com 0 e 50% de RAP e permitiram a observação de que o melhor desempenho à fadiga foi das misturas recicladas, dado às baixas deformações de toda a estrutura do pavimento.

Wang *et al.* (2018) observaram que o desempenho de trincamento por fadiga de misturas asfálticas com RAP varia de acordo com a estrutura global do pavimento e, corroborando neste sentido. Suzuki (2019) afirma que, embora seus resultados tenham indicado um comportamento das misturas com RAP, é recomendável realizar uma análise mecanicista para verificar o nível de tensões ao longo da espessura das camadas com misturas asfálticas recicladas no pavimento.

## **2.5 Comportamento de misturas asfálticas sob a ação do tempo**

O desenvolvimento de uma mistura asfáltica reciclada envolve tanto a busca por um bom desempenho, quanto uma durabilidade satisfatória. De acordo com Gennessaux (2015) o conceito de durabilidade é a capacidade de resistir aos efeitos do ar, água, radiação solar e da fadiga e, para avaliá-la, é preciso verificar suas propriedades antes e após a aplicação em campo. Neste sentido, os critérios de desempenho devem ser atendidos quando submetidos ao envelhecimento, testado em laboratório, possibilitando assim, a modelagem do comportamento.

### **2.5.1 Envelhecimento**

A matriz pétreia da mistura asfáltica é mais constante e estável, a depender da qualidade e durabilidade dos agregados envolvidos e do carregamento imposto ao pavimento durante sua vida de serviço, do que o ligante asfáltico, que tende a modificar suas características inerentes devido aos efeitos da oxidação, exposição à umidade e da perda de componentes moleculares importantes.

O ligante asfáltico é um material sólido a baixas temperaturas, semissólido em temperatura ambiente e líquido a temperaturas superiores a 100°C, cuja composição química é predominantemente orgânica, com presença de cerca de 5 a 10% de heteroátomos tais

como N, O e S, além de metais como Ni, V e Fe (CRAVO, 2016; REDELIUS e SOENEN, 2015).

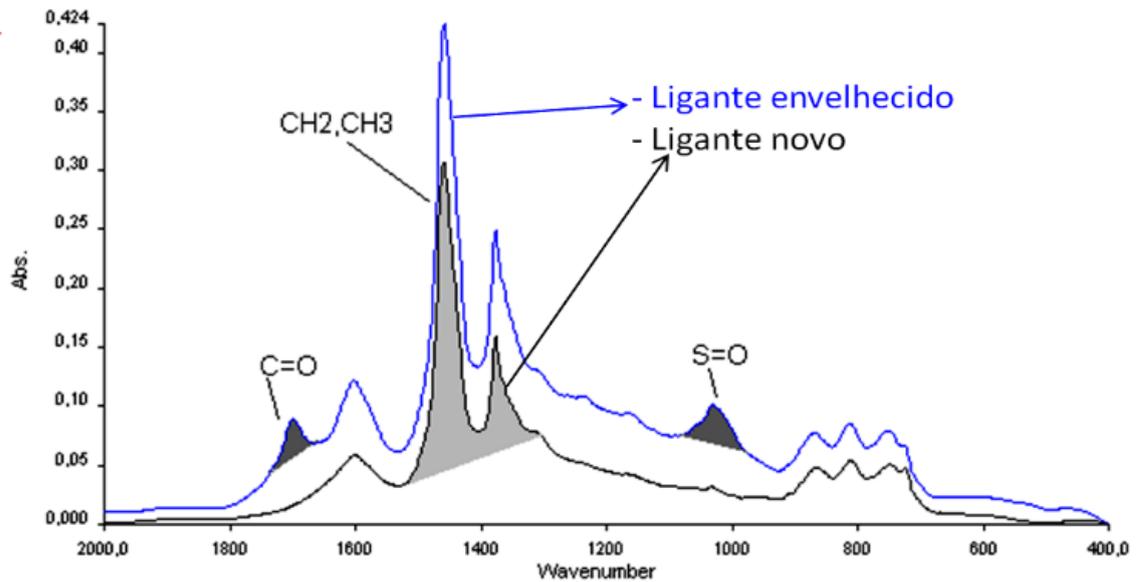
De acordo com Silveira (2018) o ligante é uma dispersão coloidal de asfaltenos em óleos saturados e aromáticos (maltenos), circundados por resinas (micelas). A quantidade de asfaltenos é um importante indicativo de rigidez: quanto maior a razão de asfaltenos, mais endurecido se torna. Este processo pode ocorrer em resultado a três mecanismos principais (FERNÁNDEZ-GOMEZ *et al.*, 2014):

- a. oxidação, durante os processos de usinagem, compactação e, em menor escala, durante a exposição do pavimento em vida útil;
- b. endurecimento estérico, atribuído à reordenação das moléculas e cristalização das parafinas na fração saturada do ligante;
- c. volatilização de componentes leves, relacionada às altas temperaturas nos processos de usinagem e compactação.

O efeito do envelhecimento sobre o comportamento mecânico de uma mistura asfáltica pode ser observado na mudança de consistência do ligante, por meio da redução da penetração, aumento da viscosidade ou aumento do ponto de amolecimento, por meio da análise dos parâmetros mecânicos tais como a vida de fadiga, a deformação permanente e os módulos de resiliência e dinâmico ou, ainda, por meio de análise química tal como a Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) (GENNESSAUX, 2015; SILVA e ARAÚJO, 2016; DAS *et al.*, 2021).

O envelhecimento do ligante asfáltico está relacionado ao processo de oxidação deste composto orgânico e gera, como produto, as cetonas e os sulfóxidos e, a longo prazo, ainda são observadas as formações de álcoois na matriz química do ligante. Em um espectro FTIR como apresentado na Figura 17, este envelhecimento é identificado pelas carbonilas (CO) observadas nas bandas em torno de  $1700\text{ cm}^{-1}$  e atribuídas à deformação dos grupos  $\text{CH}_2$  e  $\text{CH}_3$  de cadeias hidrocarbônicas; e pelos sulfóxidos (SO), observados em torno de  $1030\text{ cm}^{-1}$  (SILVEIRA, 2018).

Figura 17 - Espectro FTIR típico de um ligante novo e um ligante envelhecido



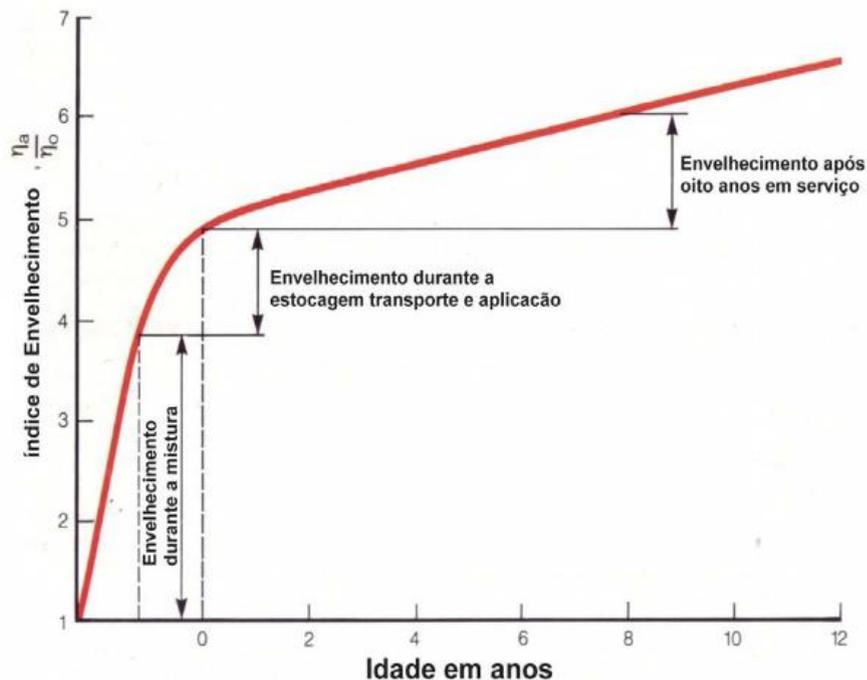
Fonte: Gennessaux, 2015

Das *et al.* (2021) afirmam que durante o decorrer do envelhecimento, a mistura asfáltica experimenta uma perda de resistência, rigidez e durabilidade à presença de umidade. O crescimento de trincas é contínuo e afeta ainda mais a resistência à umidade, pois esta atinge a face inferior do revestimento e as camadas de suporte. Os autores apontam que é possível analisar o efeito do envelhecimento sobre a mudança no número de ciclos, de fadiga, até a falha ou sobre a progressão dos danos (mudança na rigidez, comprimento de trinca etc.) e que é evidente que a mistura asfáltica mais rígida apresenta uma maior resistência à fadiga em um modo de ensaio de tensão controlada.

O uso de asfalto reciclado gera preocupação quanto ao desempenho da mistura justamente pelo fato de inserir material envelhecido e enrijecido a uma mistura nova. Ainda as pesquisas apontem que há uma maior resistência à fadiga e deformação permanente, o trincamento de misturas rígidas é frágil e precoce (com pequenas deformações), o que causa a falha súbita do pavimento, sem o indicativo de manutenção corretiva. Neste sentido, a qualidade da mistura entre o ligante virgem e envelhecido, especialmente para maiores teores de RAP, e o enrijecimento da mistura devem ser minuciosamente analisados (FHWA, 2011).

Whiteoak (1990) *apud* Morilha Junior (2004) afirma que o envelhecimento é dado, cerca de 60%, no momento da usinagem, 20% durante a estocagem e aplicação da mistura asfáltica e os 20% restantes, durante cerca de oito anos iniciais de sua vida de serviço (Figura 18). Para simular esta condição em laboratório, a literatura descreve alguns protocolos de laboratório.

**Figura 18** - Etapas do envelhecimento de ligantes asfálticos



Fonte: Adaptado Whiteoak, 1990 *apud* Morilha Junior, 2004

O método proposto no RILEM TC-ATB (testes avançados em misturas asfálticas, grupo de trabalho TG5), que busca simular o envelhecimento até o fim da vida útil do pavimento em laboratório, sugere que a mistura solta seja submetida a estufa ventilada a 135°C por quatro horas e, posteriormente, a 85°C por nove dias, atingindo assim um envelhecimento de cerca de oito anos (DE LA ROCHE *et al.*, 2010, KIM *et al.*, 2015).

Genessaux (2015) utilizou o envelhecimento para produzir o próprio RAP em condições de mistura controladas eliminando, desta forma, parte da variabilidade inerente ao RAP, no intuito de avaliar de forma mais precisa a influência da inserção de um material envelhecido em uma mistura asfáltica nova. A autora realizou o envelhecimento de curto prazo com misturas soltas em estufa a 135°C por quatro horas e, em seguida, dividiu-as em dois grupos a serem envelhecidos a longo prazo em estufa a 85°C por nove dias: em um, as misturas foram compactadas e no outro, as misturas permaneceram soltas.

Para realizar a compactação das misturas soltas envelhecidas, houve o reaquecimento do material entre as fases de envelhecimento de curto prazo e envelhecimento de longo prazo, até a temperatura de compactação das, considerando que não haveria um envelhecimento adicional representativo. Como conclusão, apontou que, embora a mistura solta apresentasse maiores índices de carbonila e sulfóxido, indicando maior envelhecimento, a parte central dos corpos de prova de mistura envelhecida após a compactação representou de forma mais aproximada o envelhecimento de campo.

O procedimento AASHTO PP2 descreve que o protocolo de envelhecimento de curto prazo (*Short-term oven ageing*, STOA) consiste em manter a mistura solta por quatro horas de estufa a 135°C, e a longo prazo (*Long-term oven ageing*, LTOA), manter as misturas compactadas a 85°C durante cinco dias. De acordo com Yin *et al.* (2017) este protocolo é capaz de simular até 23 meses de envelhecimento em campo.

Santana-Greco e Fabbri (2004) realizaram o envelhecimento de acordo com o procedimento AASHTO PP2 e, propuseram como comparação ao envelhecimento de longo prazo, deixar outros corpos de prova ao ar livre durante quatro meses, girados em 90° a cada semana. Os autores observaram que a exposição ao tempo envelhecia mais severamente a mistura asfáltica do que mantê-las em estufa ventilada a 85°C por cinco dias e atribuíram este fator à ação da radiação ultravioleta.

Pasetto e Baldo (2017) utilizaram um protocolo de envelhecimento semelhante ao LTOA da AASHTO PP2 em amostras prismáticas de misturas asfálticas recicladas modificadas com polímero, considerando que este protocolo produz um envelhecimento de longo prazo acelerado, o que permitiu observar o efeito da sazonalidade na resistência à fadiga e a perda de desempenho ligada ao envelhecimento.

### **2.5.2 Capacidade de autorregeneração das misturas asfálticas (*self-healing*)**

O fenômeno de *self-healing* em misturas asfálticas, traduzido tecnicamente como autorregeneração de microtrincas, está associado à capacidade inerente ou induzida do material de retomar parte de sua rigidez e resistência durante períodos de descanso e imposição de temperaturas, devido à presença do ligante asfáltico, um material viscoelástico termossensível (BAAJ *et al.*, 2017).

A primeira observação deste fenômeno em uma mistura asfáltica foi feita por Bazin e Saunier, em 1967, durante o período de descanso imposto a um ensaio de fadiga quando, ao retomar o ensaio, os pesquisadores notaram um aumento da rigidez, resistência e extensão da vida de fadiga. Desde então, tomou-se ciência de que o processo de deterioração do pavimento não se trata apenas da redução da capacidade contínua, mas sim, de ciclos de dano e regeneração em diferentes escalas.

Liang *et al.* (2021) afirmam que a autorregeneração é influenciada pela estrutura da mistura e certas condições ambientais. Dentre os fatores internos inerentes, destacam-se a composição molecular, a estrutura, o movimento e difusão do asfalto, a viscoelasticidade e tixotropia, enquanto, externamente, destacam-se a umidade, temperatura, condição de indução e duração da autorregeneração.

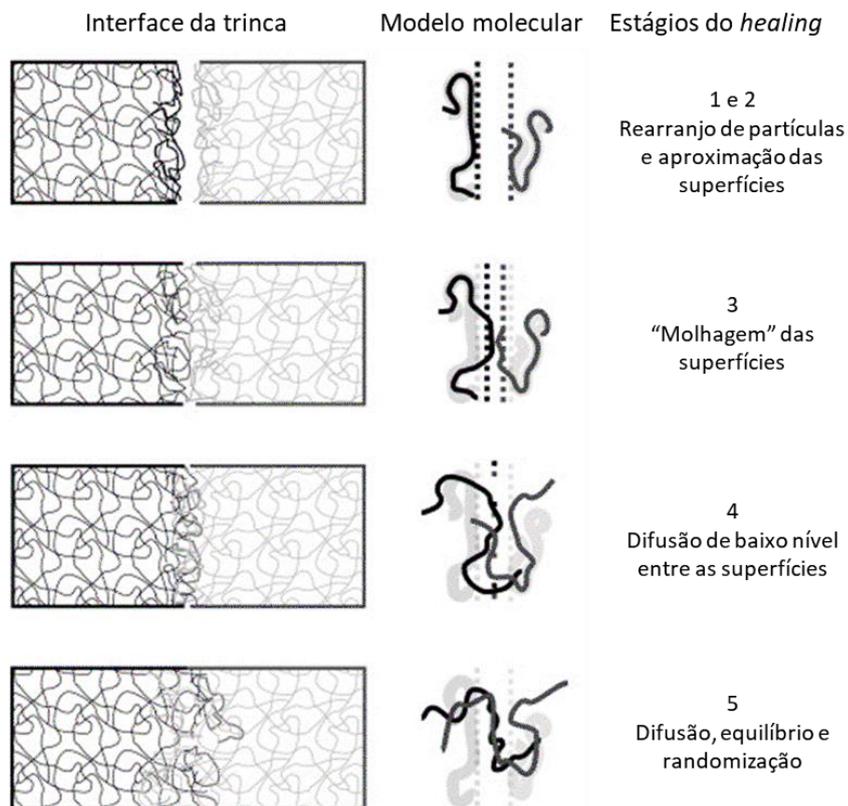
Shan (2011) pontua a hipótese que a tixotropia é fator preponderante e atua continuamente no processo de fadiga. A capacidade de alteração da viscosidade do ligante é quem determina a intensidade de autorregeneração que acontece durante a fadiga, no

período de relaxamento e durante o repouso da mistura, no entanto, este tipo de resposta viscoelástica não contribui efetivamente para a extensão da vida útil de um pavimento (AYAR *et al.*, 2016).

A nível molecular, um processo simplificado de contato entre as faces regeneráveis conta com cinco etapas, segundo Wool e O'Connor (1981): (1) rearranjo da superfície trincada, (2) aproximação das faces, (3) “molhagem” das superfícies, (4) difusão e (5) randomização (Figura 19).

Como a formação de trincas envolve o deslocamento da face, é improvável que as faces se recombinem perfeitamente posteriormente. Assim, sempre haverá espaços vazios, às vezes de dimensões tão largos a ponto de não se reconectarem, apesar da cura continuar a acontecer (GARCÍA, 2012).

**Figura 19** - Estágios da autorregeneração a nível molecular



Fonte: Adaptado Wu *et al.*, 2008

Xu *et al.* (2018) afirmam que apesar da capacidade intrínseca de autorregeneração do asfalto já ter sido comprovada, esta é limitada às condições de campo e não é suficiente para combater o processo de deterioração. Por esta razão, pesquisas surgiram no intuito de induzir esta regeneração, utilizando processos tais como nanopartículas, agentes rejuvenescedores encapsulados e aquecimento por indução (SCHLANGEN *et al.*, 2017; GÓMEZ-MEIJIDE *et al.*, 2018; BARROS, 2020).

Em oposição ao que apontaram Xu *et al.* (2018), Liang *et al.* (2021) afirmam que a capacidade de autorregeneração inerente e multiescalar das misturas asfálticas a torna uma abordagem promissora para aumentar a durabilidade do pavimento, restaurar fissuras e seu desempenho sem destruir a estrutura, reduzindo custos de manutenção, emissões de dióxido de carbono e problemas na segurança viária.

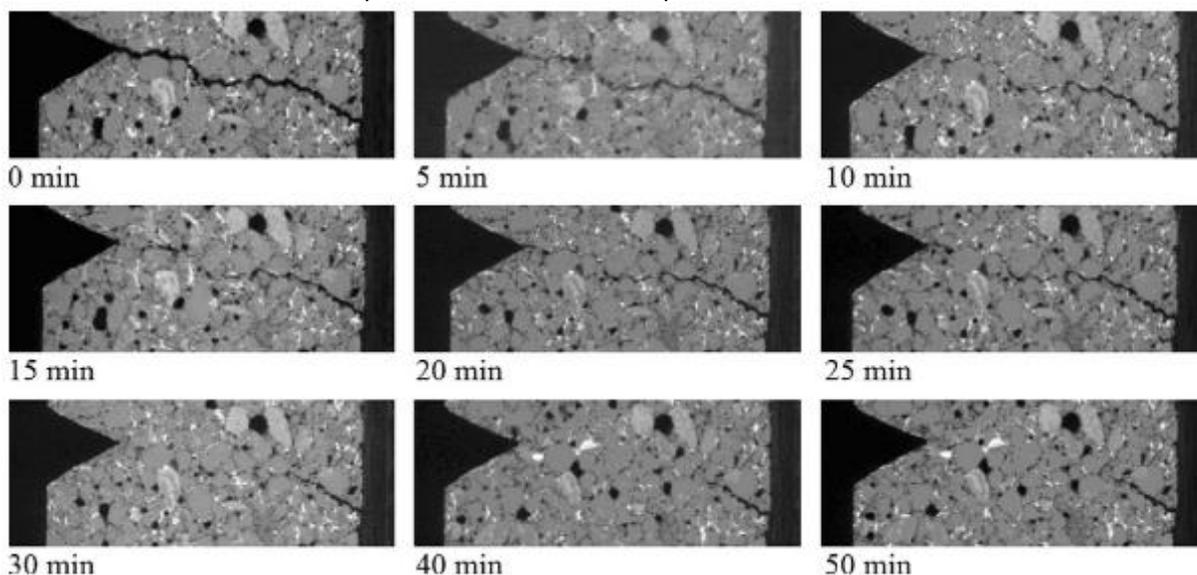
Um importante mecanismo no processo de autorregeneração é a ascensão capilar do fluido constituinte do masticue. Garcia (2011) e Garcia *et al.* (2013) observaram que o aumento da temperatura contribuía para a velocidade e efetividade de mobilização do ligante em fissuras de dimensões capilares e, desta forma, fica claro que as microfissuras serão mais facilmente seladas que as trincas maiores.

Uma vez que a temperatura aumente, o ligante disponível na mistura flui até a micro trinca e, a regeneração, de fato, ocorrerá quando esta temperatura do ligante mobilizado se reduzir, sua viscosidade aumentar e seu movimento cessar. Assim, as duas faces trincadas são “coladas”, restaurando parcialmente a resistência da mistura asfáltica naquele ponto (GONZÁLEZ *et al.*, 2018).

Na Figura 20 é possível observar a selagem de uma trinca de 200  $\mu\text{m}$  em imagem de tomografia computadorizada, em uma mistura com adição de fibras condutoras e autorregeneração induzida a 70°C. Neste caso, a mensuração do índice de autoregeneração (IA) foi definida como a relação entre a força final antes e após o tempo de cura, aplicadas em um teste de fadiga sob flexão de viga em três pontos.

Alguns autores utilizam o ensaio de fadiga para avaliar a autorregeneração, seja na forma de tensão controlada, para simular a condição de carregamento típico ou de deformação controlada, com o objetivo de variar outros parâmetros, tais como temperatura ambiente, tempo de repouso, condições de confinamento etc. (KIM *et al.*, 2002; CARPENTER e SHEN, 2006; GRANT, 2001; HUANG e HUANG, 2016).

**Figura 20** - Observação do mecanismo de autorregeneração de uma trinca obtida por tomografia computadorizada em diferentes períodos de descanso



Fonte: García, 2011

Neste sentido, pode-se mencionar o estudo de Su *et al.* (2016), que avaliaram o potencial de autorregeneração de misturas asfálticas utilizando o ensaio de tensão-compressão direta (uniaxial); estudos de Dai *et al.* (2013), Xu *et al.* (2018) e Gómez-Meijide *et al.* (2018), que utilizaram a flexão de viga em três pontos; e o estudo de Mullapudi *et al.* (2020), que avaliaram a vida de fadiga em ensaio de tração indireta por compressão diametral.

Outros parâmetros podem ser indicadores de regeneração, tais como o módulo de resiliência instantâneo, módulo de rigidez, resistência à tração, quantidade de energia dissipada recuperada etc. (MULLAPUDI *et al.*, (2020).

Os procedimentos de avaliação da capacidade de autorregeneração necessitam de três etapas básicas: a imposição do dano, a indução da autorregeneração e, na sequência, o ensaio de resistência. Para alcançar este objetivo, García (2012) utilizou o parâmetro de deformação em um ensaio de flexão de viga em três pontos, de forma que uma trinca de 200µm fosse a dimensão padronizada em sua avaliação; induziu a autorregeneração pelo aquecimento da mistura que continha fibras condutoras e, por fim, realizou ensaio de flexão de viga em três pontos novamente. A medida de autorregeneração ( $h$ ) utilizada foi a relação entre a força medida no ensaio de flexão de viga em três pontos em um dado momento do processo de regeneração ( $F(t)$ ) e inicialmente ( $F_0$ ) (Equação 10).

$$h = \frac{F(t)}{F_0} \quad (\text{equação 10})$$

González *et al.* (2018) utilizaram a mesma relação estabelecida por García (2012), mas as forças foram medidas em um ensaio de flexão de três pontos com amostra

semicircular. Mullapudi *et al.* (2020) utilizou uma comparação entre o índice de autorregeneração mensurado pela relação entre o número de ciclos suportados pela amostra antes e após a autorregeneração, e pelo índice calculado pela relação entre os módulos resilientes das amostras nas duas condições.

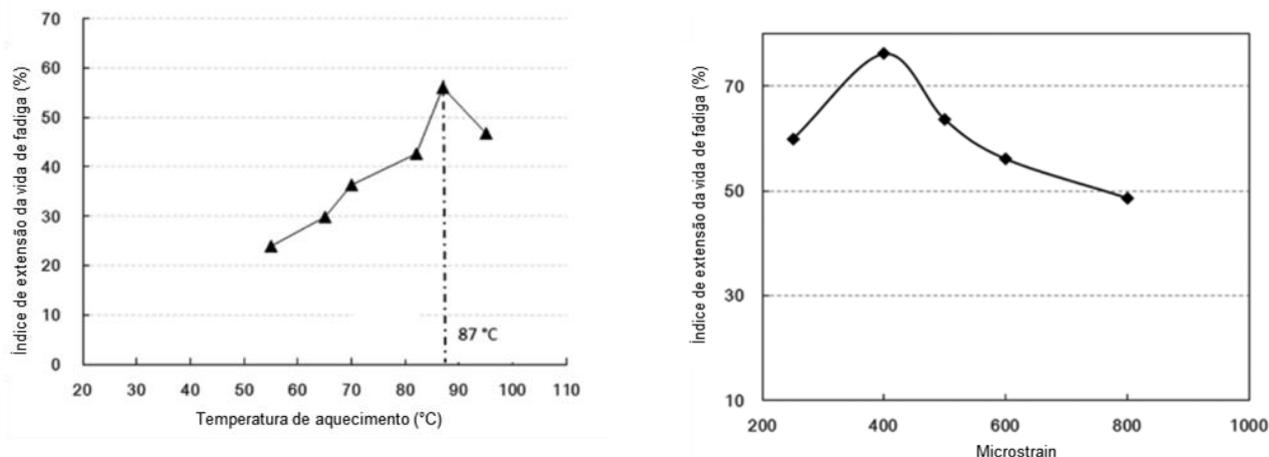
Em misturas com RAP, o potencial autorregenerativo é condicionado pela elevada viscosidade do ligante envelhecido ali presente. Os estudos de Mullapudi *et al.* (2020) evidenciam que as misturas recicladas se tornam mais rígidas e quebradiças com o aumento no teor de RAP e isto afeta negativamente na capacidade de recuperação de mastiques e misturas, e apontam que a literatura disponível ainda é muito limitada sobre o comportamento autorregenerativo de misturas com RAP.

Clark e Gallage (2020) afirmam que a diferença de comportamento à fadiga em níveis de tensão mais baixos podem ser indícios de que as misturas envelhecidas se enquadrem à teoria do "pavimento perpétuo", dadas as pequenas deformações obtidas.

Gómez-Meijide *et al.* (2018) avaliaram a capacidade de autorregeneração de misturas com 0, 20, 40, 60, 80 e 100% RAP utilizando a indução eletromagnética para a selagem das macro trincas e Gonzalez *et al.* (2018), em misturas com 0, 10, 20 e 30% de RAP macro trincadas, utilizando técnicas aquecimento por micro-ondas, e observaram a redução à medida em que o teor de RAP aumentava. A hipótese de que a viscosidade elevada do ligante envelhecido dificulta a selagem da trinca é válida, nestes casos, pois a magnitude da trinca não pôde ser preenchida com efetividade. No entanto, Gómez-Meijide *et al.* (2018) afirmam que uma autorregeneração mínima de cerca de 20% pode sempre ser esperado.

Além de estabelecer um potencial de autorregeneração, as técnicas de indução da autorregeneração promovem uma extensão na vida de fadiga. Xu *et al.* (2018) definiram como extensão da vida de fadiga a relação entre a vida de fadiga após e antes da indução da autorregeneração, e relacionaram os valores obtidos com a temperatura de indução e a magnitude do dano (Figura 21 (a) e (b), respectivamente).

**Figura 21** - Índices de extensão da vida de fadiga de amostras versus (a) temperatura de indução da autorregeneração e (b) amplitudes de deformação



Fonte: Adaptado Xu *et al.*, 2018

## 2.6 Considerações Finais

A revisão de literatura mostrou que misturas asfálticas recicladas possuem um elevado potencial de aplicação, mas que requerem investigações adicionais acerca do seu desempenho. O RAP é um material complexo pois, além de ser variável, é constituído de ligante envelhecido que demanda altas temperaturas para o aproveitamento, mas sua adição em misturas asfálticas representa um ganho econômico e ambiental significativo e compensatório.

O desempenho das misturas recicladas tem sido alvo de estudos nos últimos anos, no entanto, a investigação sobre o comportamento a longo prazo dessas misturas ainda é pouco explorado ainda que possa ser um aspecto relevante, pois as propriedades mecânicas tendem a mudar significativamente com o envelhecimento e exposição ao tráfego. A rigidez característica dessas misturas gera preocupações quanto ao trincamento por fadiga e, neste sentido, o ensaio de vida de fadiga é o principal parâmetro a ser observado.

O resultado do ensaio de vida de fadiga pode não prever as condições de campo e, especialmente em misturas recicladas, tendo em vista a quantidade de RAP, a qualidade do RAP, a temperatura de usinagem e o tipo de ligante virgem adicionado e o envelhecimento de campo. Portanto, simular a condição envelhecida de uma mistura reciclada quanto à fadiga significa avaliar o efeito do tempo nesta rigidez característica.

Um aspecto positivo na durabilidade das misturas asfálticas é a capacidade inerente de autorregeneração, devido à natureza termoviscoelástica do ligante. Este fenômeno confere à mistura asfáltica a capacidade de combater os danos gerados pela rolagem dos eixos sobre a superfície do pavimento, no entanto, em menor escala.

Se não for induzida, a autorregeneração fica condicionada às condições de campo, tais como temperatura, confinamento, períodos de descanso entre a passagem de eixos, etc., mas ainda é possível afirmar que a geração e cicatrização de fissuras são reversíveis sob certas condições.

Em misturas recicladas e envelhecidas, o fenômeno de autorregeneração é dependente também da viscosidade do ligante presente. A conclusão de que a mistura nova possui maior capacidade de autorregeneração em relação a uma mistura envelhecida superoxidada é evidente, pois a facilidade de mobilizar o ligante do masticado para a selagem de trincas é tão maior, quanto menos viscoso for.

Além disso, a dimensão do dano influi na efetividade da autorregeneração, pois quanto maiores as trincas, maior a dificuldade de fechá-las. Neste sentido, uma hipótese possível seria: se pavimentos com RAP tendem a produzir menores trincas até a ruptura, que é de natureza frágil, as micro trincas seriam mais frequentemente encontradas e, assim, mais facilmente seladas. No entanto, esta consideração depende de diversos aspectos tais como a composição de ligantes, a efetividade da difusão durante a mistura, o mecanismo que induz a autorregeneração e o tipo de ligante do RAP, não cabendo à lógica simples explicar o fenômeno.

Portanto, tendo em vista que o comportamento mecânico e resistência à fadiga de misturas recicladas precisa ser investigado a longo prazo, esta pesquisa almeja ampliar a bibliografia sobre o assunto, incluindo a avaliação do fenômeno de autorregeneração como aspecto a ser analisado durante os estudos para implementação de um pavimento com RAP.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

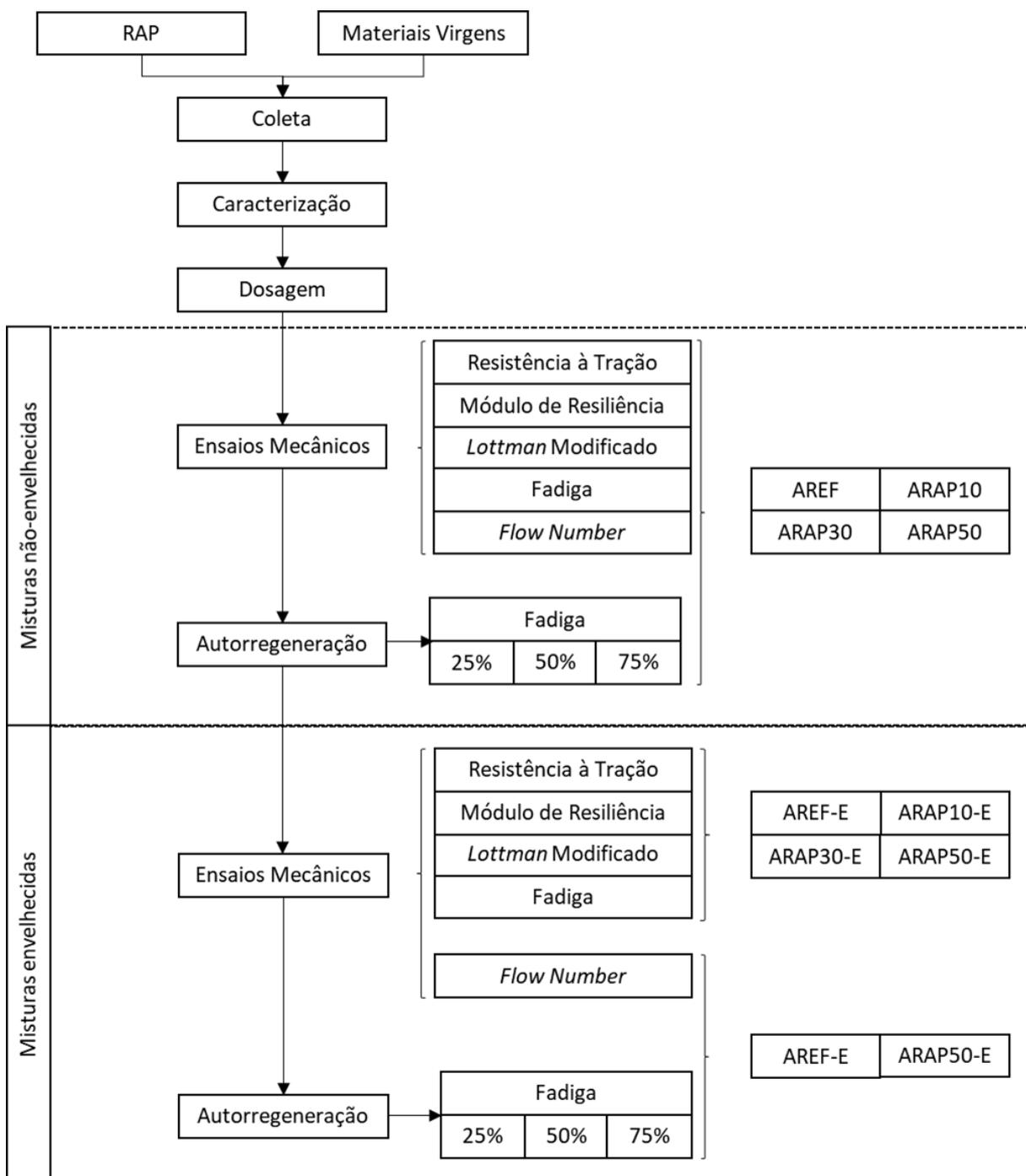
Neste capítulo são apresentados os materiais, metodologias empregadas e as normas e procedimentos adotados. Em resumo, foram avaliadas misturas asfálticas produzidas com CAP 50/70, contendo 0%, 10%, 30% e 50% de RAP, e agregados naturais (brita granítica de 19 e 12,5 mm, pó de pedra granítica e areia). Estes teores foram escolhidos por englobarem as condições de baixo, alto e intermediário teor de RAP. As misturas foram usinadas à temperatura determinada pela faixa de viscosidade indicada na norma DNIT 031/2006 – ES (convencional e adaptada à inserção de RAP) e submetidas a ensaios mecânicos. As amostras foram ensaiadas nas condições envelhecida e não envelhecidas, cujas nomenclaturas são resumidas no Quadro 1.

**Quadro 1** – Nomenclaturas e descrição das amostras na etapa inicial

<b>Identificação</b>	<b>Tipo de mistura asfáltica</b>	<b>Condição</b>
AREF	0% de RAP	Não-envelhecida
ARAP10	10% de RAP	
ARAP30	30% de RAP	
ARAP50	50% de RAP	
AREF-E	0% de RAP	Envelhecida
ARAP10-E	10% de RAP	
ARAP30-E	30% de RAP	
ARAP50-E	50% de RAP	

A avaliação da capacidade de autorregeneração foi realizada mediante a imposição de um dano de 25%, 50% e 75% da vida de fadiga, seguido de um repouso confinado aquecido durante 4h horas e à temperatura ambiente por 24h em todas as misturas na condição não-envelhecida e nas misturas de referência e 50% de RAP na condição envelhecida a longo prazo. A Figura 22 apresenta o esboço da metodologia adotada.

**Figura 22** - Fluxograma representativo do método utilizado nesta pesquisa



### 3.1 Materiais

#### 3.1.1 RAP

O RAP utilizado nesta pesquisa foi proveniente do serviço de fresagem de um trecho da BR-230/PB, para execução de nova camada de microrrevestimento. As informações fornecidas pelo DNIT indicam que o material é uma composição de mistura asfáltica usinada à quente (MAUQ) e microrrevestimento com asfalto modificado com polímero. O RAP

encontrava-se acondicionado na Unidade Local do DNIT, localizada no município de Santa Rita/PB, em pilhas expostas às ações do clima (Figura 23 (a) e (b)).

**Figura 23** - Coleta de amostras de RAP: (a) Pilha de estocagem ao ar livre e (b) Aspecto visual do material fresado



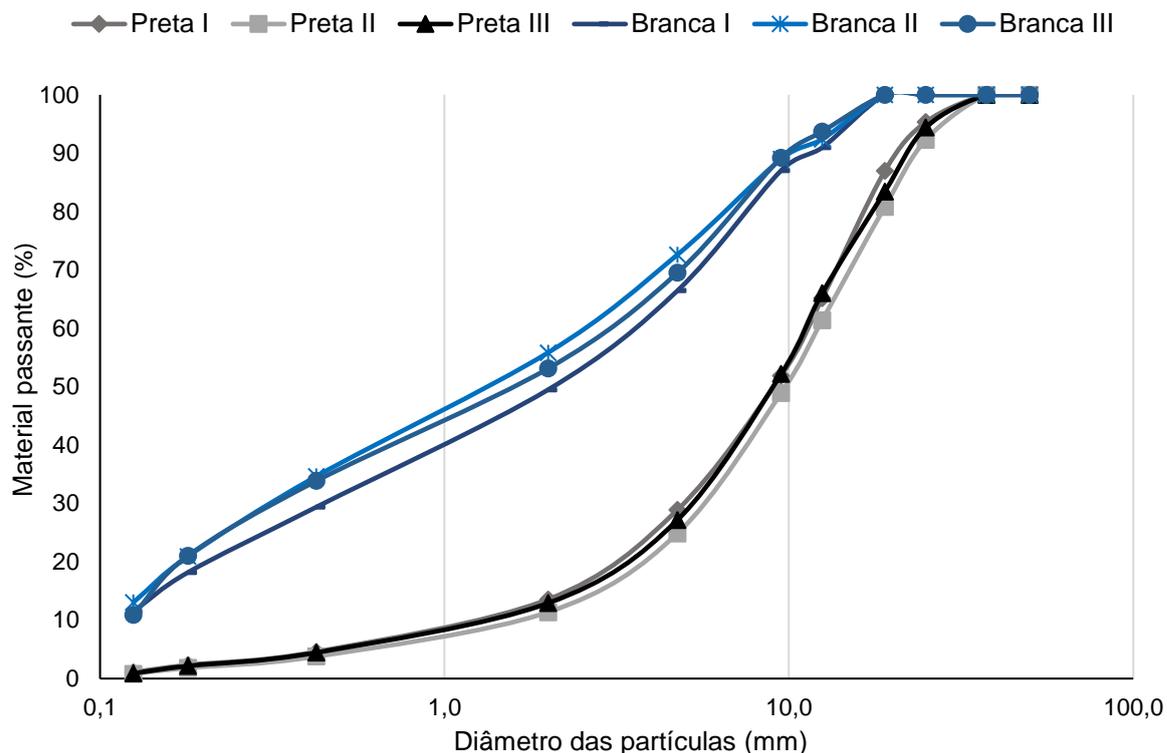
As amostras foram ensacas e transportadas até o Laboratório de Engenharia de Pavimentos da Universidade Federal de Campina Grande, em Campina Grande/PB, no dia 23 de julho de 2020, onde foram quarteadas para a realização da caracterização preliminar.

A caracterização do RAP em seu estado bruto foi iniciada pela realização do ensaio de massa específica máxima medida ( $G_{mm}$ ) em duas amostras, cujos valores estão apresentados na Tabela 3 e produzem um valor de  $G_{mm}$  médio de 2,34 g/cm<sup>3</sup>. A análise granulométrica por peneiramento foi realizada em três amostras, antes (granulometria preta) e após o procedimento de extração do ligante (granulometria branca), realizado pelo Rotarex conforme método descrito na norma DNIT 053/94-ME, para conhecimento da distribuição granulométrica dos agregados que compunham a mistura original. Desta extração, obteve-se o teor de ligante do RAP, apresentado na Tabela 3. Na Figura 24 são apresentadas as distribuições granulométricas do RAP antes e após a extração do ligante.

**Tabela 3** - Caracterização preliminar do RAP

Parâmetro ensaiado	Norma	Amostra	
		I	II
Massa específica máxima medida (g/cm <sup>3</sup> )	$G_{mmRAP}$ AASHTO T 209 2012	2,33	2,35
Teor de ligante (%)	$P_{bRAP}$ DNIT-ME 083/98	4,42	

**Figura 24** - Distribuição granulométrica das amostras de RAP antes e após a extração de ligante



A Figura 24 ilustra que as amostras são homogêneas, visto que as distribuições granulométricas das três amostras foram semelhantes. A quantidade de finos na mistura é relevante, e representa cerca de 70% do total. Isso impacta diretamente na disponibilidade de ligante no mastique, uma vez que a superfície específica da fração fina é maior que da fração grossa e, conseqüentemente, consome mais ligante. Em suma, esse RAP tende a fornecer boa quantidade de ligante para uma mistura a quente.

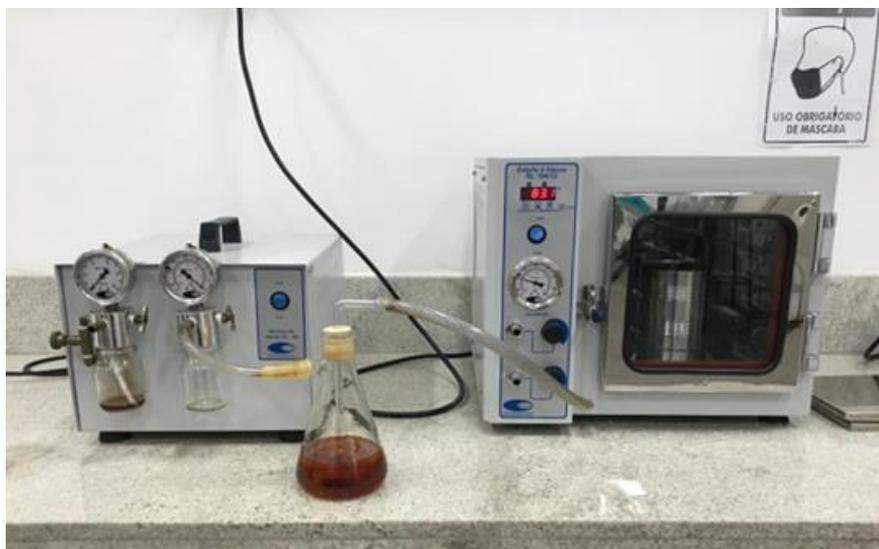
Uma maior quantidade de ligante foi extraída para a determinação do conteúdo de ligante presente no RAP de acordo com o procedimento da norma DNIT-ME 053/94, utilizando o equipamento Rotarex A solução de ligante dissolvido em tricloroetileno foi submetida ao processo de rotoevaporação no laboratório SupraMat, da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), para a sua recuperação.

A recuperação do asfalto foi realizada com a utilização de um balão rotativo parcialmente imerso em um banho aquecido, submetido ao vácuo e condensação do solvente. O equipamento utilizado foi um Rotavapor® R-300 Buchi, com bomba de vácuo V-300 e interface I-300, programada para diversos solventes, inclusive o tricloroetileno, conforme apresenta a Figura 25. O equipamento operou em banho de água a 60°C, até que não condensasse mais solvente no balão volumétrico e, em seguida, a amostra passou por estufa a vácuo, por 5 horas, a uma temperatura variante entre 80°C e 85°C, como apresenta a Figura 26.

**Figura 25** - Rotoevaporação do ligante dissolvido em tricloroetileno



**Figura 26** - Ligante recuperado por rotoevaporação em estufa a vácuo



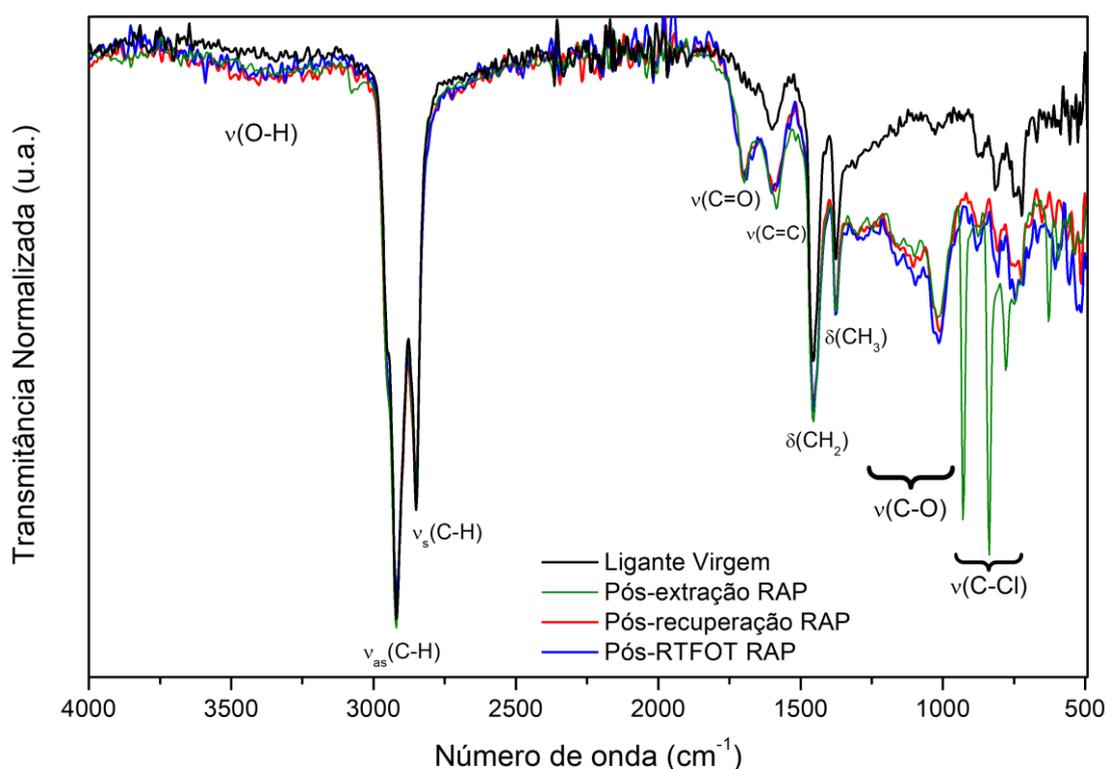
A amostra recuperada foi submetida ao RTFO (*Rolling Thin Film Oven*), no Laboratório de Engenharia de Pavimentos da Universidade Federal de Campina Grande (LEP/UFCG), conforme sugere o Asphalt Institute (2015), para que qualquer solvente residual seja removido.

As amostras do ligante foram coletadas nos momentos (i) após extração no rotarex; (ii) após rotoevaporação e estufa a vácuo e (iii) após o RTFO e submetidas, junto a uma amostra de ligante virgem (50/70), ao ensaio Espectroscopia de Infravermelho com

Transformada de Fourier (FTIR), no Laboratório LAMMEN da UFRN, para a observação do estado de envelhecimento e verificação da remoção do solvente.

O equipamento utilizado foi um Espectrômetro Bruker Vertex 70, com sonda ATR, na faixa de 4000 a 500 $\text{cm}^{-1}$ . Na Figura 27 pode-se observar nitidamente que a amostra pós-extração no rotarex apresenta picos de transmitância em 780, 845 e 930  $\text{cm}^{-1}$ , referente às ligações C-Cl do solvente tricloroetileno (TCE). O procedimento de recuperação do ligante realizado foi eficaz ao remover o solvente, conforme pode ser observado, quando o pico mencionado não é transmitido na amostra pós-recuperação.

**Figura 27** - Espectro FTIR das amostras recolhidas durante o processo de recuperação do ligante asfáltico do RAP



A observação dos espectros referentes às amostras pós-recuperação e pós-RTFO indicam que o procedimento de rotoevaporação e estufa a vácuo foram suficientes para a remoção do solvente, visto que não há diferença significativa na apresentação de picos.

O ligante do RAP apresenta oxidação, em comparação com a amostra de ligante 50/70 puro, observada na presença de picos de hidroxila (O-H) na banda leve de transmitância superior a 3000  $\text{cm}^{-1}$ , carbonilas de cetonas (C=O) em torno de 1700  $\text{cm}^{-1}$  e picos para estiramento simétrico de C-O em éteres e/ou álcoois na faixa entre 1020 e 1300  $\text{cm}^{-1}$ .

O ligante recuperado foi submetido à caracterização reológica, com ensaio de viscosidade rotacional, penetração, ponto de amolecimento e Grau de Desempenho (PG). Os resultados e normas utilizadas no procedimento encontram-se expostos na Tabela 4.

### 3.1.2 Ligante asfáltico

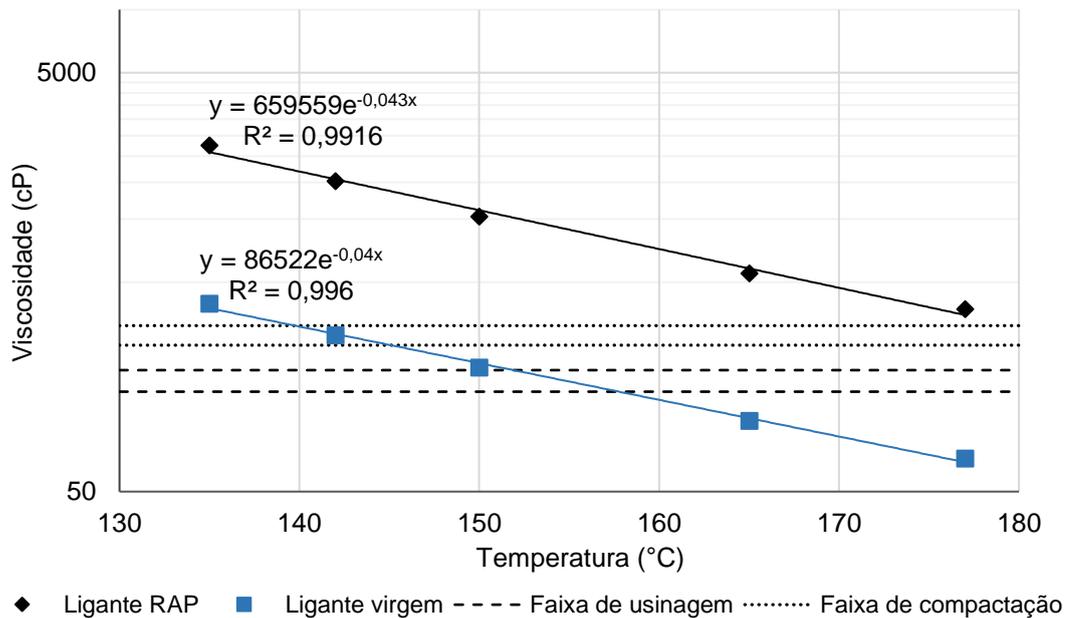
A escolha do ligante virgem, de acordo com a metodologia de dosagem de misturas asfálticas recicladas apresentada no item tal, deve ser feita com base no grau de desempenho da mistura esperada e do teor de RAP a ser adicionado. No entanto, assim como propõe He *et al.* (2018) esta pesquisa incorporou um ligante de menor viscosidade no intuito de “rejuvenescer” a mistura. Neste caso, o ligante asfáltico escolhido foi o de classificação 50/70, devido ao seu amplo uso em rodovias brasileiras. A caracterização do ligante, antes e após o envelhecimento de curto prazo na estufa RTFO (ASTM D2872/12), é apresentada na Tabela 4.

**Tabela 4** - Caracterização dos ligantes recuperado e virgem utilizados

Ensaio	Resultado			
	Ligante Recuperado	Ligante virgem		
		Antes RTFO	Após RTFO	
<b>Penetração (mm<sup>-1</sup>)</b>				
<b>DNIT 155/10 - ME</b>	16	57	33	
Penetração retida (%)	-	58,4		
Variação de massa (%)	-	0,4		
<b>Ponto de amolecimento (°C)</b>				
<b>DNIT 131/10 - ME</b>	71	52	58	
Índice de Susceptibilidade térmica	0,54	-0,38	-	
<b>Performance Grade (°C)</b>				
<b>ASTM D6816/11</b>	106	64	-	
<b>Viscosidade (cP)</b>	<b>135°C</b>	2250	395,0	716,0
	<b>142°C</b>	1521	279,3	523,3
	<b>150°C</b>	1030	195,5	408,5
	<b>165°C</b>	550	108,7	131,7
	<b>177°C</b>	372,5	72,0	98,8

Destacam-se a baixa penetração do ligante recuperado, em comparação ao ligante virgem; grau de desempenho (PG) e viscosidades elevados. As temperaturas de usinagem e compactação das misturas asfálticas são determinadas dentro das faixas de viscosidade de 170±20 cP e 280±30 cP, respectivamente, de acordo com o NCHRP Report 648 (2010). A Figura 28 apresenta as curvas viscosidade *versus* temperatura dos ligantes do RAP e virgem e nela pode-se observar que não é possível determinar uma temperatura de usinagem para o ligante do RAP com as temperaturas ensaiadas.

**Figura 28** - Curvas viscosidade versus temperatura para os ligantes virgem e recuperado do RAP



As temperaturas de usinagem e compactação do ligante do RAP foram estimadas utilizando a equação de tendência apresentada na Figura 28 e valem 192°C e 181°C, respectivamente. As temperaturas para as misturas do RAP com o ligante virgem foram determinadas pela Equação 11, desenvolvida por Wu *et al.* (2007) especificamente para a relação das temperaturas de usinagem e compactação de misturas recicladas, e são apresentadas na Tabela 5, juntamente com as obtidas diretamente do gráfico para a mistura de referência.

$$\ln T_b = W^{0,5} \ln T_r + (1 - W^{0,5}) \ln T_f \quad (\text{equação 11})$$

Onde,

$T_b$  é a temperatura ótima relevante da mistura de ligantes;

$T_r$  é a temperatura ótima relevante do ligante do RAP;

$T_f$  é a temperatura ótima relevante do ligante virgem;

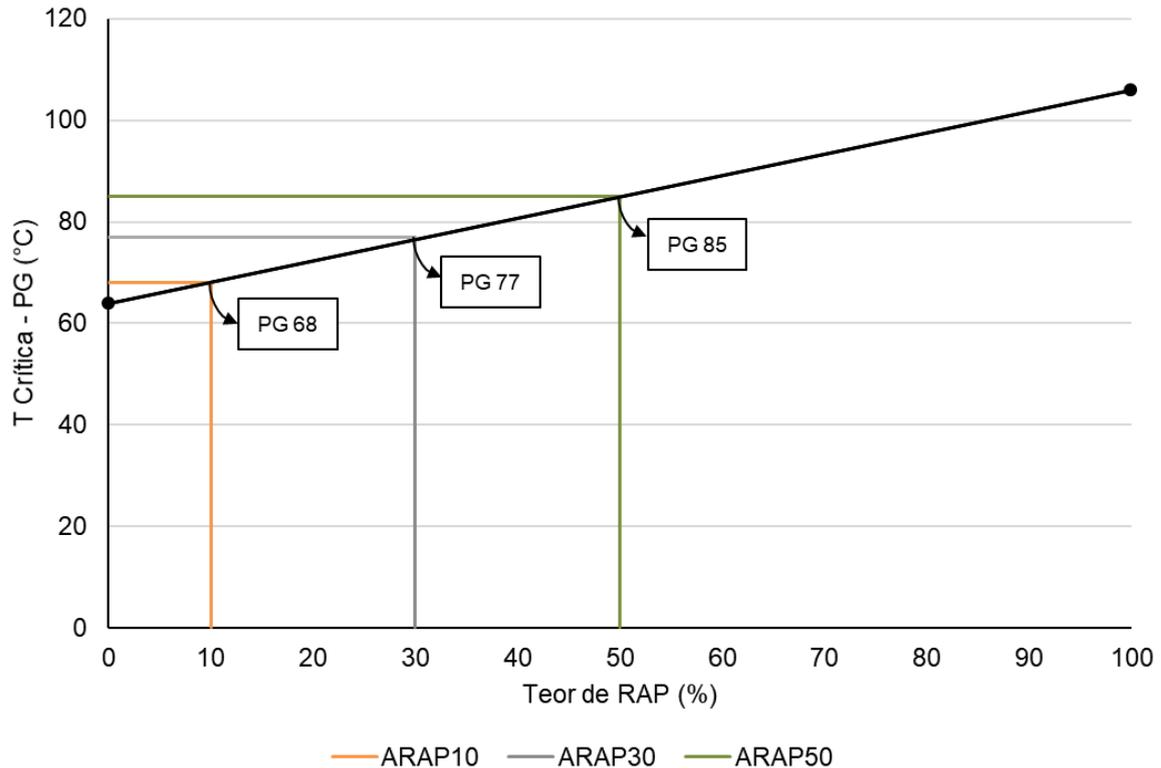
$W$  é o teor de RAP na mistura.

**Tabela 5** - Temperaturas de usinagem e compactação das misturas de referência e com RAP

Temperatura	AREF	ARAP10	ARAP30	ARAP50	Varição tolerável
<b>Usinagem (°C)</b>	156	166	175	181	±3°C
<b>Compactação (°C)</b>	143	154	163	169	±3°C

O *blending chart* que caracteriza as misturas estudadas é apresentado na Figura 29. A interpolação dos valores intermediários na reta que liga o PG do ligante virgem (64 °C) e do ligante recuperado (106 °C), nos teores de RAP estudados nesta pesquisa resultam em uma mistura final com PG 65, para 10% de RAP; com PG 77, para 30% de RAP e com PG 85, na mistura com 50% de RAP.

Figura 29 - *Blending chart* das misturas estudadas



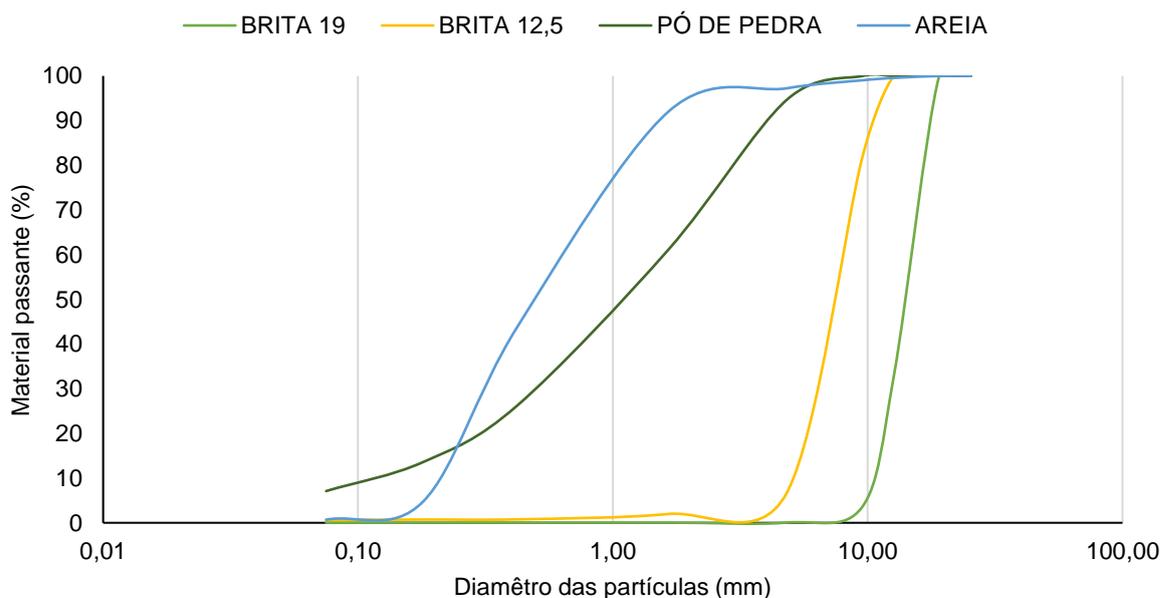
### 3.1.3 Agregados

Os agregados virgens utilizados nesta pesquisa são do tipo granítico e foram oriundos da pedreira Brita Forte, localizada na PB 032 – Km 32, município de Pedras de Fogo – PB, coletados nos tamanhos máximos nominais (TMN) 19 mm e 12,5 mm e pó de pedra granítica. A areia é proveniente do comércio local, adquirida com referência de origem ao Rio Paraíba. As propriedades físicas dos agregados podem ser consultadas na Tabela 6, e distribuições granulométricas, obtidas em ensaio de análise granulométrica por peneiramento (DNIT- ME 412/2019) na Figura 30. O fíler utilizado trata-se de Cal hidratada CH-1, também obtido no comércio local.

**Tabela 6** - Caracterização física dos agregados virgens

Ensaio	Norma	Resultados			
		Brita 19,0 mm	Brita 12,5 mm	Pó de pedra	Areia
<b>Massa específica real (g/cm³)</b>		2,668	2,665	2,513	2,626
<b>Massa específica aparente (g/cm³)</b>	DNIT 411/2019 DNIT 413/2019	2,636	2,616	2,475	2,481
<b>Absorção (%)</b>		0,460	0,706	0,600	0,140
<b>Equivalente areia (%)</b>	DNIT 054/1997	-	-	65	61
<b>Índice de forma</b>	DNIT 086/1994	0,89	0,70	-	-
<b>Abrasão Los Angeles (%)</b>	DNIT 035/1998	19,0	-	-	-
<b>Adesividade ao ligante asfáltico</b>	DNIT 078/1994	Insatisfatória	-	-	-

**Figura 30** - Distribuição granulométrica dos agregados virgens



Os agregados graníticos de 12,5 mm e pó de pedra apresentaram maiores valores de absorção que os demais, o que reflete no consumo de ligante das misturas; apresentaram boa equivalência de areia, uma vez que o mínimo estabelecido pela norma DNIT 031/2006 é de 55% e boa resistência à abrasão, estando acima do máximo de 50% estabelecido pela norma DNIT 031/2006.

A adesividade ao ligante asfáltico 50/70 foi insatisfatória, observada no descolamento da película de ligante do agregado sob a ação da água. A ocorrência desse descolamento pode ser explicada pela natureza silicática, ácida e hidrofílica do agregado granítico e impacta no desempenho da mistura frente aos danos por umidade (FROSSARD, 2021).

O uso de melhoradores de adesividade se faz necessário, neste caso. Dentre as principais técnicas de melhorar a adesividade ligante-agregado, o uso de fillers ativos, como a cal hidratada, é bastante difundido. Nos estudos de Moghadas Nejad, Hamedi e Azarhoosh (2013), o uso da cal hidratada diminuiu a polaridade do agregado, reduzindo a tendência de atração da água à superfície do agregado e, dessa forma, reduziu a acidez do agregado, o que melhorou a resistência ao dano por umidade.

## 3.2 Métodos

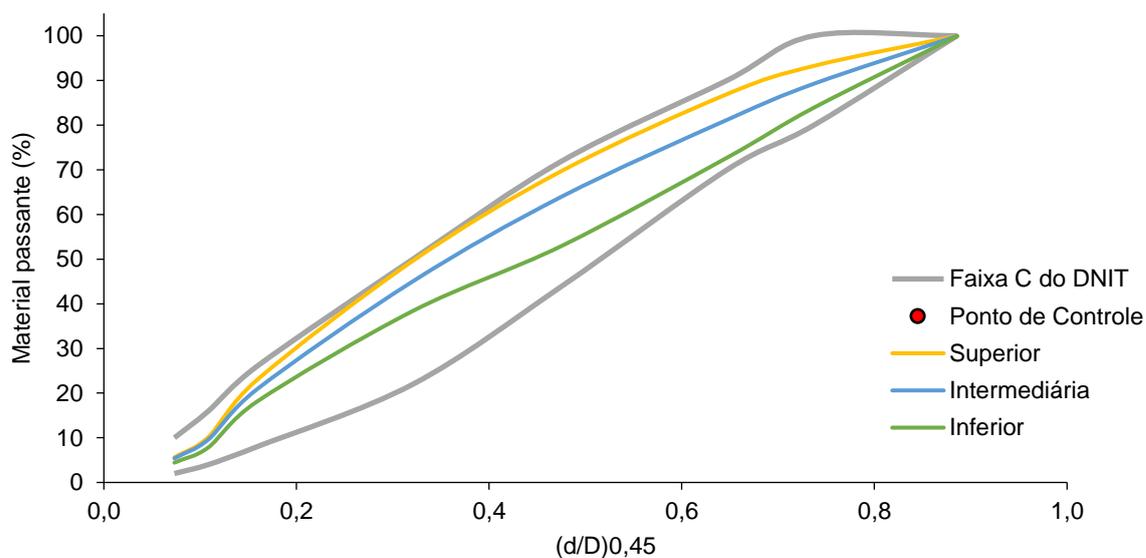
### 3.2.1 Dosagem Superpave

A dosagem de misturas asfálticas nesta pesquisa foi realizada pelo método Superpave, para nível de tráfego médio a alto e tamanho nominal máximo (TMN) 19,0 mm. A faixa adotada foi a de revestimento, faixa C do DNIT - ES 031/2006.

Para a mistura de referência, aqui denominada AREF, foram determinadas três composições granulométricas correspondentes às curvas superior, intermediária e inferior, dentro dos limites da faixa C do DNIT, apresentadas na Figura 31. Os corpos de prova com o teor de ligante estimado de 6% para cada curva, nos números de giro  $N_{inicial}$  (8 giros),  $N_{projeto}$  (100 giros) e  $N_{máximo}$  (160 giros) foram compactados em Compactador Giratório Superpave (CGS), de acordo com a norma ASTM D 6925-09. A

Tabela 7 apresenta os parâmetros volumétricos calculados VAM (vazios no agregado mineral) e  $V_v$  (volume de vazios) que embasam a escolha da melhor curva que, neste caso, foi intermediária.

**Figura 31** - Curvas granulométricas inferior, intermediária e superior da amostra de referência



**Tabela 7** - Parâmetros volumétricos das curvas inferior, intermediária e superior da amostra de referência

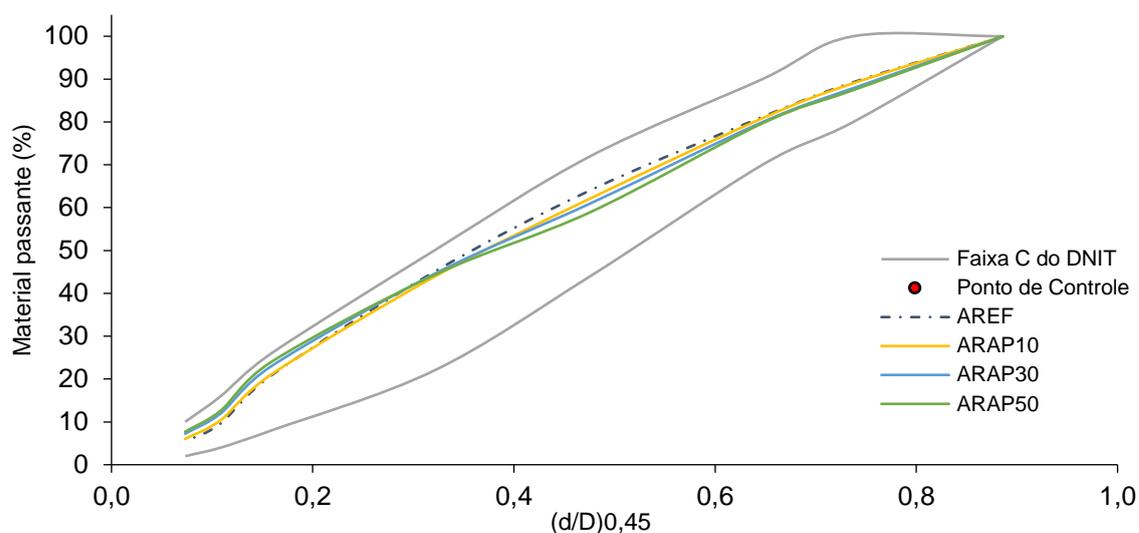
Curva	Teor de ligante (%)	%G <sub>mm</sub>			VAM (%)	Vv (%)
		@N <sub>Inicial</sub>	@N <sub>projeto</sub>	@N <sub>máximo</sub>		
Inferior	6,0	93,2	98,2	99,1	15,90	1,77
Intermediária	6,0	88,6	96,2	98,3	16,31	3,72
Superior	6,0	89,4	95,1	96,4	17,14	4,8
<b>Critério Superpave</b>		<89,0	96,0	<98,0	≥13,0	4,0

As amostras contendo 10% (ARAP10), 30% (ARAP30) e 50% de RAP (ARAP50) foram, então, projetadas para que apresentassem composições semelhantes à curva intermediária da amostra de referência (AREF). O percentual dos materiais nas misturas está apresentado na Tabela 8 e as distribuições granulométricas finais encontram-se apresentadas na Figura 32. A determinação do teor ótimo, no entanto, foi realizada para cada mistura individualmente e, os teores e parâmetros volumétricos obtidos, VAM, Vv, RBV (relação betume vazios) e relação pó-asfalto (P/A), estão apresentados na Tabela 9.

**Tabela 8** - Percentuais finais dos materiais nas misturas estudadas nesta pesquisa

Mistura	RAP (%)	Brita 19,0 mm (%)	Brita 12,5 mm (%)	Pó de Pedra (%)	Areia (%)	Fíller (%)
AREF	0	15,0	17,0	49,0	11,3	1,9
ARAP10	10	14,2	17,0	42,6	9,5	1,9
ARAP30	30	13,2	13,2	28,3	9,4	1,9
ARAP50	50	11,3	11,3	14,1	9,4	0,9

**Figura 32** - Curvas granulométricas finais das amostras de referência e com RAP



**Tabela 9** - Parâmetros volumétricos finais das misturas estudadas nesta pesquisa

Mistura	Teor de ligante		%G <sub>mm</sub> @N <sub>projeto</sub>	VAM (%)	Vv (%)	RBV (%)	P/A
	Total	Virgem					
AREF	5,8	5,8	96,5	19,72	3,9	67,17	0,9
ARAP10	5,3	4,9	96,1	18,02	4,1	67,05	1,1
ARAP30	5,3	4,0	96,3	18,38	4,2	64,98	1,2
ARAP50	5,3	3,1	96,1	16,30	4,1	74,03	1,2
<b>Crítérios SUPERPAVE</b>			96,0	≥13,0	4,0	65-75	0,6-1,2

As misturas com RAP apresentaram parâmetros volumétricos semelhantes, assim como o teor de ligante total. Supõe-se que isto se deva ao fato de parte da matriz de agregados da mistura já estar envolta de ligante, demandando menor quantidade para o preenchimento dos poros dos agregados virgens. Uma vez que a mistura é composta, em sua maioria, de agregados miúdos, o consumo de ligante da mistura sem RAP é evidenciado.

### 3.2.2 Protocolo de envelhecimento

Nesta pesquisa, as misturas de referência e recicladas foram submetidas ao envelhecimento para a comparação do comportamento mecânico a curto e longo prazos. As misturas de referência e com 50% de RAP foram envelhecidas neste protocolo. O teor de 50% foi escolhido por ser o maior teor avaliado nesta pesquisa e, portanto, será possível observar com mais clareza uma possível influência do ligante do RAP neste aspecto.

O protocolo aplicado nesta pesquisa corresponde à norma AASHTO PP2-01 e consiste no envelhecimento em duas etapas: o envelhecimento de curto prazo (*Short Term Oven*

Ageing – STOA) seguido do envelhecimento de longo prazo (*Long Term Oven Ageing – LTOA*).

Para a realização do STOA, a mistura asfáltica recém usinada foi disposta em bandejas em estufa por 4 horas a 135°C. A cada 1 hora, a mistura era revolvida e redistribuída na bandeja, para que o calor atingisse uniformemente toda a superfície específica do ligante envolto dos agregados. Após este período de 4 horas, as misturas foram reaquecidas às temperaturas de compactação, por cerca de 1 hora e, em seguida, compactadas no CGS. Os corpos de prova resultantes foram levados à estufa aquecida a 85°C por 5 dias, como pode ser observado na Figura 33 e, após este período, foram acondicionados para resfriamento à temperatura ambiente por, pelo menos, 24 horas, até que pudessem ser realizados os ensaios de resistência à tração por compressão diametral, módulo de resiliência, resistência do dano por umidade induzida, resistência à deformação permanente, vida de fadiga por compressão diametral à tensão controlada e a medida de autorregeneração (Figura 34).

**Figura 33** - Corpos de prova em estufa a 85°C por 5 dias para simulação do envelhecimento



**Figura 34** - Corpos de prova acondicionados à temperatura ambiente após o envelhecimento



### 3.2.3 Ensaios mecânicos

O comportamento mecânico das misturas com RAP foi avaliado mediante a realização de ensaios de laboratório, cujos resultados foram comparados à mistura de referência. Nesta pesquisa foram realizados ensaios de resistência à tração por compressão diametral, módulo de resiliência, resistência à deformação permanente, dano por umidade induzida e vida de fadiga, de acordo com os procedimentos e normas descritos nos itens subsequentes.

#### 3.2.3.1 Resistência à tração por compressão diametral

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral (RT) foi realizado de acordo com a norma DNIT- ME 136/18, para todas as misturas envelhecidas e não-envelhecidas, a uma temperatura de 25°C. O procedimento consiste na aplicação de duas forças diametralmente opostas em um corpo de prova cilíndrico de dimensões conhecidas, produzido com um volume de vazios de cerca de 4%.

A prensa utilizada aplica o carregamento estático a uma velocidade de  $0,8 \pm 0,1$  mm/s em frisos metálicos que, por sua vez, comprimem o corpo de prova no plano diametral, gerando uma tensão de tração uniforme no plano perpendicular ao diâmetro. A resistência à tração foi calculada a partir da Equação 12.

$$\sigma_t = \frac{2F}{\pi DH} \quad (\text{equação 12})$$

Onde,

$\sigma_t$  é a resistência à tração;

F é a carga de ruptura;

D é o diâmetro do corpo de prova;

H é a altura do corpo de prova.

Foram ensaiados quatro corpos de prova por mistura e avaliados os valores médios e desvio padrão.

#### 3.2.3.2 Módulo de Resiliência

O parâmetro de rigidez das misturas asfálticas avaliadas nesta pesquisa foi medido a partir de ensaio de módulo de resiliência, realizado de acordo com a norma NBR 16018/2011, na configuração de compressão diametral sob carga repetida.

Os ensaios foram realizados a 25°C em uma prensa hidráulica do tipo UTM-25 (*Universal testing machine*), da IPC Global® com corpos de prova compactados no CGS de cerca de 4% de volume de vazios. A força aplicada foi de 10% da resistência à tração, a uma

frequência de carregamento de 1Hz, no plano diametral, gerando uma deformação resiliente no plano horizontal medida por dois LVDTs (*Linear Variable Differential Transducer*).

Foram ensaiados dois corpos de prova por misturas e avaliados os valores médios e desvio padrão.

### 3.2.3.3 *Dano por umidade induzida*

A avaliação à resistência por umidade induzida verifica a sensibilidade da mistura asfáltica à ação deletéria da água, e fornece uma medida indireta de adesividade ligante-agregado e coesão das misturas em condições de gelo e degelo acelerados.

O ensaio foi realizado seguindo o método descrito na norma DNIT - ME 180/2018, em corpos de prova moldados no CGS com  $7\pm 0,5\%$  de volume de vazios. Para a mistura de referência, este volume de vazios foi obtido com a aplicação de 30 giros no CGS, enquanto para as amostras com RAP foram necessários 45 giros.

Seis corpos de prova (CPs) foram divididos em dois grupos: três a serem condicionados e três não condicionados. O condicionamento consistiu na aplicação de um vácuo de corpos de prova submersos, até a obtenção de 55% a 80% de saturação, seguido do congelamento a  $-18,0\pm 3,0^\circ\text{C}$  por um período mínimo de 16h. Em seguida, os CPs foram levados a um banho a  $60^\circ\text{C}$  por 24h, depois tiveram sua temperatura estabilizada a  $25^\circ\text{C}$  e então, ambos os grupos foram submetidos ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral.

A razão entre os valores médios de resistência à tração condicionada ( $RT_c$ ) e não condicionada ( $RT_{nc}$ ) é tida como resistência retida à tração (RRT) (Equação 13). A norma DNIT 180/2018 estipula uma RRT mínima de 70% para a classificação de resistente à ação da água.

$$RRT(\%) = \frac{RT_c}{RT_{nc}} \times 100 \quad (\text{equação 13})$$

### 3.2.3.4 *Resistência à deformação permanente*

A resistência à deformação permanente foi medida por meio do ensaio uniaxial de carga repetida normatizado pela DNIT - ME 184/2018. Dois corpos de prova de aproximadamente 150 mm de altura foram produzidos em compactador giratório SUPERPAVE, com volume de vazios de  $7\pm 0,5\%$ , para cada mistura não-envelhecida, e para as misturas de referência e 50% de RAP envelhecidas (AREF-E e ARAP50-E).

Os CPs foram mantidos em estufa ventilada a  $60^\circ\text{C}$  durante um período de 3 horas, até que a temperatura estivesse estável e, em seguida, realizou-se o rompimento. O equipamento utilizado foi uma prensa AMPT (*Asphalt Mixture Performance Tester*), da IPC

Global®, que aplicou um carregamento cíclico uniaxial de 204 kPa em formato de onda *haversine* de 0,1 s de pulso seguido de 0,9 s de repouso. O ensaio foi realizado até que fossem aplicados 7.200 ciclos ou a deformação atingisse 50 000 *microstrains*. Quando o ensaio é encerrado pelo critério de deformação, a amostra atinge a zona terciária (de deformações plásticas) durante a rotina e o *Flow Number* corresponde ao *Flow Point*, definido como o ponto de inflexão da curva de deformação. Quando interrompido pelo critério de número de ciclos, o *Flow Point* deve situar-se além do *Flow Number*.

### 3.2.3.5 Vida de fadiga

Esta pesquisa adotou o procedimento da norma DNIT - ME 183/2018 para obtenção da vida de fadiga por compressão diametral à tensão controlada. Os níveis de tensão adotados foram 40%, 37,5%, 35% e 32,5% da resistência à tração de cada mistura e três corpos de prova foram ensaiados para cada nível. Estes CPs foram compactados em CGS com o  $N_{projeto}$  de 100 giros, e dimensões de 100 mm de diâmetro e 65 mm de espessura, aproximadamente. A aplicação da tensão foi feita utilizando a prensa UTM-25 da IPC Global®, em pulsos *haversine* de 1Hz e o ensaio foi conduzido até a ruptura dos CPS.

Determinados os números de ciclos até a ruptura (N) de todas as amostras, foram plotadas curvas de *Wöhler* relacionando N e a diferença de tensões no centro da amostra ( $\Delta\sigma$ ), e relacionando N à deformação de tração inicial ( $\epsilon_i$ ), em gráfico log-log. O critério de aceitação dos valores de vida de fadiga são o  $R^2$  mínimo de 0,8 em ambas as representações gráficas.

### 3.2.4 Mensuração de autorregeneração

Esta pesquisa avaliou a autorregeneração das misturas asfálticas por meio da verificação da diferença na vida de fadiga antes e após um período de repouso aquecido, baseado no método descrito na pesquisa de Mullapudi *et al.* (2020). As medidas de autorregeneração foram conduzidas nas amostras AREF, ARAP10, ARAP30, ARAP50, AREF-E e ARAP50-E.

Após a determinação do número de ciclos correspondentes à ruptura dos corpos de prova no ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada foram calculados os números de ciclos correspondentes a 25%, 50% e 75% desta vida de fadiga. Estas frações representam os três níveis de dano avaliados, impostos a outros corpos de prova, nos mesmos níveis de tensão e cargas utilizadas no ensaio de vida de fadiga. A identificação dos corpos de prova nesta etapa da pesquisa é apresentada no Quadro 2.

**Quadro 2** – Nomenclaturas e descrição das amostras na etapa de autorregeneração

<b>Teor de RAP e condição de envelhecimento</b>	<b>Porcentagem do dano à fadiga</b>	<b>Identificação do CP</b>
<b>0%</b>	25%	0%25F
	50%	0%50F
	75%	0%75F
<b>0%-E</b>	25%	0%E25F
	50%	0%E50F
	75%	0%E75F
<b>10%</b>	25%	10%25F
	50%	10%50F
	75%	10%75F
<b>30%</b>	25%	30%25F
	50%	30%50F
	75%	30%75F
<b>50%</b>	25%	50%25F
	50%	50%50F
	75%	50%75F
<b>50%-E</b>	25%	50%E25F
	50%	50%E50F
	75%	50%E75F

Após a etapa de aplicação do dano, os CPs foram envoltos em um molde de PVC, com abraçadeira metálica, a fim de simular o confinamento da massa asfáltica em uma seção de pavimento (Figura 35 (a)). Para induzir a autorregeneração das misturas, o conjunto amostra+molde foi mantido em estufa por 4 horas a uma temperatura de 45°C (Figura 35 (b)), que, segundo Porto (2019), é a temperatura superficial média aproximada de operação do pavimento sem tráfego na Região Nordeste. Após este período, os corpos de prova foram mantidos em temperatura ambiente por, no mínimo 24 horas, até que pudessem ser ensaiados novamente. O ensaio de vida de fadiga posterior à autorregeneração foi realizado com os mesmos níveis de tensão e cargas anteriormente definidos, de acordo com a norma DNIT 183/18 – ME, até a ruptura completa das amostras com RAP e envelhecidas.

Para a observação da regeneração das trincas resultantes do processo de imposição de dano, o plano de aplicação de cargas foi marcado na superfície do corpo de prova e, durante a montagem do aparato para ensaio de vida de fadiga após a autorregeneração, este plano foi novamente solicitado (Figura 35 (c) e (d)).

O índice de autorregeneração foi calculado pela Equação 14 (MULLAPUDI *et al.*, 2020):

$$IA(\%) = \frac{N_{\text{após autorregeneração}}}{N_{\text{inicial}}} \times 100 \quad (\text{equação 14})$$

Onde,

$N_{\text{após autorregeneração}}$  é o número de ciclos suportado até a ruptura após o período de confinamento em estufa;

$N_{\text{inicial}}$  é o número de ciclos suportado até a ruptura no ensaio de fadiga inicial

Para mensurar a extensão percentual da vida de fadiga (EF) obtida após a autorregeneração, nas condições não envelhecida e envelhecida, foi utilizada a Equação 15, que considera o dano imposto ao corpo de prova como parte da vida de fadiga resistida.

Assim:

$$EF (\%) = \left( \frac{\%N + N_{\text{após autorregeneração}}}{N_{\text{inicial}}} - 1 \right) \times 100 \quad (\text{equação 15})$$

Onde,

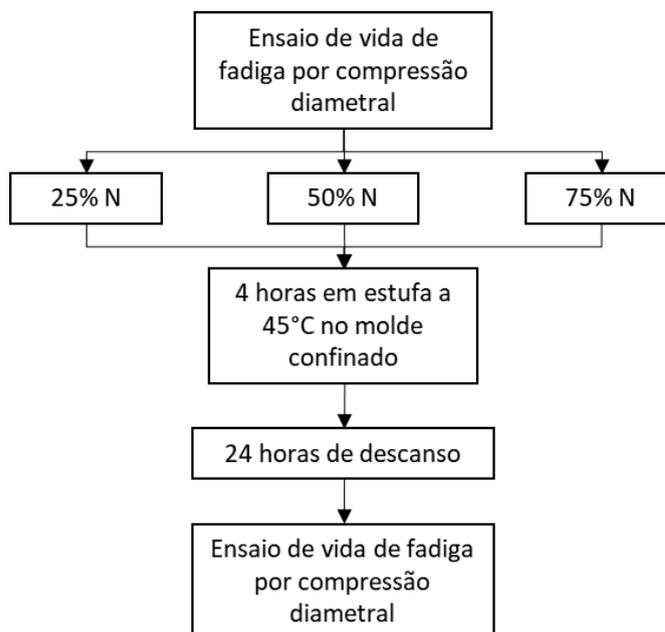
$\%N$  é o número de ciclos correspondente ao nível de dano (25, 50 e 75%).

**Figura 35** - Procedimento para mensuração da autorregeneração: (a) confinamento do CP no molde PVC após ciclos de dano; (b) CPS em estufa a 45°C por 4 horas; (c) plano de indução das trincas marcado na superfície do CP e (d) posicionamento do CP no aparato do ensaio



O esquema apresentado na Figura 36 busca explicar sucintamente esta metodologia.

**Figura 36** - Fluxograma do procedimento utilizado na mensuração da capacidade de autorregeneração



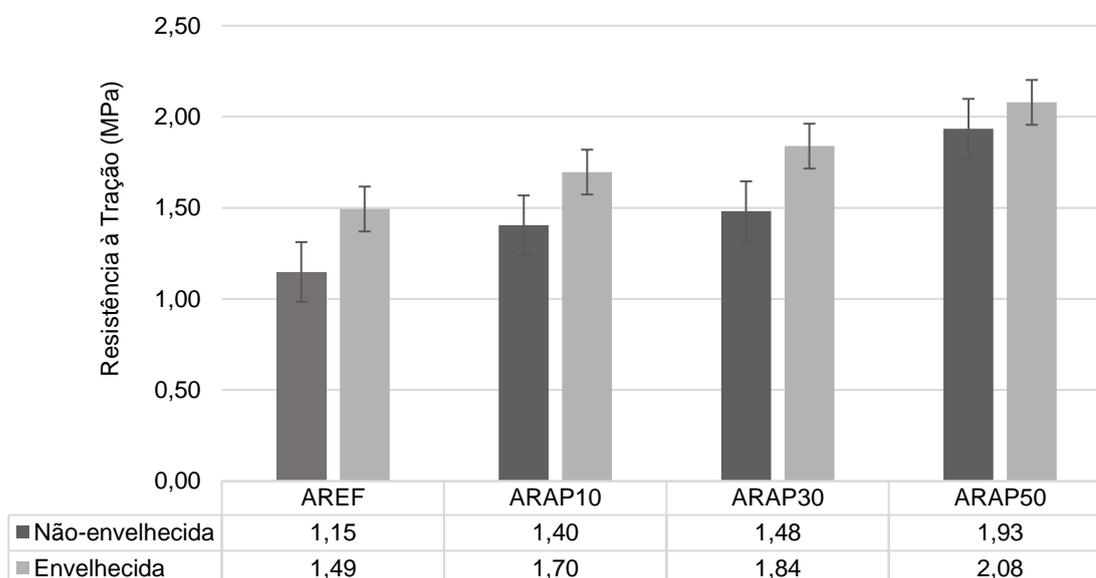
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção são apresentados os resultados dos ensaios mecânicos das misturas recicladas com e sem envelhecimento, e da mensuração do fenômeno de autorregeneração. As interpretações e discussões foram baseadas na literatura apresentada no capítulo de revisão bibliográfica.

### 4.1 Resistência à tração por compressão diametral - RT

Os valores médios e desvio padrão de RT de 4 CPs das misturas avaliadas nesta pesquisa, antes e após o envelhecimento, é apresentada na Figura 37.

**Figura 37** - Resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral nas amostras não-envelhecidas e envelhecidas



Todas as misturas ensaiadas atenderam ao critério da norma DNIT- ME 031/2006, de um valor mínimo de 0,65 MPa, nas condições não-envelhecida e envelhecida. Como pode ser observado, há uma tendência de aumento do valor de RT à medida em que se aumenta o teor de RAP. A adição de 50% de RAP tornou a mistura 67,8% mais resistente à tração, enquanto os valores intermediários promoveram um aumento semelhante entre si, mas inferiores aos das amostras com 50% de RAP, sendo 21,7% para mistura ARAP10 e 28,7% para a mistura ARAP30. Estes aumentos ainda se mostram significativos em relação à amostra de referência.

O envelhecimento também foi capaz de promover o aumento da resistência à tração em todas as misturas avaliadas. Na amostra de referência houve um aumento de cerca de 30%, enquanto nas amostras com RAP este aumento foi de 21,4%, 24,3% e 7,8%, para os teores de 10, 30 e 50% de RAP, respectivamente.

Este comportamento ocorreu devido à ação do ligante oxidado proveniente da adição de RAP na mistura e do processo de envelhecimento, comportamento análogo foi observado

nas pesquisas de Centofante (2016), Suzuki (2019), Luzzi (2019) e Zappe (2020). Entretanto, a magnitude do aumento dos valores de RT também pode ser atribuída à presença de polímero no ligante do RAP.

A norma DNIT - ME 385/99, que regulamenta as propriedades de misturas asfálticas modificadas com polímero, determina que possuam valores de RT entre 0,7 e 1,2 MPa. As misturas com RAP aqui observadas se mostraram mais resistentes e isto indica a combinação de rigidez entre a existência de um material polimérico e do fenômeno do envelhecimento.

Um aspecto importante do rompimento dos corpos de prova à tração nesta pesquisa foi a observação do momento do rompimento. Nas amostras AREF, ARAP10 e ARAP30, os CPS apresentaram o desenvolvimento de trincas até a perda de resistência (Figura 38 (a), (b) e (c), respectivamente), mas a mistura com maior teor de RAP (ARAP50) apresentou perda de resistência, sem aspecto superficial de trincas, porém, a continuidade da aplicação da carga gerou o rompimento súbito (Figura 38 (d) e (e)), observado também em todas as misturas submetidas ao envelhecimento.

**Figura 38** - Corpos de prova rompidos após ensaio de tração por compressão diametral, das misturas: (a) AREF; (b) ARAP10; (c) ARAP30; (d) e (e) ARAP50.



Zappe (2020) evidencia que em um ensaio como a resistência à tração por compressão diametral, algumas propriedades tais como a coesão da mistura e o tipo do esqueleto pétreo se destacam e ditam o comportamento do material durante o teste. Portanto,

considerando que a matriz de agregados é semelhante em todas as misturas avaliadas nesta pesquisa, a coesão/adesão parece ser fator fundamental na resistência de misturas asfálticas recicladas, e está ligada à capacidade de ligação entre ligante-ligante e ligante-agregado.

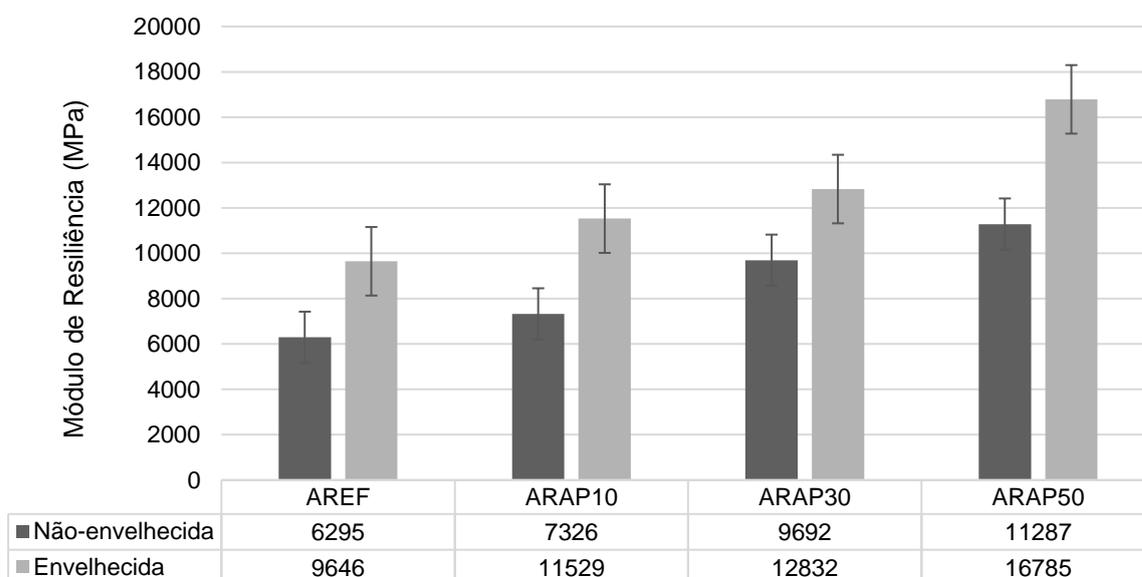
Há uma parcela de ligante oxidado mais profundamente aderido ao agregado do RAP, cujo processo de extração foi incapaz de remover e, que conseqüentemente, não foi contabilizada. Este ligante faz com que a absorção do agregado do RAP seja naturalmente reduzida, visto que seus poros já se encontram parcialmente preenchidos e, desta forma, a quantidade de ligante disponível (teor efetivo) no mastique seria maior que em uma mistura virgem.

A propriedade de adesão ao agregado será mais detalhadamente discutida no item 4.3 desta seção, que trata dos resultados do ensaio de dano por umidade induzida, todavia, quanto à resistência à tração de uma mistura reciclada com 4% de volume de vazios, pode-se afirmar que o teor efetivo e nível de oxidação do ligante exercem papel fundamental no resultado esperado.

#### 4.2 Módulo de Resiliência - MR

Os valores médios e desvio padrão de MR a 25°C, referentes à 10% da carga de RT das misturas estudadas nesta pesquisa, estão apresentados na Figura 39.

**Figura 39** - Resultados do ensaio de módulo de resiliência para todas as misturas avaliadas antes e após o envelhecimento



A partir da análise da Figura 39 é possível observar a influência do RAP na rigidez das misturas. O módulo de resiliência, assim como a resistência à tração, aumentou com o aumento do teor de RAP nas misturas. A mistura com maior teor possui MR 79% superior ao

da amostra de referência e os teores intermediários, 10% e 30% de RAP, promoveram um aumento de 16% e 54%, respectivamente.

Os valores obtidos para as misturas não-envelhecidas estão dentro do esperado, uma vez que corroboram com as pesquisas de Gennessaux (2015), Centofante (2016), Luzzi (2019), Suzuki (2019) e Zappe (2020).

Luzzi (2019) verificou que há uma relação entre o teor de ligante total das misturas e seus respectivos módulos de resiliência, ao observar que a tendência de aumento do valor de MR concomitante ao aumento do teor do RAP seguiu-se, exceto para a mistura com o maior teor avaliado (30%) em sua pesquisa. O autor atribuiu o pequeno decréscimo obtido à diminuição da rigidez associada ao maior teor de ligante total. As misturas com RAP avaliadas no presente estudo foram dosadas com o mesmo teor de ligante total (5,3%), enquanto a mistura de referência possuiu o maior teor de ligante (5,8%). Ainda que tenha sido observada a dificuldade em mensurar precisamente a quantidade de ligante aderida ao agregado do RAP, esta não traria diferenças significativas no teor de ligante total, o que esclarece e se enquadra no observado por Luzzi (2019).

Suzuki (2019) observou que a maior rigidez das misturas, principalmente com altos teores de RAP, está ligada ao fato de o ligante reciclado possuir elevada oxidação. A autora também aponta para o processo de usinagem das misturas que, quando submetidas a elevadas temperaturas, ativam o ligante residual do material reciclado. Em semelhança à sua pesquisa, o ligante residual era modificado naquele caso, com borracha e, neste caso, com polímero.

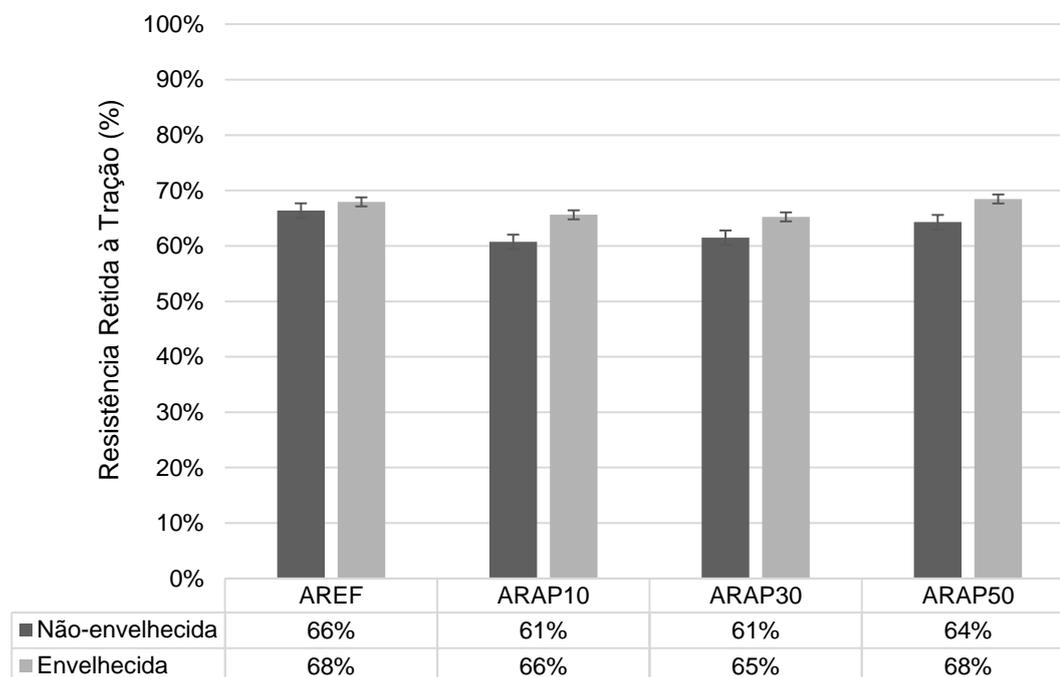
Quanto aos valores das misturas submetidas ao envelhecimento, observou-se que este processo atua diretamente na rigidez das misturas asfálticas, perceptível pela diferença nos valores de MR de cada amostra, quando comparadas as condições envelhecida e não-envelhecida. A mistura com 50% de RAP destoou das demais, quando apresentou MR da amostra envelhecida aproximadamente 49% superior à amostra não envelhecida, o que se deve à combinação das ações do ligante oxidado do RAP com polímero, ainda mais oxidado pelo envelhecimento adicional, e do ligante virgem, agora envelhecido.

Os valores elevados de MR podem não significar um aspecto positivo da mistura, pois indicam uma elevada rigidez da camada de revestimento, de difícil compatibilização com as camadas de suporte.

#### **4.3 Resistência ao dano por umidade induzida**

A Figura 40 apresenta os resultados de resistência retida à tração (RRT) para todas as misturas avaliadas.

**Figura 40** - Resistência retida à tração das amostras de referência e com RAP estudadas, antes e após o envelhecimento



A partir da observação dos resultados, nota-se que a adição de RAP não prejudicou a resistência à ação deletéria da água nas misturas asfálticas - o que pode ser positivamente avaliado -, tampouco melhorou-a. Embora nenhuma amostra tenha atendido ao critério de valor mínimo de 70%, definido pela norma DNIT - ME 031/2006, não é possível estabelecer alguma correlação entre a adição de RAP e os resultados obtidos. Da mesma forma, o efeito do envelhecimento foi insignificante na comparação entre cada amostra envelhecida e não envelhecida.

Zhao *et al.* (2012) afirmam que é evidente que a adição de RAP não prejudica a resistência ao dano por umidade de misturas asfálticas e que é possível, portanto, afirmar que elas são resistentes à umidade. Suzuki (2019) também obteve bons resultados de RRT, em testes de dano por umidade induzida realizados segundo os procedimentos da norma AASHTO T 283 (2021) e atribuiu isto ao condicionamento realizado, à ativação do ligante modificado do RAP e à presença de cerca de 1,5% de cal hidratada como melhorador de adesividade.

Embora esta pesquisa tenha adotado a cal hidratada (CHI) como fíler, atribui-se o dano por umidade induzida ao não atendimento do critério de adesividade ligante-agregado virgem na mistura de referência, cujo resultado foi apresentado no item 3.1.3 da metodologia, evidenciando que a natureza ácida e hidrofílica do agregado granítico utilizado tende a atrair a água e repelir o ligante asfáltico de sua superfície.

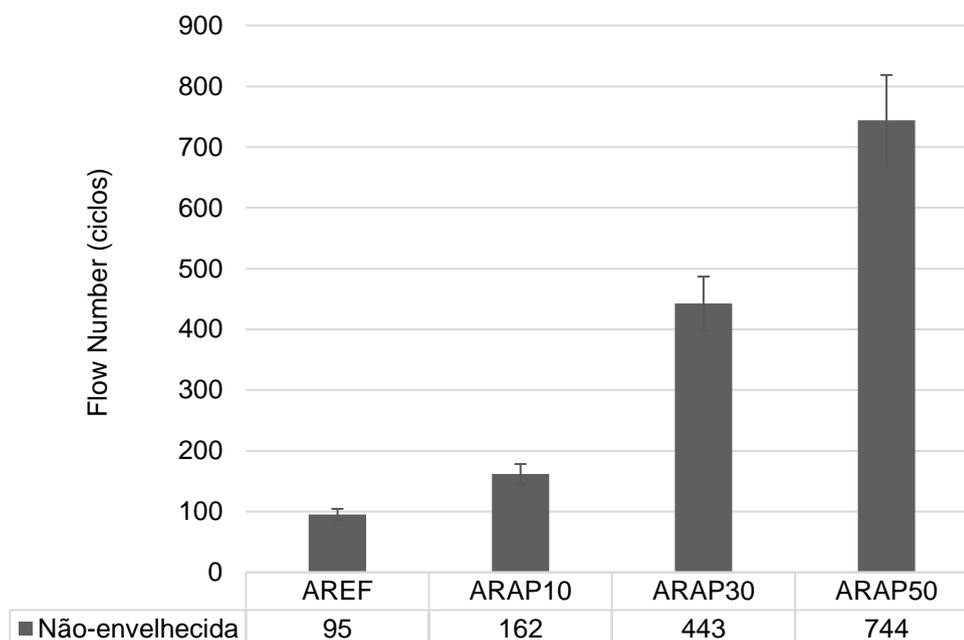
Nas misturas com RAP, além da adesividade do agregado virgem ao ligante virgem, a adesividade do agregado virgem ao ligante envelhecido também parece ser importante. O fato de possuir elevada viscosidade pode dificultar a penetração do ligante do RAP aos poros do agregado, formando, assim, pontos de susceptibilidade à ação da água e favorecer a falha de adesividade.

Veeraragavan *et al.* (2017) afirmam que, ainda que um ligante mais mole possa contribuir no rejuvenescimento da amostra, não cumpre o papel de um agente rejuvenescedor. Mas, para a correta avaliação do desempenho de um agente no aspecto de susceptibilidade à ação da água, é preciso avaliar melhor e otimizar a dosagem das misturas recicladas rejuvenescidas para manter as propriedades mecânicas-alvo.

#### 4.4 Resistência à deformação permanente

O acúmulo de deformações permanentes, medido em ciclos de Flow Number, é apresentado na Figura 41 para as misturas não-envelhecidas.

**Figura 41** - Resultados dos ensaios de resistência à deformação permanente das misturas não-envelhecidas



A resistência à deformação permanente cresceu significativamente com o aumento do teor de RAP, e este fato se deve à rigidez elevada no ligante do RAP, capaz de conter o acúmulo de deformações. Os estudos de Bohn *et al.* (2020) apresentaram resultados semelhantes aos aqui encontrados, comparando a mistura com RAP desta pesquisa à mistura com RAP e ligante modificado com polímero naquela, ainda que tenha sido utilizado a técnica morna. Esta comparação permite observar a influência do polímero do RAP nos resultados

de deformação permanente e indicam a importância de conhecer as propriedades do RAP utilizado.

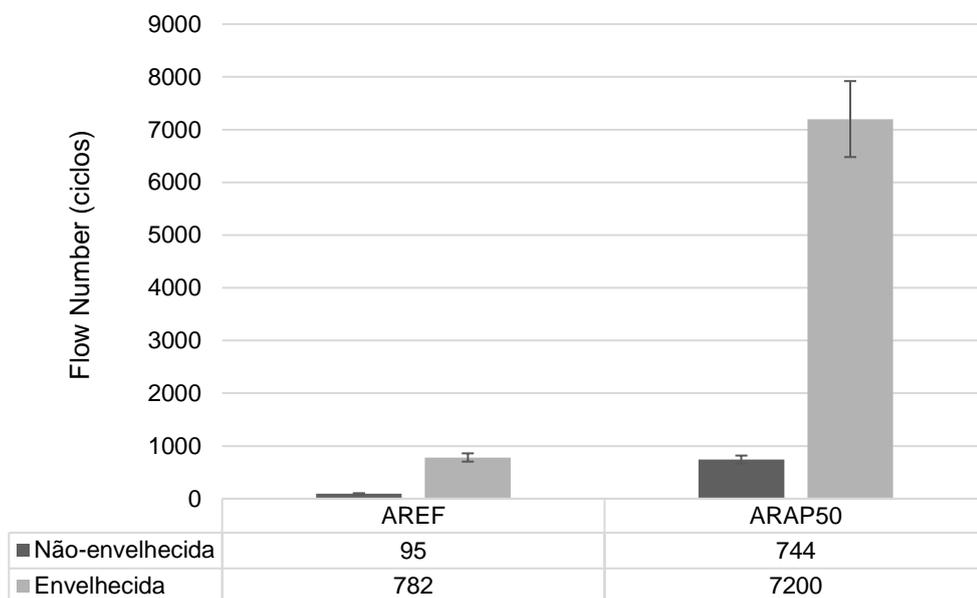
O estudo de Luzzi (2019), no entanto, demonstra o comportamento contrário ao observado nesta pesquisa quando apresenta que, dentre as misturas recicladas, quanto maior o teor de RAP, menor o *Flow Number*. Este comportamento foi atribuído à quantidade de ligante total em cada mistura, pois a mistura com o maior teor de RAP (30%), tinha o maior teor total de ligante (5,39%), enquanto a mistura com menor teor de RAP (10%) teve 0,5% menos ligante, sobressaindo à influência do teor de material fresado.

Nas misturas estudadas na presente pesquisa, o teor de ligante total foi semelhante para todas as misturas com RAP, eximindo a influência da variação do teor de ligante total na resistência à deformação permanente. O fato de o ligante RAP utilizado ser modificado por polímero torna o ligante mais resistente à deformação. A mistura ARAP50 foi 7,8 vezes mais resistente à deformação que a de referência; 4,6 vezes maior que a mistura ARAP10 e 1,7 vezes maior que a mistura ARAP30, o que indica que o aumento na concentração de polímero na mistura, além da boa difusão entre ligantes, exercem forte influência na resistência à deformação permanente.

A mesma observação foi a conclusão dos estudos de Kodippily *et al.* (2015) e Liphardt *et al.* (2016) sobre a influência do polímero como modificador do ligante do RAP nas propriedades funcionais de misturas asfálticas recicladas. Os autores observaram que a existência do polímero aumenta a resistência à deformação permanente e reduz, em até cinco vezes, a profundidade do sulco no afundamento trilha de roda.

O efeito do envelhecimento na deformação permanente de misturas recicladas é pouco explorado na literatura. Nesta pesquisa, foi avaliado na comparação entre a mistura de referência e a mistura com maior teor de RAP desta pesquisa. Os resultados de *Flow Number* para estas misturas estão apresentados na Figura 42.

**Figura 42** - Resultados dos ensaios de resistência à deformação permanente das misturas de referência e com 50% de RAP, não-envelhecidas e envelhecidas

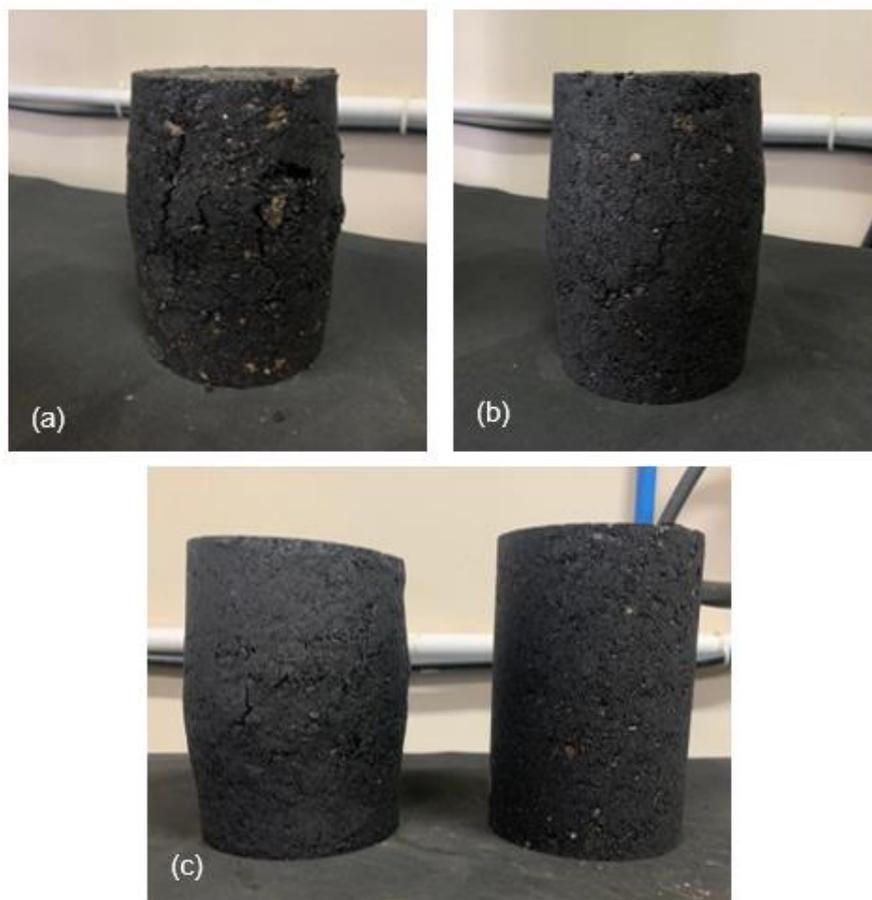


O efeito do envelhecimento foi mais notório na amostra com RAP do que na amostra de referência. A amostra envelhecida contendo 50% de RAP (ARAP50-E) não apresentou *Flow Point* durante a rotina de ensaio, motivo pelo qual o *Flow Number* registrado foi o número de ciclos máximo adotado pela norma. A deformação observada ao final do ensaio foi de 4882  $\mu\epsilon$  (*microstrains*), cerca de 35% do valor observado na amostra ARAP50, que foi de 13811  $\mu\epsilon$ .

Na Figura 43 (a) e (b) pode-se observar o aspecto visual dos CPS referentes às misturas AREF e ARAP50 submetidos ao ensaio de Flow Number, e na Figura 43 (c), à esquerda, a mistura AREF-E e à direita, a mistura ARAP50-E. As misturas AREF e AREF-E apresentaram uma deformação semelhante no *Flow Point*, de cerca de 13 000  $\mu\epsilon$ .

Os resultados obtidos corroboram com Gennessaux (2015), que simulou o afundamento trilha de roda utilizando o simulador de tráfego francês LPC, e observou que as misturas à quente e mornas contendo RAP submetidas ao envelhecimento possuem maior resistência à deformação permanente e menores valores de ATR, devido ao enrijecimento do ligante asfáltico. No caso do presente estudo, atribui-se o elevado valor de FN e a pequena deformação observada na mistura ARAP50-E à combinação do enrijecimento do ligante final, resultado da combinação do ligante previamente envelhecido do RAP, da presença do polímero no RAP e do envelhecimento adicional do ligante virgem, tornando a mistura pouco susceptível à ocorrência do afundamento trilha de roda.

**Figura 43** - Corpos de prova após o ensaio de Flow Number: (a) mistura AREF; (b) mistura ARAP50; (c) misturas AREF-E (à esquerda) e ARAP50-E (à direita).



## 4.5 Vida de Fadiga

### 4.5.1 Efeito do RAP no trincamento por fadiga de misturas asfálticas recicladas

Os gráficos de Wöhler para os resultados de número de ciclos ( $N$ ) *versus* diferenças de tensões ( $\Delta\sigma$ ) e números de ciclos ( $N$ ) *versus* deformação específica resiliente ( $\epsilon_i$ ) estão apresentados nas Figura 44 e Figura 45, para as misturas de referência e recicladas não envelhecidas avaliadas nesta pesquisa.

A Tabela 10 apresenta as equações, coeficientes de determinação ( $R^2$ ) e coeficientes  $K_i$  e  $n_i$  das Equações 7 e 8, obtidos a partir das retas de tendência do gráfico. Como critério de aceitação dos resultados, adotou-se o que determina a norma DNIT - ME 183/2018, como um valor de  $R^2$  mínimo de 0,8 para todas as linhas de tendência.

Figura 44 - Número de ciclos até a ruptura versus diferença de tensões para as amostras não-envelhecidas

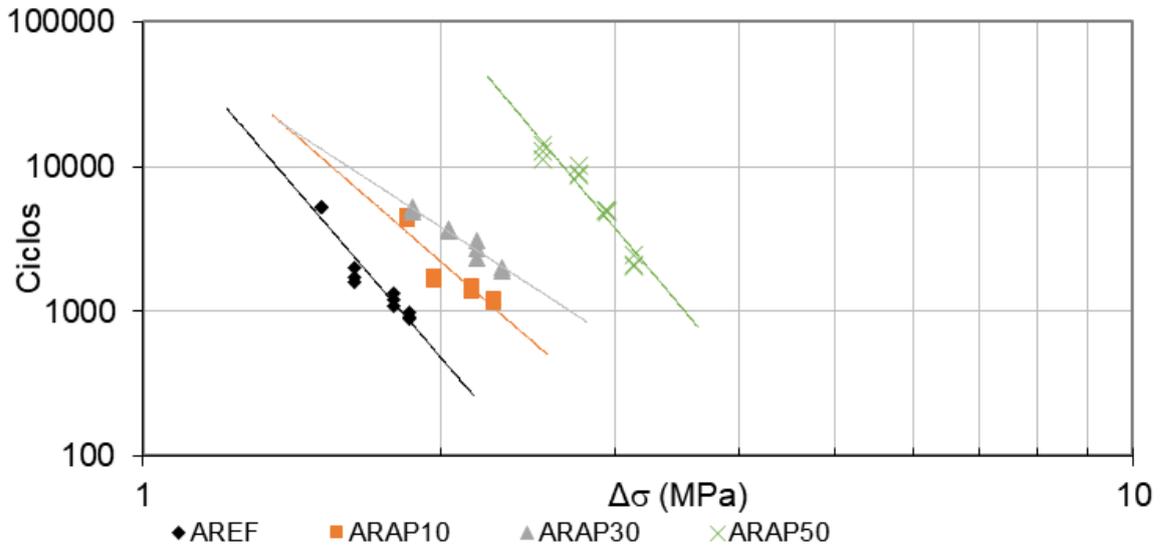


Figura 45 - Número de ciclos até a ruptura versus deformação específica resiliente para as amostras não-envelhecidas

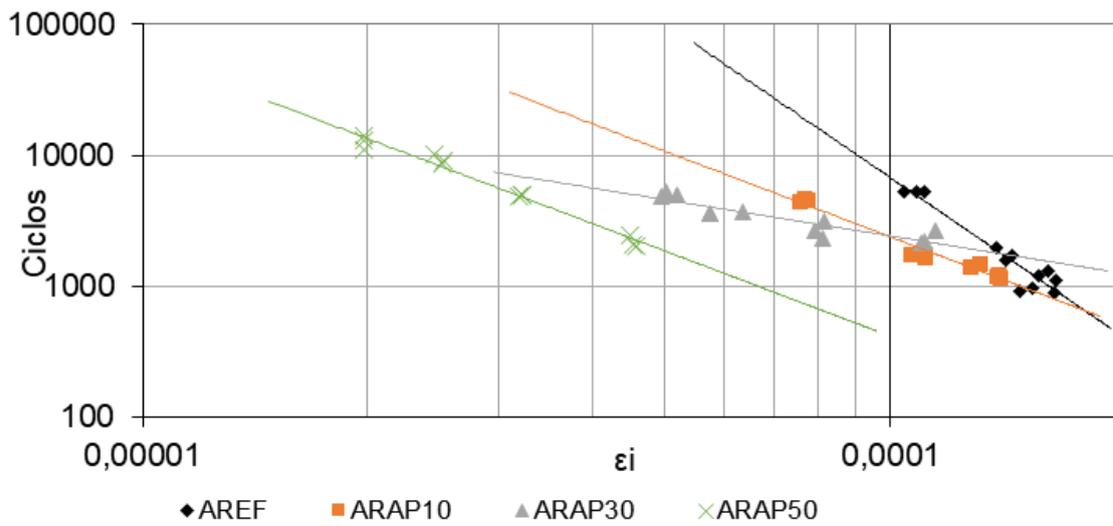


Tabela 10 - Equações características das curvas de vida de fadiga das misturas não-envelhecidas

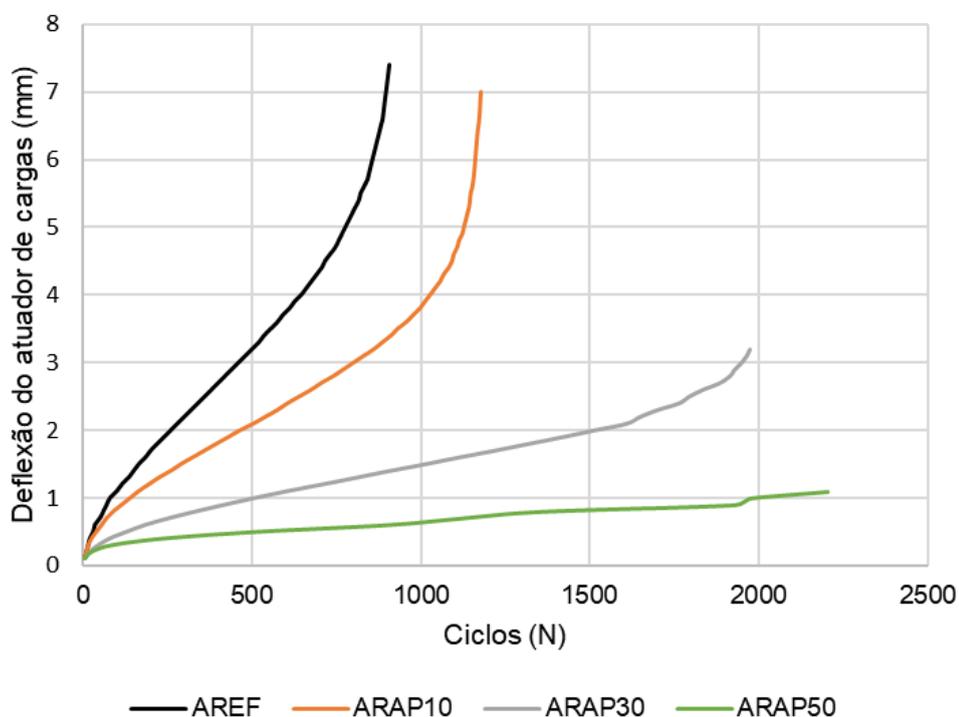
Mistura	Equação	$K_i$	$n_i$	$R^2$
AREF	$N = 118784(1/\Delta\sigma)^{7,956}$	118784	7,956	0,92
	$N = 2 \times 10^{-12}(1/\varepsilon_i)^{3,904}$	$2 \times 10^{-12}$	3,904	0,92
ARAP10	$N = 137045 (1/\Delta\sigma)^{5,96}$	137045	5,96	0,81
	$N = 0,0512 (1/\varepsilon_i)^{1,139}$	0,0512	1,139	0,97
ARAP30	$N = 83520 (1/\Delta\sigma)^{4,446}$	83520	4,446	0,97

	$N = 0,0614 (1/\varepsilon_i)^{1,137}$	0,0614	1,137	0,92
<b>ARAP50</b>	$N = 3 \times 10^7 (1/\Delta\sigma)^{8,14}$	$3 \times 10^7$	8,14	0,92
	$N = 0,0241 (1/\varepsilon_i)^{1,23}$	0,0241	1,23	0,87

A análise da Figura 45, que ilustra a vida de fadiga pela deformação específica resiliente, mostra que a rigidez da mistura está diretamente associada ao desempenho à fadiga. O número de ciclos necessários para uma dada deformação aumentou a medida em que o teor de incorporação de RAP também aumentou.

A inclinação das linhas de tendência no gráfico  $N \times \varepsilon_i$  (coeficiente  $n_3$ ) permite observar que a taxa de deterioração da amostra de referência é superior ao das amostras com RAP. Este é um aspecto importante a ser relacionado à rigidez dos materiais envelhecidos adicionados à mistura e pode ser observado no gráfico de evolução da deflexão do atuador de cargas da UTM-25 versus o número de ciclos registrado com a aplicação de 40% da RT de cada mistura, apresentado na Figura 46.

**Figura 46** - Deflexão do atuador de cargas versus número de ciclos para as amostras não-envelhecidas



O número de ciclos suportado pelas amostras com 30% e 50% RAP foi elevado e as deformações geradas foram mínimas. Enquanto o dano da amostra de referência foi contínuo e a dimensão da trinca aumentou até que a ruptura ocorreu quando a amostra se tornou instável, as amostras recicladas apresentavam ruptura súbita (Figura 47) após um período de

acúmulo de número de ciclos sem acréscimo de deformações detectável pelo atuador de cargas, da ordem de 0,1 mm.

**Figura 47** - Ruptura do corpo de prova



Este comportamento de deformação até a ruptura por fadiga nas misturas com RAP é descrito como tenaz por Huang *et al.* (2004). Os autores afirmam que as misturas com RAP são, geralmente, mais capazes de absorver energia de deformação antes de apresentar falhas de tração, mas uma vez que as trincas surgirem, estas misturas tendem a romper muito mais rápido que as misturas sem RAP, devido à redução na tenacidade pós-falha.

A mistura ARAP10 apresentou um comportamento semelhante à mistura AREF no tocante ao desenvolvimento de falha por fadiga. Na Figura 46 percebe-se que esta mistura é capaz de suportar maiores tensões, mas comportar-se, na ruptura, da mesma forma que a mistura AREF. Este é um comportamento esperado para misturas com baixos teores de RAP, pois, conforme preconizam McDaniel e Anderson (2001), teores entre 10 e 20% de RAP não são suficientes para dominar o comportamento da mistura final.

O bom desempenho das misturas recicladas à fadiga foi observado por Al-Qadi *et al.* (2012), West *et al.* (2012), Islam *et al.* (2014), Gennessaux (2015), para as misturas não envelhecidas, e Suzuki (2019). Ao contrário do observado nesta pesquisa, Shu *et al.* (2008), Norouzi *et al.* (2014) e Sengoz *et al.* (2017) afirmam que a inserção de RAP traz malefícios ao desempenho à fadiga.

A diversidade de conclusões acerca da influência do RAP na vida de fadiga de misturas recicladas se deve à diversidade de fontes de material fresado, segundo Zappe (2020). Para Wang *et al.* (2018) o desempenho das misturas com RAP é dependente da estrutura global do pavimento, além do projeto de mistura.

Nesta pesquisa, atribui-se os elevados número de ciclos suportados pelas misturas recicladas não somente à inserção de RAP, mas também à composição deste material. O fato de possuir polímero residual influenciou significativamente a vida de fadiga, aproximando estas misturas a misturas com ligante modificado por polímeros descritos na literatura.

As pesquisas de Marcon (2016) e Carlesso (2017) observaram um desempenho à fadiga significativamente superior de misturas com asfalto modificado por polímero em relação a misturas convencionais. Para Carlesso (2017) a atuação do polímero consiste no inchamento do material em parte dos maltenos, aumentando a elasticidade e resistência ao cisalhamento do ligante.

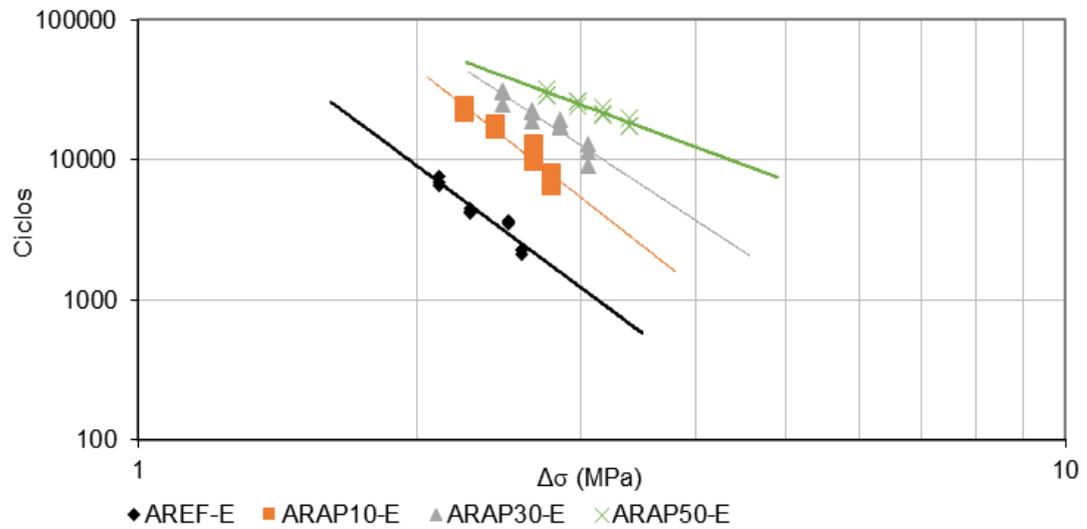
A elevada concentração de asfaltenos, devido ao caráter envelhecido do RAP, aliada à conservação da fase dos maltenos pela ação do polímero, resulta em uma mistura rígida, porém ainda elástica. Kodippily *et al.* (2015) estudaram os efeitos do ligante modificado com polímero nas propriedades de ruptura de misturas asfálticas recicladas, mas, diferentemente desta pesquisa, onde o RAP era modificado, os autores propuseram a modificação do ligante virgem em misturas com 15 e 30% de RAP. A presença do polímero foi prejudicial à resistência à fadiga das misturas, em comparação com as misturas com RAP sem polímero, no entanto, os autores afirmam que isto contraria a literatura pesquisada e percebe-se que contraria, também, o observado no presente estudo.

A pesquisa de Yan *et al.* (2019) corroborou com os resultados obtidos, ao concluir que as propriedades elásticas e a energia de deformação das misturas com RAP podem ser melhoradas utilizando ligantes modificados por polímero, permitindo o uso de altos teores de RAP em camadas de superfície de pavimento.

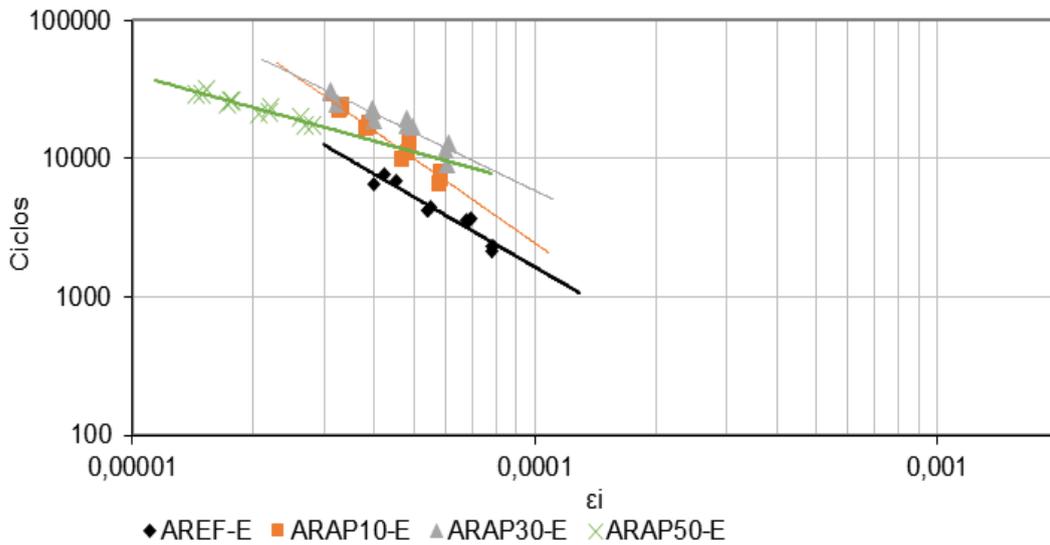
#### **4.5.2 Efeito do envelhecimento na vida de fadiga das misturas asfálticas recicladas**

As Figuras 48 e 49 apresentam as curvas de Wöhler para a diferença de tensões e deformação específica resiliente, respectivamente, das misturas asfálticas de referência e recicladas submetidas ao envelhecimento à longo prazo. A Tabela 11 apresenta as equações das retas de tendência, seus coeficientes  $K_i$  e  $n_i$  e níveis de determinação ( $R^2$ ), tendo como critério de aceitação dos resultados o  $R^2$  mínimo de 0,8, estabelecido pela norma DNIT - ME 182/2018.

**Figura 48** - Número de ciclos até a ruptura versus diferença de tensões para as amostras envelhecidas



**Figura 49** - Número de ciclos até a ruptura versus deformação específica resiliente para as amostras envelhecidas



**Tabela 11** - Equações características das curvas de vida de fadiga das misturas envelhecidas

Mistura	Equação	$K_i$	$n_i$	$R^2$
AREF-E	$N = 274146(1/\Delta\sigma)^{4,916}$	274146	4,916	0,90
	$N = 0,0003 (1/\varepsilon_i)^{2,254}$	0,0003	1,686	0,92
ARAP10-E	$N = 2 \times 10^6 (1/\Delta\sigma)^{5,197}$	$2 \times 10^6$	5,197	0,94
	$N = 2 \times 10^{-5}(1/\varepsilon_i)^{2,036}$	$2 \times 10^{-5}$	2,036	0,96
ARAP30-E	$N = 1 \times 10^6 (1/\Delta\sigma)^{4,333}$	$1 \times 10^6$	4,333	0,89

	$N = 0,015 (1/\varepsilon_i)^{1,399}$	0,015	1,399	0,90
<b>ARAP50-E</b>	$N = 364736 (1/\Delta\sigma)^{2,433}$	364736	2,433	0,94
	$N = 3,8869 (1/\varepsilon_i)^{0,804}$	3,8869	0,804	0,92

O protocolo de envelhecimento das misturas aplicado nesta pesquisa trouxe mudanças significativas no comportamento geral observado, tanto para a mistura de referência, quanto para as misturas recicladas. Na Figura 48 pode-se notar que houve uma aproximação no comportamento das misturas recicladas, indicando que há uma tendência à estabilidade na relação entre as diferenças de tensões no centro dos corpos de prova e o número de ciclos de carga até a fadiga.

O comportamento de deformação das misturas ARAP10-E e ARAP30-E também se aproximou do comportamento da mistura ARAP50-E e isto leva a crer que o envelhecimento elevou a rigidez do ligante virgem de tal forma, que todas as misturas recicladas se deformem de forma tenaz, conforme descreveram Huang *et al.* (2004).

A observação do coeficiente  $n_3$  nas equações das linhas de tendência da curva de Wöhler, que relaciona a deformação específica resiliente e o número de ciclos (Tabela 11), indica que a taxa de deterioração das misturas envelhecidas seguiu o mesmo padrão das misturas não envelhecidas. Entretanto, esta taxa é significativamente menor quando se trata das misturas envelhecidas, por exemplo, o  $n_2$  da mistura ARAP50 foi de 1,23, enquanto o da mistura ARAP50-E foi de 0,804.

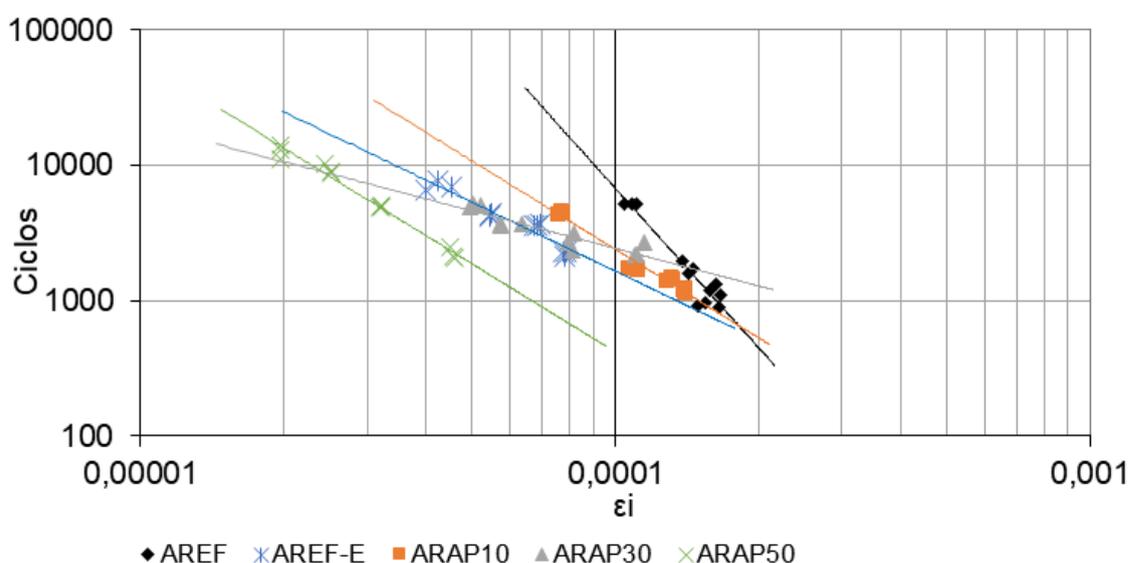
Gennessaux (2015) observou que o envelhecimento afetou positivamente as misturas a quente e morna sem RAP, e negativamente as misturas à quente e morna com 50% de RAP. A autora afirma que a combinação das técnicas de mistura morna e RAP não ocasiona a resultados piores do que se aplicadas isoladamente, não sendo possível, portanto, estabelecer uma relação clara entre o envelhecimento e o desempenho à fadiga das misturas que utilizem destas técnicas.

A quantidade de ciclos de carga suportada após o envelhecimento foi superior em todas as misturas estudadas nesta pesquisa. Assim como apontou Gennessaux (2015) o aumento da capacidade de resistir à fadiga na amostra de referência foi coerente e devido ao aumento da rigidez em virtude da oxidação do ligante virgem. No entanto, em contraponto ao que observou a autora, as misturas com RAP avaliadas no presente estudo tiveram desempenho à fadiga muito superior à mistura AREF-E e às misturas recicladas não envelhecidas. Este fato é atribuído, de forma semelhante ao apresentado nos demais resultados de ensaios mecânicos, à presença de polímero no ligante do RAP, que torna a mistura elástica, ainda que seja rígida em função do envelhecimento.

Pasetto e Baldo (2017) avaliaram o desempenho de misturas recicladas com ligante modificado por polímero submetidas ao envelhecimento de longo prazo, simulado pelo condicionamento das amostras em estufa a 85°C por 5 dias, e observaram uma perda de desempenho no ensaio de vida de fadiga em flexão de viga em quatro pontos. Por esta razão, a avaliação do papel do envelhecimento do ligante virgem é necessária para o entendimento dos resultados desta pesquisa, visto que foram contrários aos observados pelos autores.

A Figura 50 relaciona a curva deformação específica resiliente *versus* número de ciclos da mistura AREF-E com as misturas AREF, ARAP10, ARAP30 e ARAP50. Nela, é possível observar que o envelhecimento do ligante 50/70 foi substancial, e seu comportamento envelhecido se assemelha ao das misturas com RAP não envelhecidas. Portanto, a rigidez do ligante virgem no envelhecimento é preponderante para conferir às misturas com RAP envelhecidas a baixa deformabilidade e o elevado número de ciclos até a fadiga das misturas encontrados.

**Figura 50** - Comparação do número de ciclos até a ruptura *versus* deformação específica resiliente entre as amostras não-envelhecidas e amostra de referência envelhecida



O envelhecimento das misturas recicladas não compromete seu desempenho, mas as torna muito mais rígidas do que quando novas. O trincamento por fadiga durante a vida de serviço do pavimento com mistura reciclada ocorreria em função da reflexão de trincas das camadas de suporte e subleito para o revestimento asfáltico, pela incompatibilidade de rigidez entre elas, comumente projetadas com os parâmetros iniciais das misturas. Neste sentido, uma vez que os métodos mecanísticos empíricos utilizam análise elástica de múltiplas camadas para investigar os parâmetros de deformabilidade, tais como módulo de resiliência e coeficiente de Poisson, a fim de obter uma estrutura global de comportamento elástico

compatível (FRANCO, 2020), o estudo do envelhecimento nessas propriedades permite dimensionar uma estrutura com durabilidade superior.

#### 4.6 Autorregeneração

O número de ciclos suportado por cada mistura durante os ensaios de vida de fadiga apresentados nas curvas de Wöhler foram utilizados na determinação do número de ciclos correspondente aos níveis de dano de 25%, 50% e 75%, para os mesmos níveis de tensão apresentados no item 3.2.2.5. A Tabela 12 apresenta estes valores para as misturas utilizadas no estudo da propriedade de autorregeneração: AREF, ARAP10, ARAP30, ARAP50, AREF-E e ARAP50-E.

**Tabela 12** - Número de ciclos médio correspondente à ruptura por fadiga de todas as misturas não-envelhecidas e das misturas de referência e 50% de RAP envelhecidas

Mistura	Número de ciclos médio até a fadiga por níveis de tensão			
	40%	37,5%	35%	32,5%
AREF	923	1206	1766	5216
ARAP10	1176	1431	1686	4446
ARAP30	1976	2706	3635	5061
ARAP50	2206	4941	9330	12661
AREF-E	2251	3606	4311	7096
ARAP50-E	18311	22111	25736	30176

Nota-se uma mudança brusca no aumento de ciclos até a ruptura entre os menores níveis de tensão avaliados para todas as misturas. Estes menores níveis de tensão são mais frequentemente observados nos pavimentos, uma vez que altas cargas dependem de um carregamento específico, pouco comum, portanto, a vida de fadiga dos pavimentos dimensionados com estes revestimentos seria ainda superior ao número de ciclos observado no ensaio de vida de fadiga.

Na Tabela 13 é possível consultar os índices de autorregeneração (IA) e extensão da vida de fadiga (EF) para todas as misturas avaliadas, além dos níveis de dano e níveis de tensão.

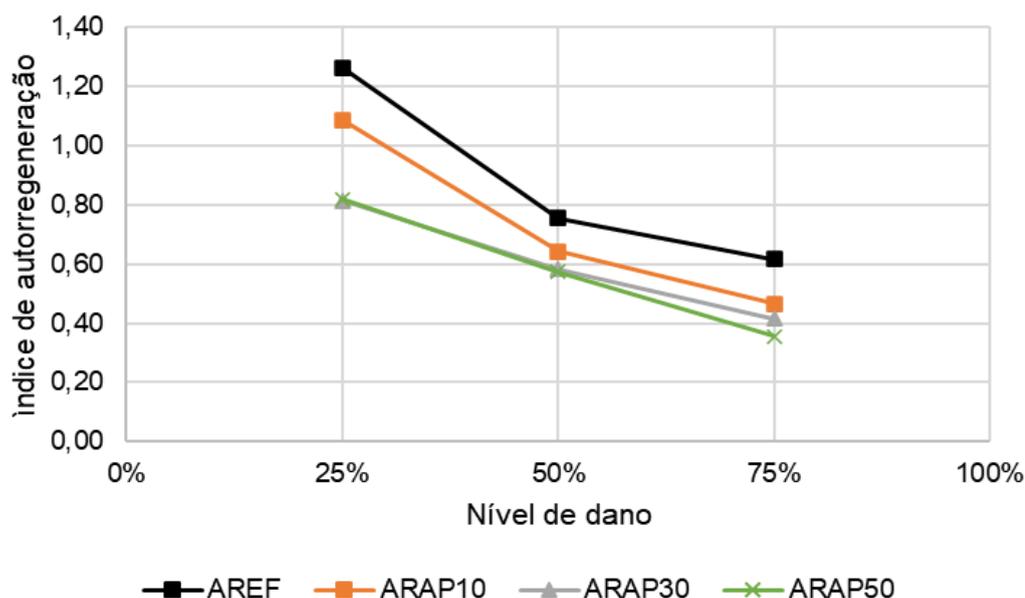
**Tabela 13** - Índices de autorregeneração e extensão percentual da vida de fadiga das misturas

Mistura	Nível de Tensão	Nível de dano					
		25%		50%		75%	
		IA	EF (%)	IA	EF (%)	IA	EF (%)
AREF	40%	1,21	45,6	0,75	25,2	0,67	41,6

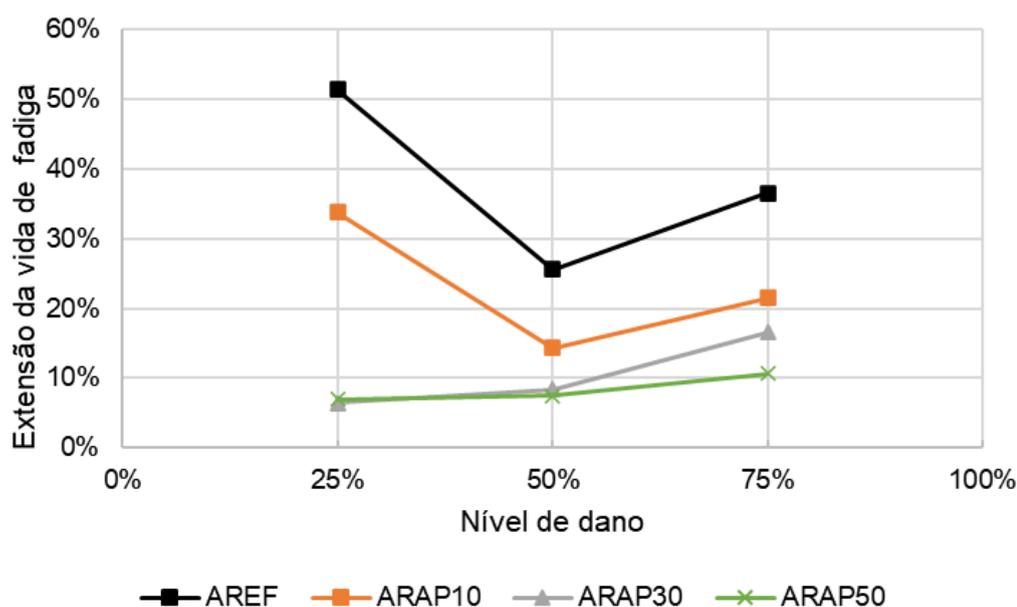
	37,5%	1,24	49,5	0,73	23,5	0,56	31,1
	35%	1,29	53,6	0,77	27,1	0,57	32,3
	32,5%	1,32	57,0	0,77	26,8	0,67	41,5
<b>ARAP10</b>	40%	1,05	30,1	0,59	8,8	0,46	21,0
	37,5%	1,15	40,4	0,62	12,3	0,47	22,2
	35%	1,09	34,0	0,68	18,3	0,47	21,9
	32,5%	1,06	30,7	0,68	18,2	0,46	20,9
<b>ARAP30</b>	40%	0,83	7,2	0,56	6,0	0,42	17,3
	37,5%	0,82	7,4	0,62	11,8	0,41	16,4
	35%	0,80	5,5	0,56	6,3	0,42	16,7
	32,5%	0,80	5,4	0,60	9,7	0,41	16,1
<b>ARAP50</b>	40%	0,83	8,3	0,58	8,1	0,33	8,2
	37,5%	0,80	5,2	0,58	8,4	0,34	8,5
	35%	0,83	8,1	0,57	7,1	0,37	12,3
	32,5%	0,81	6,4	0,56	6,4	0,39	13,5
<b>AREF-E</b>	40%	1,10	35,2	0,64	14,5	0,49	23,7
	37,5%	0,96	21,3	0,61	11,3	0,48	23,3
	35%	1,03	27,6	0,69	18,7	0,51	25,6
	32,5%	1,02	27,5	0,70	20,3	0,56	31,1
<b>ARAP50-E</b>	40%	0,82	6,9	0,53	2,9	0,26	1,0
	37,5%	0,85	9,8	0,52	2,1	0,27	2,2
	35%	0,84	8,8	0,55	4,7	0,25	0,0
	32,5%	0,83	8,1	0,54	4,3	0,28	2,8

De forma a avaliar a influência do teor de RAP e do nível de dano na capacidade de autorregeneração, os índices de autorregeneração calculados pela Equação 14 são apresentados na Figura 51 e a extensão da vida de fadiga, calculada pela Equação 15, apresentada na Figura 52, para todas as misturas não-envelhecidas.

**Figura 51** - Índice de autorregeneração das amostras não-envelhecidas versus nível de dano



**Figura 52** - Extensão da vida de fadiga das amostras não-envelhecidas versus nível de dano



A Figura 52 ilustra que, em todos os casos, houve acréscimo na vida de fadiga das misturas, uma vez que as extensões da vida de fadiga foram superiores a 0%. Este fato se deve à existência de uma autorregeneração mínima, observada amplamente na literatura e confirmado nas pesquisas de Zhu *et al.* (2017) e Mullapudi *et al.* (2020).

Os índices de autorregeneração foram superiores com 25% do dano, pois as trincas desenvolvidas neste nível tendem a ser menores e mais facilmente seladas pela mobilização de ligante. A dificuldade em mobilizar o ligante resultante da mistura de ligante envelhecido do RAP e ligante virgem foi maior à medida em que o teor de RAP aumentava, o que explica

a proximidade entre os índices de autorregeneração das misturas com 30% e 50% de RAP. Este fato se relaciona, com a temperatura empregada no processo de indução da autorregeneração. Nesta temperatura, a viscosidade estimada do ligante virgem é de 14500 cP, enquanto para o ligante do RAP, 95000 cP, um valor cerca de 6,5 vezes maior.

Nas misturas AREF e ARAP10 é possível notar uma queda mais significativa nos índices de autorregeneração entre 25% e 50% do dano, do que entre 50% e 75% do dano. Essas misturas também apresentam os maiores ganhos de extensão na vida de fadiga no menor nível de dano, seguidos de uma queda vertiginosa no percentual de acréscimo nos maiores nível de dano.

Assim como observado nos demais resultados, a mistura com baixo teor de RAP se comporta de forma semelhante à mistura de referência. O fato de predominar ligante virgem nas misturas determina as elevadas capacidades de autorregeneração e extensão na vida de fadiga, principalmente a 25% do dano.

Mullapudi *et al.* (2020) afirma que a máxima capacidade de autorregeneração de uma mistura está quando a temperatura utilizada para a induzir é a mesma ou está mais próxima do ponto de amolecimento do ligante utilizado. Desta forma, a proximidade entre o ponto de amolecimento do ligante virgem (52°C) e a temperatura de autorregeneração (45°C) é a principal responsável por este aspecto nas misturas AREF e ARAP10.

García (2012) avalia que, para que a selagem da trinca aconteça, o ligante precisa fluir para a microtrinca em um movimento similar ao fluxo capilar. O autor afirma, a partir disto, que os índices de autorregeneração serão menores conforme aumente a dimensão da trinca, a viscosidade do ligante, a densidade do ligante e reduza a tensão superficial (inerente aos tubos capilares formados nas microtrincas).

Atribui-se à existência de polímero no ligante do RAP a função de aumento na densidade do ligante, além do envelhecimento. Conforme explicitado anteriormente, o polímero também contribui para o aumento da viscosidade, corroborando com os resultados observados no gráfico de índice de autorregeneração da Figura 51.

A elevação nos índices de extensão da vida de fadiga a 75% do dano, observada na Figura 52, é devida ao índice de autorregeneração ter superado o índice mínimo. Estes índices mínimos seriam de 0,75, para 25% de dano; 0,5 para 50% de dano e 0,25, para 75% do dano, ou seja: garantem apenas a capacidade da mistura manter a vida de fadiga previamente determinada e não apresentar ruptura imprevista.

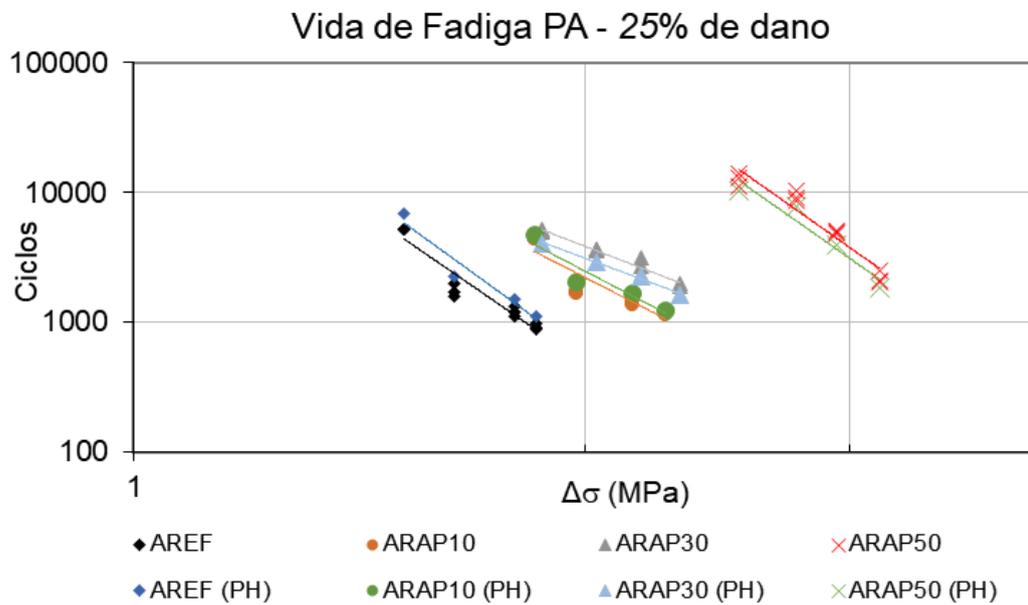
Os índices de extensão apresentaram um comportamento diferente do esperado: a lógica leva a crer que quanto maior o dano, menor a capacidade de autorregeneração e, assim, menor a extensão da vida de fadiga proporcionada. No entanto, as misturas estudadas apresentaram maior extensão da fadiga a 75% do dano, embora os índices de autorregeneração tenham sido menores. Este fenômeno pode ter sido decorrente da

tenacidade das misturas e, aqui, levanta-se a hipótese de que toda mistura apresenta certa tenacidade. A partir do dano elevado e da imposição de um período de descanso para a indução da autorregeneração, as misturas retornariam ao estado de resistência antes do ponto onde acumula-se ciclos sem gerar maiores deformações, ampliando, assim, a faixa de tenacidade.

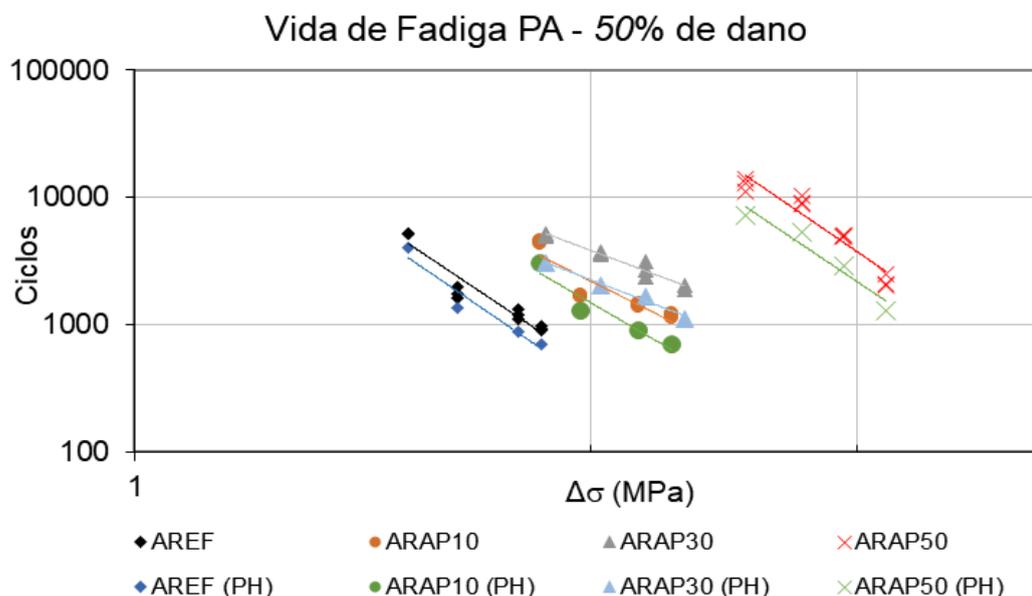
As curvas de fadiga pós-autorregeneração (PA) foram construídas utilizando o número de ciclos obtidos para cada corpo de prova testado nestas condições e são apresentadas na Figuras 53, 54 e 55, para os níveis de dano de 25%, 50% e 75%, respectivamente, para as amostras na condição não-envelhecida em termos de número de ciclos *versus* diferenças de tensões.

Estas curvas representam o comportamento da mistura à fadiga após a mobilização do ligante, que tendem a gerar pontos cicatrizados mais resistentes e zonas adjacentes, doadoras de ligante asfáltico, menos resistentes, uma vez que o processo de geração e cicatrização de trincas modifica paulatinamente a microestrutura da mistura.

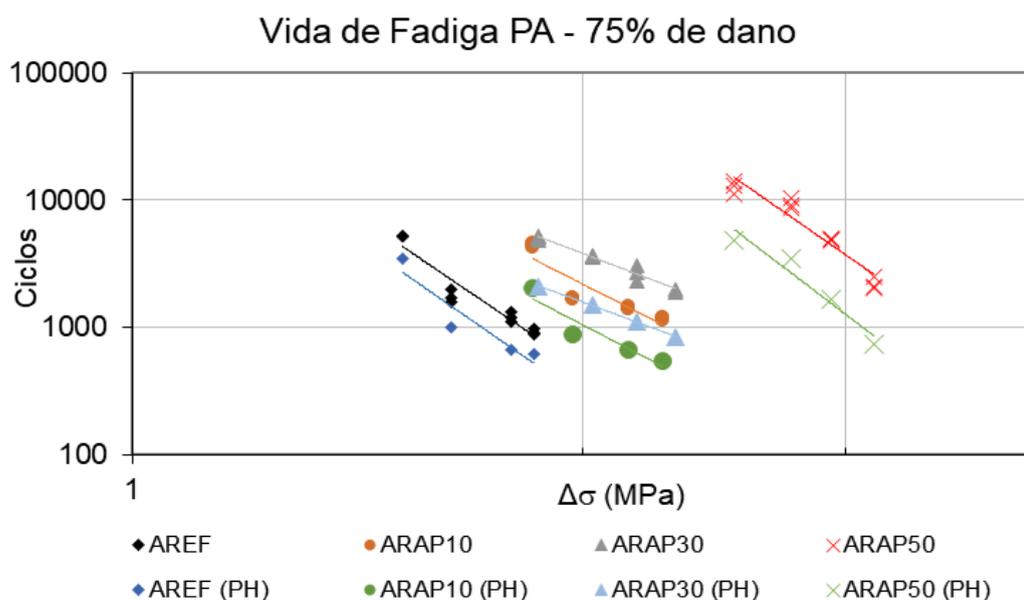
**Figura 53** - Comparação do número de ciclos até a ruptura *versus* diferença de tensões para as amostras não-envelhecidas antes e após a autorregeneração de 25% do dano



**Figura 54** - Comparação do número de ciclos até a ruptura versus diferença de tensões para as amostras não-envelhecidas antes e após a autorregeneração de 50% do dano



**Figura 55** - Comparação do número de ciclos até a ruptura versus diferença de tensões para as amostras não-envelhecidas antes e após a autorregeneração de 75% do dano

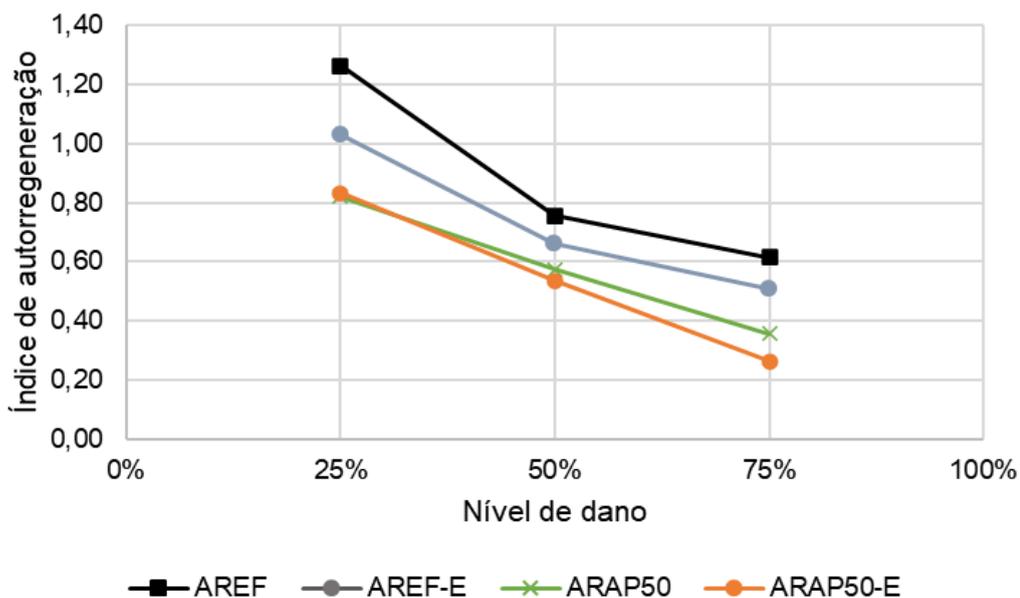


Nas Figuras 53, 54 e 55 pode-se observar que a progressão do dano afetou mais intensamente as misturas recicladas do que a mistura constituída apenas de materiais virgens, pois a quantidade de ciclos suportada diminuiu mais significativamente nas misturas com RAP à medida em que aumentou o dano. As misturas AREF e ARAP10 tiveram bom desempenho autorregenerativo com 25% de dano, mas à medida em que o nível de dano crescia, esse potencial se reduzia. A autorregeneração das misturas ARAP30 e ARAP50 foi severamente afetada pelos níveis de dano mais altos (50% e 75%), embora a extensão da vida de fadiga

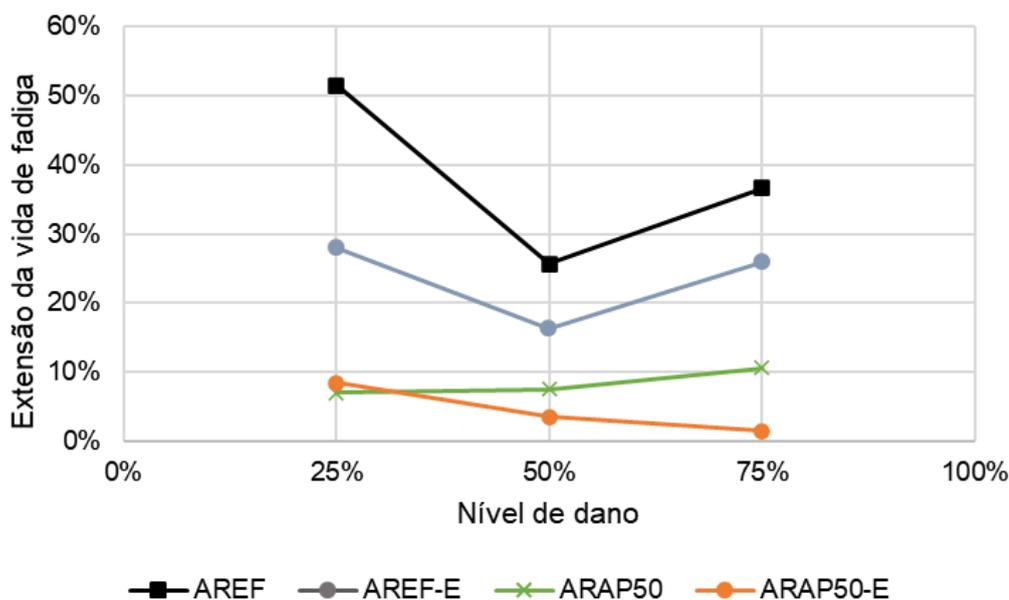
apresentada na Tabela 13 garante que a mistura suporte os carregamentos durante a vida útil projetada.

A avaliação do efeito do envelhecimento nas propriedades de autorregeneração das misturas recicladas pode ser feita mediante a análise do índice de autorregeneração e da extensão da vida de fadiga das misturas AREF e AREF-E, e das misturas ARAP50 e ARAP50-E, apresentados nas Figuras 56 e 57.

**Figura 56** - Índice de autorregeneração das amostras envelhecidas versus nível de dano



**Figura 57** - Extensão da vida de fadiga das amostras envelhecidas versus nível de dano



Na Figura 56, o índice de autorregeneração correspondente à 25% do dano na mistura de referência envelhecida foi menor em relação à mistura de referência não-envelhecida. Na mistura com 50% de RAP, os índices de autorregeneração a 25% do dano são semelhantes

para as misturas na condição envelhecida e não envelhecida, o que indica que não houve uma mudança significativa na capacidade de movimentação do ligante para a selagem das microtrincas.

A extensão na vida de fadiga da mistura AREF-E foi inferior à da mistura AREF, em todos os níveis de dano, mas ainda foi significativamente superior à das misturas ARAP50 e ARAP50-E. Isto se deve à fluidez do ligante virgem que, mesmo que envelhecido, é maior que nas misturas com RAP, o que explica a maior facilidade de selagem de trincas da mistura de referência.

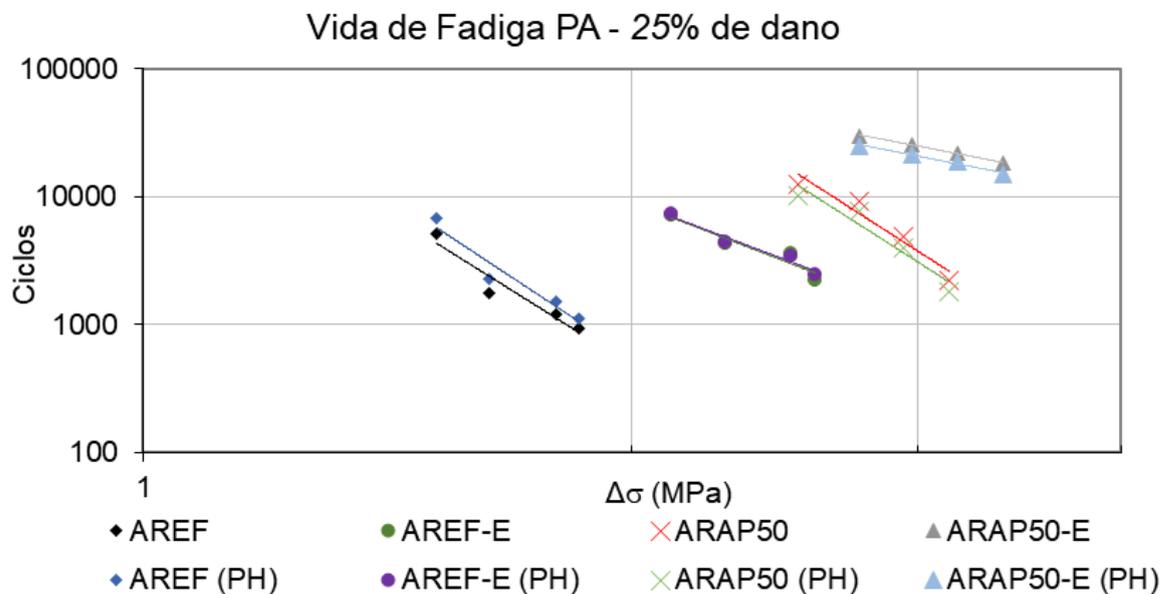
Assim como observado nas misturas não-envelhecidas, houve elevação na extensão da vida de fadiga da mistura AREF-E a 75% do dano, o que não aconteceu com a mistura ARAP50-E. Isto se deve ao fato de que a mistura ARAP50-E obteve apenas a autorregeneração mínima, necessária a completar a vida de fadiga previamente mensurada, apontando para a hipótese de que a faixa de tenacidade da mistura tenha sido superada.

Pode-se observar uma tendência generalizada à redução na capacidade de autorregeneração com o aumento do nível de dano. Entretanto, a mistura com RAP apresentou um comportamento estável com o envelhecimento. Isto significa que, uma vez feita a avaliação do potencial autorregenerativo da mistura reciclada, pode-se esperar que ela se mantenha durante a vida útil do pavimento, configurando ser uma boa previsão do comportamento a longo prazo desta mistura. Em contrapartida, a mistura virgem parece susceptível aos efeitos do envelhecimento, o que prejudica a previsão do comportamento a longo prazo e pode resultar em super ou subdimensionamentos.

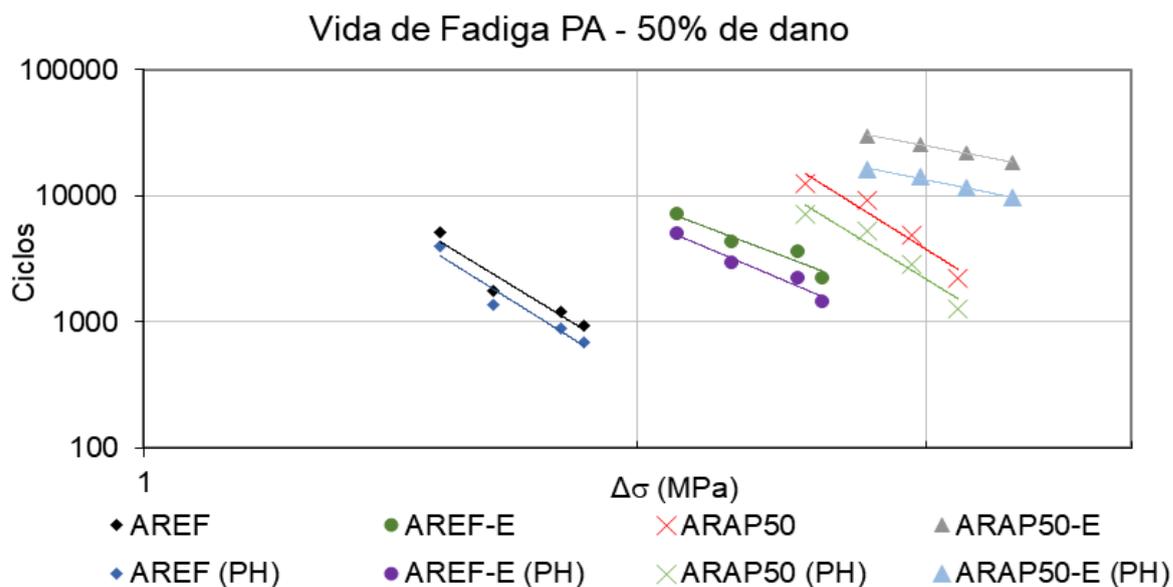
Os estudos de Shen *et al.* (2016) indicam que, com o aumento do envelhecimento do ligante (oxidação), o efeito da autorregeneração é reduzido. A mistura ARAP50-E, por exemplo, que combina a ação do ligante envelhecido do RAP, o polímero residual do RAP, além do envelhecimento adicional induzido pelo protocolo descrito no item 3.2.4, obteve índices de autorregeneração de 0,83, 0,54 e 0,26 para 25%, 50% e 75% do dano, respectivamente. Isto indica que a sobrevida alcançada foi de 8,4%, 3,5% e 1,4%, nos mesmos níveis de dano, ou seja, quase nenhum acréscimo à vida de fadiga que represente boa capacidade de autorregeneração.

As curvas de fadiga pós-autorregeneração (PA) que comparam o número de ciclos *versus* diferença de tensões no centro dos CPS das misturas AREF, AREF-E, ARAP50 e ARAP50-E são apresentadas nas Figuras 58, 59 e 60, para os níveis de dano de 25%, 50% e 75%, respectivamente.

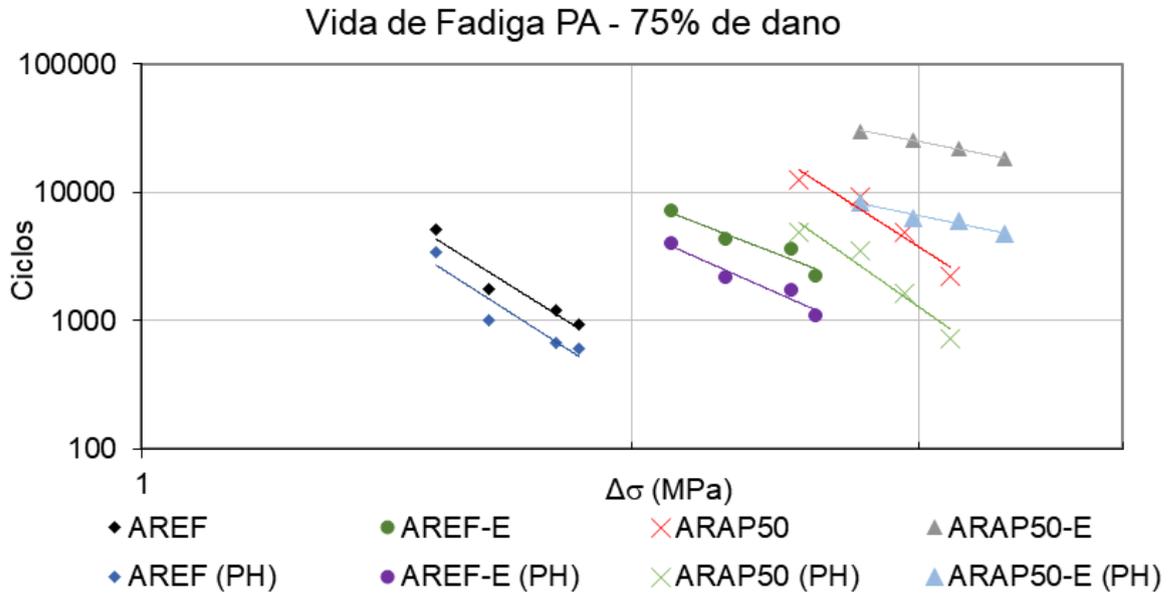
**Figura 58** - Comparação do número de ciclos até a ruptura versus diferença de tensões para as amostras AREF, AREF-E, ARAP50 e ARAP50-E antes e após a autorregeneração de 25% do dano



**Figura 59** - Comparação do número de ciclos até a ruptura versus diferença de tensões para as amostras AREF, AREF-E, ARAP50 e ARAP50-E antes e após a autorregeneração de 50% do dano



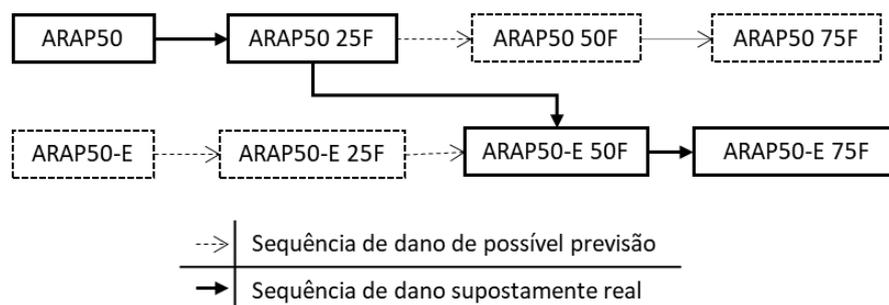
**Figura 60** - Comparação do número de ciclos até a ruptura versus diferença de tensões para as amostras AREF, AREF-E, ARAP50 e ARAP50-E antes e após a autorregeneração de 75% do dano



A capacidade de autorregeneração com a progressão do dano na mistura AREF-E se manteve mais estável do que na mistura ARAP50-E, o que indica que a mistura com RAP envelhecida tem maiores dificuldades em se regenerar após certo dano.

A avaliação isolada da capacidade de autorregeneração e da vida de fadiga das misturas na condição não-envelhecida e envelhecida pode não aproximar os processos simulados em laboratório às condições de campo. Deve-se considerar que o dano, o envelhecimento térmico e a autorregeneração não atuam de forma independente, mas sim, concomitante. Assim, a sobreposição e combinação dos resultados obtidos permite uma avaliação mais criteriosa. Neste sentido, é possível inferir que, uma vez que a mistura ARAP50 fosse aplicada em um revestimento de um pavimento, com suporte compatível, a vida de serviço levaria suas propriedades mecânicas não diretamente àquelas da ARAP50-E, mas às condições pós-autorregeneração (PA) de 50% e 75% de dano desta mistura envelhecida, como exemplifica a Figura 61. A Tabela 14 apresenta os índices de autorregeneração considerando esta suposição.

**Figura 61** - Fluxograma de sequência de dano supostamente real para uma mistura com 50% de RAP durante o envelhecimento e vida de fadiga



**Tabela 14** - Índices de autorregeneração da mistura com 50% de RAP na sequência de dano supostamente real

Nível de Tensão	ARAP50	ARAP50		ARAP50-E			
		25%		50%		75%	
	Ciclos	Ciclos	IA	Ciclos	IA	Ciclos	IA
<b>40%</b>	2206	1836	0,83	9686	4,39	4761	2,16
<b>37,50%</b>	4941	3961	0,80	11526	2,33	6016	1,22
<b>35%</b>	9330	7756	0,83	14086	1,51	6381	0,68
<b>32,50%</b>	12661	10311	0,81	16396	1,30	8376	0,66
		<b>MÉDIA</b>	0,82		2,38		2,38

Os índices de autorregeneração apresentados na Tabela 14 foram calculados pela relação entre o número de ciclos até a ruptura das misturas ARAP50 25F, ARAP50-E 50F e ARAP50-E 75F e o número de ciclos até a ruptura do ensaio de fadiga da mistura ARAP50.

Observa-se que os elevados índices de autorregeneração a 50% e 75% do dano, considerando o envelhecimento da mistura não refletem o mecanismo de selagem voluntária de trincas, mas sim, indicam que a rigidez adquirida seria capaz de conter o acréscimo de ciclos.

Em resumo, a capacidade de autorregeneração das misturas asfálticas recicladas foi prejudicada pelo aumento no teor de RAP e pelo envelhecimento, no entanto, há uma estabilidade no índice de autorregeneração, o que indica que há uma quantidade de autorregeneração mínima que acontecerá, independente das condições impostas ao pavimento e decorrente da natureza termoviscoelástica do ligante asfáltico. Este comportamento é recorrente nas análises realizadas durante o estudo de autorregeneração desta pesquisa, o que se alinha às conclusões dos estudos de García (2012), Shen *et al.* (2016), González *et al.* (2018) e Gómez-Meijide *et al.* (2018).

## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

A partir dos resultados analisados nesta pesquisa foi possível concluir:

- a resistência à tração das misturas recicladas é significativamente superior à de misturas convencionais, assim como o módulo de resiliência e a resistência à deformação permanente, e estes parâmetros aumentaram, à medida em que aumentou o teor de RAP. Não houve prejuízo na resistência das misturas submetidas a ciclos de gelo e degelo, assim como não houve benefício, sendo assim, classifica-se como positiva a reciclagem de misturas, quanto à resistência à ação da água.
- o envelhecimento afetou as propriedades mecânicas das misturas avaliadas nesta pesquisa: os resultados de resistência à tração, do módulo de resiliência, da resistência à deformação permanente e da vida de fadiga indicam que as misturas asfálticas recicladas tendem a enrijecer-se mais, dada a oxidação do ligante virgem e a superoxidação do ligante do RAP e isso se intensifica à medida em que aumenta o teor de RAP. Vale ressaltar que estes resultados são atribuídos tanto à quantidade de ligante envelhecido adicionada quanto ao tipo de ligante do RAP que, no caso desta pesquisa, provinha de uma camada de microrrevestimento modificado com polímero. O envelhecimento, no entanto, não influenciou na resistência à ação deletéria da água.
- a capacidade de autorregeneração das misturas asfálticas recicladas é dependente da rigidez, da viscosidade e da composição do ligante asfáltico final (mistura de ligante virgem e ligante proveniente do RAP). O aumento no teor de RAP acarreta uma maior dificuldade em mobilizar o ligante para a selagem de trincas, o que significa que a capacidade de autorregeneração se reduz, de acordo com a indução de autorregeneração realizada nesta pesquisa. No entanto, nota-se que há uma autorregeneração mínima que acontece independente das condições impostas, que garante que o pavimento terá, ao menos, a vida útil que se previu antes do envelhecimento
- o nível de dano é preponderante na capacidade de autorregeneração das misturas asfálticas, em especial, nas recicladas. Maiores níveis de dano significam maiores trincas ou maior quantidade de microtrincas e, pela natureza envelhecida e mais viscosa do ligante do RAP, ocorre a dificuldade da mobilização deste ligante para a selagem da fissura. Observou-se, ainda, quando a autorregeneração ocorre em um menor nível de dano nas misturas com RAP, há a possibilidade de uma extensão significativa na vida de fadiga.
- a capacidade de autorregeneração é afetada negativamente pelo efeito do envelhecimento em misturas asfálticas recicladas, devido à superoxidação de uma mistura que já possuía ligante oxidado em sua composição. Embora tenha-se notado

um significativo aumento na vida de fadiga das misturas com RAP após o envelhecimento, isto não se deve à autorregeneração.

A adição de RAP em misturas asfálticas requer atenção especial em relação à variabilidade do material fresado e à propriedade de rigidez, inerente ao ligante envelhecido proveniente do RAP. Os efeitos envelhecimento são expressivos no comportamento mecânico das misturas recicladas, o que indica que é prudente realizar o estudo da rigidez ao longo do tempo. O efeito da autorregeneração, embora não tão significativo quanto o do envelhecimento, contribui para o aumento da sobrevida do pavimento, uma vez que atua no combate dos danos de menor escala gerados pelas solicitações de tráfego.

Portanto, verifica-se a importância de avaliar o desempenho dos pavimentos a longo prazo e, especialmente, em se tratando de misturas recicladas, as propriedades mecânicas afetadas pela rigidez indicam que a eficiência do pavimento reciclado depende do projeto da estrutura global (incluindo camadas de suporte). A aplicação de um protocolo de envelhecimento é capaz de estimar os parâmetros futuros de rigidez e resistência das misturas recicladas, uma vez que essas misturas apresentam baixa capacidade autorregenerativa, que não altera significativamente a vida de fadiga prevista. Com isso, torna possível o dimensionamento correto e eficiente de uma estrutura compatível ao revestimento com mistura asfáltica reciclada para a obtenção de um pavimento de boa durabilidade e qualidade.

### **5.1 Sugestões para Pesquisas Futuras**

- Utilizar técnica de cromatografia SARA para identificação de possíveis agentes modificadores do ligante asfáltico proveniente do RAP;
- Comparar o desempenho mecânico das misturas recicladas desta pesquisa com outras que utilizem agentes rejuvenescedores, também aplicando protocolo de envelhecimento;
- Avaliar o desempenho das misturas asfálticas recicladas em diferentes condições de frequência de carregamento e temperaturas, por meios de ensaios de módulo dinâmico;
- Aplicar o modelo viscoelástico de dano contínuo (VECD) para prever o dano por fadiga em diversas condições de carregamento e temperaturas nas misturas recicladas;
- Observar o comportamento à fadiga e a autorregeneração das misturas asfálticas recicladas por meio de ensaios de flexão de viga em três pontos, em um modo de ensaio de deformação controlada;

- Observar o mecanismo autorregenerativo de misturas asfálticas recicladas por meio de métodos de imagem, para compreender o comportamento da difusão de ligantes envelhecido e virgem na selagem de trincas;
- Induzir a autorregeneração com temperaturas superiores e maiores períodos de descanso, para observar a influência destes métodos na capacidade de autorregeneração.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AL-QADI, I. L.; AURANGZEB, Q.; CARPENTER, S. H.; PINE, W. L.; TRAPANIER, J. **Impact of High RAP Content on Structural and Performance Properties of Asphalt Mixtures**. Research Report FHWA-A-ICT-12-002, Illinois Center for Transportation, Rantoul. 2012.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS – **AASHTO T170 – Standard Method of Test for Recovery of Asphalt Binder from Solution by Abson Method**. 2000.

\_\_\_\_\_. **AASHTO TP2 – Standard Test Method for the Quantitative Extraction and Recovery of Asphalt Binder from Asphalt Mixtures**. 2001.

\_\_\_\_\_. **AASHTO PP2 – Standard Practice for Mixture Conditioning of Hot Mix Asphalt (HMA)**. 2001.

\_\_\_\_\_. **AASHTO M 323 - Standard Specification for Superpave Volumetric Mix Design**. 2017.

\_\_\_\_\_. **AASHTO T 164 – Standard Method of Test for Quantitative Extraction of Asphalt Binder from Hot Mix Asphalt (HMA)**. 2018.

\_\_\_\_\_. **AASHTO T 209 – Standard Method of Test for Theoretical Maximum Specific Gravity (G<sub>mm</sub>) and Density of Asphalt Mixtures**. 2020.

\_\_\_\_\_. **AASHTO T 283 – Standard Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage**. 2021.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – **ASTM D 6925 – Standard Test Method for Preparation and Determination of the Relative Density of Hot-Mix Asphalt (HMA) Specimens by Means of the Superpave Gyrotory Compactor**. Washington. 2009.

\_\_\_\_\_. **ASTM D2 872 – Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test)**. Washington. 2012.

\_\_\_\_\_. **ASTM D 6816 – Standard Practice for Determining Low-Temperature Performance Grade (PG) of Asphalt Binders**. Washington. 2016.

\_\_\_\_\_. **ASTM D 2172 – Standard Test Methods for Quantitative Extraction of Asphalt Binder from Asphalt Mixtures**. Washington. 2017.

\_\_\_\_\_. **ASTM D 1856 – Standard Test Method for Recovery of Asphalt from Solution by Abson Method**. Washington. 2021.

ANTUNES, V.; FREIRE, A. C.; NEVES, J. A review on the effect of RAP recycling on bituminous mixtures properties and the viability of multi-recycling. **Construction and Building Materials**. v. 211, p. 453–469. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.258>.

ARÁMBULA-MERCADO, E.; KASEER, F.; MARTIN, A. E.; YIN, F.; CUCALON, L. G. Evaluation of recycling agent dosage selection and incorporation methods for asphalt mixtures with high RAP and RAS contents. **Construction and Building Materials**. v. 15, p. 432–442. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.024>.

ASPHALT INSTITUTE. **Asphalt Mix Design Methods**. 2014.

ASPHALT HOT-MIX RECYCLING. **Manual Series No. 20 (MS-20) Second Edition**. 1986.

ASPHALT RECYCLING AND RECLAIMING ASSOCIATION – ARRA. **Basic Asphalt Recycling Manual (BARM2)**. 2<sup>nd</sup> edition. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **NBR 15184 – Materiais betuminosos – Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional**. Brasília. 2005.

\_\_\_\_\_. **NBR 16018 - Misturas asfálticas – Determinação da rigidez por compressão diametral sob carga repetida**. Brasília. 2011.

\_\_\_\_\_. **NBR 16505 - Misturas asfálticas – Resistência à deformação permanente utilizando o ensaio uniaxial de carga repetida**. Brasília. 2016.

AYAR, P.; MORENO-NAVARRO, F.; RUBIO-GAMEZ, M. C. The *healing* capability of asphalt pavements: a state-of-the-art review. **Journal of Cleaner Production**. v. 113, p. 28-40. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.034>.

BAAJ, H.; MILHAILENKO, P.; ALMUTAIRI, H.; DI BENEDETTO, H. Recovery of asphalt mixture stiffness during fatigue loading rest periods. **Construction and Building Materials**. v. 158, p. 591-600. 2017.

BARROS, A. G. **O efeito do uso de agentes rejuvenescedores encapsulados sobre o self-healing em misturas asfálticas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande – PB. 2020.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA; L. M. G. D.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica: Formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro, 2<sup>a</sup> edição. 2010.

BOHN, K. A. **Avaliação de Misturas Asfálticas Recicladas Mornas com Uso de Ligantes Convencional e Modificado por Polímero**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria – RS. 2017.

BOHN, K. A. A.; SPECHT, L. P.; BRONDANI, C.; CORREA, B. M.; PINHEIRO, G. S.; EIDT, K. G.; BARBOZA JUNIOR, V. S.; BOEIRA, F. D.; PEREIRA, D. S. Avaliação de misturas asfálticas recicladas mornas com uso de ligantes convencional e modificado por polímero. **Revista Transportes**. v. 28, n. 1, p. 18-32. 2020. DOI: <https://doi.org/10.14295/transportes.v27i4.1740>.

BONFIM, V. **Fresagem de pavimentos asfálticos**. 3<sup>a</sup> ed. rev. e atual. – São Paulo: Exceção Editorial, 2007.

BORGES, R. L. **Deformação permanente em misturas asfálticas a partir do shift model viscoplástico e ensaios triaxiais de carga repetida**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes). Universidade Federal do Ceará. Fortaleza – CE. 2014.

BROSSEAUD, Y. **Reciclagem de misturas asfálticas: Evolução após 20 anos e a situação atual na França**. In: 7<sup>o</sup> Congresso Brasileiro de Rodovias e Concessões. 2011.

CANCHANYA, J. P. **Avaliação do comportamento mecânico e reológico de mistura asfáltica com adição de 20% de material fresado – RAP**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis - SC. 2017.

CARLESSO, G. C. **Estudo do comportamento de mistura asfáltica modificada por nanoargila e polímero SBS**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis – SC. 2017.

CARPENTER S. H.; SHEN S. Dissipated Energy Approach to Study Hot-Mix Asphalt *Healing* in Fatigue. **Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board**. v. 1, p. 178-185. 1970. DOI: <https://doi.org/10.1177/0361198106197000119>.

CENTOFANTE, R. **Estudo Laboratorial da Utilização de Material Fresado em Misturas Asfálticas Recicladas à quente**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria – RS. 2016.

CENTOFANTE, R.; SPECHT, L. P.; ALMEIDA, P. O. B. D.; PINHEIRO, R. J. B.; e PEREIRA, D. D. S. Avaliação do comportamento de misturas asfálticas recicladas a quente com inserção de material fresado. **Matéria** (Rio de Janeiro), v. 23, 2018.

CHOI, Y. T. **Development of a mechanistic prediction model and test protocol for the permanent deformation of asphalt concrete**. Tese (Doutorado em Filosofia). North Carolina State University. North Carolina. 2013.

CLARK, B. R.; GALLAGE, C. Superior performance benefits of multigrade bitumen asphalt with recycled asphalt pavement additive. **Construction and Building Materials**. v. 230, p. 116963. 2020.

COFFEY, S.; DUBOIS, E.; MEHTA, Y.; PURDY, C. Determining the impact of degree of blending and quality of reclaimed asphalt pavement on predicted pavement performance using pavement ME design. **Construction and Building Materials**. v. 48, p. 473–478. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.012>.

COLPO, G. B. **Análise de Fadiga de Misturas Asfálticas Através do Ensaio de Flexão em Viga Quatro Pontos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre - RS. 2014.

CRAVO, M. C. C. **Efeitos do envelhecimento térmico e fotoquímico em ligantes asfálticos, mastique e matriz de agregados finos**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ. Rio de Janeiro – RJ. 2016.

DAI, Q.; WANG, Z.; MOHD HASAN, M. R.; Investigation of induction *healing* effects on electrically conductive asphalt mastic and asphalt concrete beams through fracture-*healing* tests. **Construction and Building Materials**. v.49, p. 729–737. 2013.

DAS, B. P.; DAS, S.; SIDDAGANGAIAH, A. K. Probabilistic modeling of fatigue damage in asphalt mixture. **Construction and Building Materials**. v. 269, p. 121300. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121300>.

DE LA ROCHE, C.; GABET, T.; VAN DE VEN, M.; VAN DEN BERGH, W.; GRENFELL, J. **Results of Interlaboratory Tests on a Laboratory Bituminous Mixtures Ageing Protocol**. In: 11th International Conference on Asphalt Pavements. 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURAS DE TRANSPORTES – DNIT – ES **033/21. Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico reciclado em usina a quente – Especificação de serviço**. Rio de Janeiro, 2021.

\_\_\_\_\_. **DNIT 078/94. Agregado Graúdo: Adesividade ao Ligante Asfáltico**. Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_\_. **DNIT-ME 086/1994 – Agregado – determinação do índice de forma.** Rio de Janeiro. 1994.

\_\_\_\_\_. **DNIT – ME 054/97. Equivalente Areia.** Rio de Janeiro, 1997.

\_\_\_\_\_. **DNIT – ME 035/98. Agregados – Determinação da Abrasão Los Angeles.** Rio de Janeiro, 1998.

\_\_\_\_\_. **DNIT – ME 083/98. Agregados – Análise Granulométrica.** Rio de Janeiro, 1998.

\_\_\_\_\_. **DNIT – ME 385/99 – Pavimentação – concreto asfáltico com asfalto polímero.** Rio de Janeiro. 1999.

\_\_\_\_\_. **DNIT – ME 031/2006 – Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de serviço.** Rio de Janeiro. 2006.

\_\_\_\_\_. **DNIT 136/18 – Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral.** Rio de Janeiro, 2018.

\_\_\_\_\_. **DNIT – ME 131/10 – Materiais asfálticos – Determinação do ponto de amolecimento – Método do Anel e Bola.** Rio de Janeiro. 2010.

\_\_\_\_\_. **DNIT – ME 155/10 – Material asfáltico – Determinação da penetração.** Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_. **DNIT – ME 180/18 – Pavimentação – Misturas asfálticas – Determinação do dano por umidade induzida.** Rio de Janeiro. 2018.

\_\_\_\_\_. **DNIT – ME 183/18 – Pavimentação asfáltico – Ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada.** Rio de Janeiro. 2018.

\_\_\_\_\_. **DNIT – ME 184/18 – Pavimentação – Misturas asfálticas – Ensaio uniaxial de carga repetida para determinação da resistência à deformação permanente.** Rio de Janeiro. 2018.

\_\_\_\_\_. **DNIT – ME 135/18 – Pavimentação asfáltico – Misturas asfálticas – Determinação do modulo de resiliência.** Rio de Janeiro. 2018.

\_\_\_\_\_. **DNIT – ME 411/19 – Pavimentação asfáltico – Misturas asfálticas – Massa específica, densidade relativa e absorção de agregado miúdo para misturas asfálticas.** Rio de Janeiro, 2019.

\_\_\_\_\_. **DNIT – ME 413/19 – Pavimentação – Misturas asfálticas – Massa específica, densidade relativa e absorção de agregado graúdo para misturas asfálticas.** Rio de Janeiro -. 2019.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. **Reclaimed asphalt pavement in asphalt mixtures: state of the practice.** 2011.

FERNÁNDEZ-GÓMEZ, W. D.; QUINTANA, H. A. R.; DAZA, C. E.; LIZCANO, F. A. R. The effects of environmental aging on Colombian asphalts. **Fuel**, v. 115, p. 321-328, 2014.

FRANCISCO, A. P. S. **Comportamento estrutural de pavimentos rodoviários flexíveis**. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Construção). Instituto Politécnico de Bragança. 2012.

FROSSARD, R. M. **Influência da adesividade ligante-agregado nas propriedades de fratura de misturas asfálticas sujeitas ao dano por umidade**. 122 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Espírito Santo. 2021.

GARCÍA, Á. *Self-healing* of open cracks in asphalt mastic. **Fuel**. v. 93, p. 264–272. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.09.009>.

GARCIA, A.; BUENO, M.; NORAMBUENA-CONTRERAS, J.; PARTL, M. Induction *healing* of dense asphalt concrete. **Construction and Building Materials**. v. 49, p. 1–7. 2013.

GARCÍA, Á.; SCHLANGEN, E.; VAN DER VEN, M.; VAN VLIET, D. Induction heating of mastic containing conductive fibers and fillers. **Materials and Structures**. v. 44, n. 2, p. 499- 508. 2011.

GENNESSEAU, M. M. L. **Avaliação da durabilidade de misturas asfálticas a quente e mornas contendo material asfáltico fresado**. Tese (Doutorado em Engenharia). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2015.

GONÇALVES, A. K. L.; ESPÍNDOLA, A. C. **Diagnóstico da condição dos pavimentos das rodovias federais do Estado do Piauí**. In: Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes. p. 899-910. 2020.

GONZALEZ, A.; NORAMBUENA-CONTRERAS, J.; STOREY, L. *Self-healing* properties of recycled asphalt mixtures containing metal waste: an approach through microwave radiation heating. **Journal of Environmental Management**. v. 214, p. 242-25. 2018.

GRANT, T. P. **Determination of asphalt mixture *healing* rate using the Superpave indirect tensile test**. Tese (Doutorado). University of Florida. 2001.

GRIFFITH, A. A. The phenomena of rupture and flow in solids. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London**. v. 221. p. 163- 198.1921.

HAJI, E. Y.; SEBAALY, P. E.; WEST, R.; MORIAN, N.; LORIA, L. Recommendations for the characterization of RAP aggregate properties using traditional testing and mixture volumetrics. **Road Materials and Pavement Design**. v. 13, p. 209-233. DOI: <https://doi.org/10.1080/14680629.2012.657072>.

HUANG, Y.H. **Pavement Analysis and Design**. New Jersey, Prentice Hall Inc. 1993.

HUANG, M.; HUANG, W. Laboratory investigation on fatigue performance of modified asphalt concretes considering *healing*. **Construction and Building Materials**. v. 113, p. 68-76, 2016.

HUANG, B.; SHU, X.; ZUO, G. Using notched semicircular bending fatigue test to characterize fracture resistance of asphalt mixtures. **Engineering Fracture Mechanics**. v. 109, p. 78-88. 2013.

HUANG, B.; ZHANG, Z.; KINGERY, W.; ZUO, G. **Fatigue crack characteristics of HMA mixtures containing RAP**. In Fifth Int RILEM Conf Reflective Crack Pavements. p. 631-638. 2004.

HUSSEIN, Z. H.; YAACOB, H.; IDHAM, M. K.; HASSAN, N. A.; CHOY, L. J.; JAYA, R. P. **Restoration of Aged Bitumen Properties Using Maltenes**. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/713/1/012014>.

IM, S.; ZHOU, F.; LEE, R.; SCULLION, T. Impacts of rejuvenators on performance and engineering properties of asphalt mixtures containing recycled materials. **Construction and Building Materials**. v. 53, p. 596-603. 2014.

IRWIN, G. Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate. **Journal of Applied Mechanics**. v. 24, p. 361-364. 1957.

ISLAM, M. R.; MANNAN, U.; TAREFDER, R. Effects of Reclaimed Asphalt Pavement on Hot-mix Asphalt. **Advances in Civil Engineering Materials**. v. 3, n. 1, p. 20140002. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1520/acem20140002>.

IZAKS, R.; HARITONOV, V.; KLASA, I.; ZAUMANIS, M. Hot mix asphalt with high RAP content. **Procedia Engineering**. v. 114, p. 676–684. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.009>.

IZAKS R.; HARITONOV, V.; ZAUMANIS, M. **Hot mix asphalt with high rap content**. In: 1st International Conference on Structural Integrity. p. 676-684. 2002.

KARLSSON, R.; ISACSSON, U. Material related aspects of asphalt recycling - state of the art. **Journal of materials in civil engineering**. v. 18. n. 1. 2006

KIM, Y.; LITTLE, D.; LYTTON, R. **Use of dynamic mechanical analysis (DMA) to evaluate the fatigue and healing potential of asphalt binders in sand asphalt mixtures**. Asphalt Paving Technology: Association of Asphalt Paving Technologists-Proceedings of the Technical Sessions. v.71, p. 176-206. 2002

KIM, Y. R.; HINTZ, C.; RAD, F. Y. R.; ELWARDANY, M.; UNDERWOOD, S.; FARRAR, M. J.; GLASER, R. R. **Long-term aging of asphalt mixtures for performance testing and prediction** (Quarterly Report, National Cooperative Highway Research Program, No. Project 9-54). Washington, DC: National Research Council. 2015.

KODIPPILY, S.; HOLLERAN, G.; WILSON, D.; HENNING, T. F. P. **Effects of polymer modified binder on the deformation and cracking performance of recycled asphalt paving mixes**. In: Transportation Research Board 94th Annual Meeting, Washington DC, United States of America. 2015. p. 11-15.

KRIZ, P.; GRANT, D. L.; VELOZA, B. A.; GALE, M. J. BLAHEY, A. G.; BROWNIE, J. H. Blending and diffusion of reclaimed asphalt pavement and virgin asphalt binders. **Asphalt Paving Technology: Association of Asphalt Paving Technologists-Proceedings of the Technical Sessions**. v. 83, p. 225–270. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1080/14680629.2014.927411>.

LIANG, B.; LAN, F.; SHI, K.; QUIAN, G.; LIU, Z.; ZHENG, J. Review on the self-healing of asphalt materials: Mechanism, affecting factors, assessments, and improvements. **Construction and Building Materials**. v. 266, p. 120453. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120453>.

LIMA, A. T. **Caracterização mecânica de misturas asfálticas recicladas à quente**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) Universidade Federal do Ceará, Fortaleza – CE. 2003.

LIPHARDT, A.; KRÓL, J.; RADZISZEWSKI, P. Influence of polymer modified binder content from RAP on stone mastic asphalt rutting resistance. **Procedia Engineering**, v. 153, p. 407-413, 2016.

LO PRESTI, D.; VASCONCELOS, K.; OREŠKOVIĆ, M.; MENEGUSSO G.P.; BRESSI, S. On the degree of binder activity of reclaimed asphalt and degree of blending with recycling agents. **Road Materials and Pavement Design**. 2019.

LUZZI, F. C. **Adaptação de usina para reciclagem à quente e avaliação laboratorial das misturas asfálticas produzidas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Centro de Tecnologia. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria – RS. 2019.

MA, T.; HUANG, X.; ZHAO, Y.; ZHANG, Y. Influences of preheating temperature of RAP on properties of hot-mix recycled asphalt mixture. **Journal of Testing and Evaluation**. v. 44, n.2, p. 762–769. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1520/JTE20150157>.

MANGIAFICO, S. **Linear viscoelastic properties and fatigue of bituminous mixtures produced with Reclaimed Asphalt Pavement and corresponding binder blends**. 2014.

MARCON, M. F. **Estudo e comparação do desempenho mecânico e reológico entre concretos asfálticos modificados por polímero SBS, borracha moída de pneu e nanomateriais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria – RS. 2016.

MARDER, F.; MALYSZ, R. Reaproveitamento de Material Fresado em Acostamentos de Rodovias. **Revista Fundações e Obras Geotécnicas**. v. 7, p. 54-58. 2016.

MCDANIEL, R.; ANDERSON, M. R. **NCHRP REPORT 452 - Recommended Use of Reclaimed Asphalt Pavement in the Superpave Mix Design Method: Technician's Manual** TRANSPORTATION, National Cooperative Highway Research Program. 2001.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos Pavimentos**. 3ª ed. Rio de Janeiro. 2015.

MEJIDE-GÓMEZ, B.; AJAM, H.; GONZÁLES-LASTRA, P.; GARCIA, A. Effect of ageing and RAP content on the induction *healing* properties of asphalt mixtures. **Construction and Building Materials**. v. 179, p. 468-476. 2018.

MIKHAILENKO, P.; ATAEIAN, P.; BAAJ, H. Extraction and recovery of asphalt binder: a literature review. **International Journal of Pavement Research and Technology**. v. 13, n. 1, p. 20–31. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42947-019-0081-5>.

MOGHADAS NEJAD, F.; HAMED, G. H.; AZARHOOSH, A. R. Use of surface free energy method to evaluate effect of hydrate lime on moisture damage in hot-mix asphalt. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 25, n. 8, p. 1119-1126. 2013. DOI: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000650

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

MULLAPUDI, R. S.; NOOJILLA, S. L. A.; KUSAM, S. R. Effect of initial damage on *healing* characteristics of bituminous mixtures containing reclaimed asphalt material (RAP).

**Construction and Building Materials.** v. 262, p. 120808. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120808>.

NASCIMENTO, L. A. H. **Implementation and Validation of the Viscoelastic Continuum Damage Theory for Asphalt Mixture and Pavement Analysis in Brazil.** Tese (Doutorado). North Carolina State University. Raleigh - NC. 2014.

NASCIMENTO, L. A. H.; CHACUR, M.; LEITE, L. F. M. **Uso do Compactador Giratório na Previsão do Desempenho de Misturas Asfálticas.** In: 19º Encontro de Asfalto – IBP. Rio de Janeiro - RJ. 2008.

NEWCOMB, D. E.; RAY BROWN, E.; EPPS, J. A. Designing HMA mixtures with High RAP content: A practical guide - NAPA, Quality Improvement Series 124. **National Asphalt Pavement Association (NAPA).** p. 41. 2007.

NOROUZI, A.; SABOURI, M.; KIM, Y. R. **Evaluation of the Fatigue Performance of Asphalt Mixtures with High RAP Content.** In: Asphalt Pavements. p. 1069- 1077. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1201/b17219-132>

OBANDO, J. R. A. **Desempenho de misturas asfálticas reforçadas com geossintéticos.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade de Brasília. Brasília - DF. 2016

PASETTO, M.; BALDO, N. **Fatigue Performance of Recycled Hot Mix Asphalt: A Laboratory Study.** In: Advances in Materials Science and Engineering. New York – EUA. 2017

PLESCAN, E. L.; PLESCAN, C. Asphalt Pavement Recycling. **Bulletin of the Transilvania University of Braşov.** v. 8, n. 1, p. 265–270. 2015.

PORTO, T. R. **Utilização do óxido de ferro em misturas asfálticas objetivando reduzir os efeitos das ilhas de calor urbano.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande – PB. 2019.

REDELIUS, P.; SOENEN, H. Relation between bitumen chemistry and performance. **Fuel.** v. 140, p. 34-43, 2015.

REYES, O. J.; BERARDINELLI, E.; ALVAREZ, A. E.; CARVAJAL-MUÑOZ, J. S. SIIV - 5th International Congress - Sustainability of Road Infrastructures Evaluation of hot mix asphalt mixtures with replacement of aggregates by reclaimed asphalt pavement (RAP) material. **Procedia - Social and Behavioral Sciences.** v. 53, p. 379–388. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.09.889>.

RODRIGUES, R. M. **Estudo do Trincamento dos Pavimentos.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro – RJ. 1991.

SABOURI, M. Evaluation of performance-based mix design for asphalt mixtures containing Reclaimed Asphalt Pavement (RAP). **Construction and Building Materials.** v. 235, p. 117545. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117545>.

SANTANA-GRECO, J. A.; FABBRI, G. T. P. **Avaliação dos Efeitos do Envelhecimento e da Adição de Modificadores ao Ligante na Deformação Permanente Sofrida por Misturas Asfálticas Densas.** In: XVIII ANPET (Congresso) de Pesquisa e Ensino em Transportes. Brasil. 2004.

SCHUSTER, S. L. **Estudo do comportamento à fadiga de misturas asfálticas aplicadas em campo por meio da teoria viscoelástica de dano contínuo**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria - RS. 2018.

SCHLANGEN, E.; XU, S.; GONZALEZ, A.; NORAMBUENA-CONTRERAS, J. **Self-Healing Asphalt: the cure for potholes**. 2017.

SENGOZ, B.; TOPAL, A.; ONER, J.; YILMAZ, M.; DOKANDARI, P. A.; KOK, B. V. Performance evaluation of warm mix asphalt mixtures with recycled asphalt pavement. **Periodica Polytechnica Civil Engineering**. v. 61, n. 1, p. 117–127. 2017. DOI: <https://doi.org/10.3311/PPci.8498>.

SHAN, L.; TAN, Y.; UNDERWOOD, B. S.; KIM, Y. R. Separation of Thixotropy from Fatigue Process of Asphalt Binder. **Transportation Research Record**. v. 2207, n. 1, p. 89–98. 2011. DOI: <https://doi.org/10.3141/2207-12>.

SHEN, S.; LU, X.; LIU, L.; ZHANG, C. Investigation of the influence of crack width on *healing* properties of asphalt binders at multi-scale levels. **Construction and Building Materials**. v. 126, p. 197–205. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.107>.

SHIRODKAR, P.; MEHTA, Y.; NOLAN, A.; SONPAI, K. A study to determine the degree of partial blending of reclaimed asphalt pavement (RAP) binder for high RAP hot mix asphalt. **Construction and Building Materials**. v. 25, n. 1, p. 150–155. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.045>.

SHU, X.; HUANG, B.; VUKOSAVLJEVIC, D. Laboratory evaluation of fatigue characteristics of recycled asphalt mixture. **Construction and Building Materials**. v. 22, n. 7, p. 1323-1330. 2008.

SILVA, J. P. S.; ARAÚJO, R. F. Estudo do envelhecimento dos ligantes asfálticos a partir do Modelo de Arrhenius. **Desafios - Revista Interdisciplinar da Universidade Federal do Tocantins**. v. 3, n. 1, p. 107–120. 2016. DOI: <https://doi.org/10.20873/uft.2359-3652.2016v3n1p107>.

SILVA, J. P. S.; FARIAS, M. M. Estudo dos efeitos de produtos rejuvenescedores no comportamento físico, químico e reológico de ligante asfáltico envelhecido. **Revista Transportes**. v. 28, n. 3, p. 91-102. 2020. DOI: <https://doi.org/10.14295/transportes.v28i3.1874>.

SILVA, S.; ROQUE, A. C.; RODY, H. A. Processo de Fabricação de Misturas à Quente Realizadas em Usina Gravimétrica: O Caso Da Usina De Asfalto Antônio Ramos. **Projectus**. v. 1, n. 3, p. 106-118, 2017.

SILVEIRA, G. D. **Determinação de compostos organosulfurados como marcadores dos processos de envelhecimento em matrizes asfálticas**. Tese (Doutorado em Química). Programa de Pós-Graduação em Química. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria - RS, 2018.

SINGH, S.; RANSINCHUNG, G. D.; KUMAR, P. An economical processing technique to improve RAP inclusive concrete properties. **Construction and Building Materials**. v. 148, p. 734–747. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.030>.

SOLAIMANIAN, M.; BOLZAN, P. Analysis of the integrated model of climatic effects on pavements. **Strategic Highway Research Program**, National Research Council, 1993.

SONDAG, M. S.; CHADBOURN, B. A. e DRESCHER, A. **Investigation of recycled asphalt pavement (RAP) mixtures**. Report N° MN/RC-2002-15, Minnesota Department of Transportation, St. Paul, MN. 2002.

SU, J. F.; YANG, P.; WANG, Y. Y.; HAN, S.; LI, W. Investigation of the self- *healing* behaviors of microcapsules/bitumen composites by a repetitive direct tension test. **Materials**. v. 9, n. 7, p. 1-8. 2016.

SUZUKI, K. Y. **Avaliação de misturas asfálticas recicladas a quente com diferentes teores de material fresado**. Dissertação (Mestrado em Ciências). Universidade de São Paulo. São Paulo - SP. 2019.

TAPSOBA, N.; SAUZÉAT, C.; DI BENEDETTO, H.; BAAJ, H.; ECH, M. Behaviour of asphalt mixtures containing reclaimed asphalt pavement and asphalt shingle. **Road Materials and Pavement Design**. v. 15, n. 2, p. 330–347. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1080/14680629.2013.871091>.

UNGER FILHO, W. **Estudo de mistura asfáltica reciclada a frio produzida com 100% de revestimento asfáltico fresado e agente de reciclagem emulsionado**. Dissertação (Mestrado em Ciências). Universidade de São Paulo. São Paulo – SP. 2019.

VALDÉS, G.; PÉREZ-JIMÉNEZ, F.; MIRÓ, R.; MARTÍNEZ, A.; BOTELLA, R. Experimental study of recycled asphalt mixtures with high percentages of reclaimed asphalt pavement (RAP). **Construction and Building Materials**. v. 25, p. 1289-1295. 2011. DOI:

VARGAS, G. A. B. **Caracterização Numérico-Experimental de Propriedades de Fratura de Misturas Asfálticas de Agregados Finos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro – RJ. 2016.

VEERARAGAVAN, R. K.; MALLICK, R. B.; TAO, M.; ZAUMANIS, M. Laboratory comparison of rejuvenated 50% reclaimed asphalt pavement hot-mix asphalt with conventional 20% RAP mix. **Transportation Research Record**. v. 2633, n. 1, p. 69–79. 2017. DOI: <https://doi.org/10.3141/2633-09>.

WANG, Y. D.; KESHAVARZI, B.; KIM, Y. R. Fatigue Performance Analysis of Pavements with RAP Using Viscoelastic Continuum Damage Theory. **Journal of Civil Engineering**. v. 22, n. 6, p. 2118-2125. 2018

WEST, R. C. Best Practices for RAP and RAS Management - NAPA, Quality Improvement Series 129. **National Asphalt Pavement Association (NAPA)**. p. 1–44. 2015.

WEST, R.; TIMM, D.; WILLIS, R.; POWELL, B.; TRANS, N.; WATSON, D.; SAKHAEIFAR, M.; BROWN, R.; ROBBINS, M.; VARGAS-NORDCBECK, A.; VILLACORTA, F. L.; GUO, X.; NELSON, J. **Phase IV NCAT Pavement Test Track Findings**. NCAT Report 12-10. Auburn, AL. 2012.

WOOL, R. P.; O'CONOOR, K. M. A theory of crack *healing* in polymers. **Journal of Applied Physics**. v. 52, p. 5953-5963. 1981.

WU, S.; QIU, J.; MO, L.; YU, J.; ZHANG, Y.; LI, B. Investigation of Temperature Characteristics of Recycled Hot Mix Asphalt Mixtures. **Resources, conservation, and Recycling**. v. 51, n. 3, p. 610–620. 2007.

XU, S.; GARCIA, A.; SU, J.; LIU, Q.; TABAKOVIC, A.; SCHLANGEN, E. Self-Healing Asphalt Review: From Idea to Practice. **Advanced Materials Interfaces**, v. 5, n. 17, p. 1800536. 2018.

YAN, Y.; ROQUE, R.; HERNANDO, D.; CHUN, S. Cracking Performance Characterization of Asphalt Mixtures Containing Reclaimed Asphalt Pavement with Hybrid Binder. **Road Materials and Pavement Design**. v. 20, n. 2, p. 347-366. 2019.

YIN, F.; ARÁMBULA-MERCADO, E.; MARTIN, A. E.; NEWCOMB, D.; TRAN, N. Long-term ageing of asphalt mixtures. **Road Materials and Pavement Design**. v. 18, p. 2–27. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1080/14680629.2016.1266739>.

ZAPPE, A. P. S. **Avaliação de Diferentes Fontes de Material Fresado com Ligantes Não-Convencionais na Reciclagem à Quente**. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre – RS. 2020.

ZAUMANIS, M.; MALLICK, R. B. Review of very high-content reclaimed asphalt use in plant-produced pavements: state of the art. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 16, n. 1, p. 39-55, 2015.

ZAUMANIS, M.; MALLICK, R. B.; POULIKAKOS, L.; FRANK, R. Influence of six rejuvenators on the performance properties of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) binder and 100 % recycled asphalt mixtures. **Construction and Building Materials** v. 71, p. 538–550. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.073>.

ZAUMANOS, M.; CAVALLI, M. C.; POULIKAKOS, L. D. Effect of rejuvenator addition location in plant on mechanical and chemical properties of RAP binder. **International Journal of Pavement Engineering**. v. 21, n. 4, p. 507-515. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1080/10298436.2018.1492133>.

ZHANG, J.; SUN, C.; LI, P.; JIANG, H.; LIANG, M.; YAO, Z.; ZHANG, X. AIREY, G. Effect of different viscous rejuvenators on chemical and mechanical behavior of aged and recovered bitumen from RAP. **Construction and Building Materials**. v. 239, p. 117755. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117755>.

ZHAO, S.; HUANG, B.; SHU, X.; JIA, X.; WOODS, M. Laboratory performance evaluation of warm-mix asphalt containing high percentages of reclaimed asphalt pavement. **Transportation Research Record**. v, 2294, p. 98–105. 2012. DOI: <https://doi.org/10.3141/2294-11>.

ZHU, X.; CAI, Y.; ZHONG, S.; ZHU, J.; ZHAO, H. Self-healing efficiency of ferrite-filled asphalt mixture after microwave irradiation. **Construction and Building Materials**. v. 14, p. 12–22. 2017.