



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS  
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**ANÁLISE DO ENVELHECIMENTO, RIGIDEZ E SUSCETIBILIDADE À PRESENÇA  
DE ÁGUA EM MISTURAS RECICLADAS COM ADIÇÃO DE AGENTES DE  
RECICLAGEM**

**Daniel Beserra Costa**

Campina Grande-PB

2022

DANIEL BESERRA COSTA

**ANÁLISE DO ENVELHECIMENTO, RIGIDEZ E SUSCETIBILIDADE À PRESENÇA  
DE ÁGUA EM MISTURAS RECICLADAS COM ADIÇÃO DE AGENTES DE  
RECICLAGEM**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil e Ambiental.

Área de Concentração: Geotecnia.

Linha de Pesquisa: Mecânica e Gerência de Pavimentos.

Orientador: Adriano Elísio de Figueirêdo  
Lopes Lucena

Coorientadora: Lêda Christiane de  
Figuêiredo Lopes Lucena

Campina Grande-PB

2022

C837a Costa, Daniel Beserra.  
Análise do envelhecimento, rigidez e suscetibilidade à presença de água em misturas recicladas com adição de agentes de reciclagem / Daniel Beserra Costa. – Campina Grande, 2022.  
239 f. : il. : color.

Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2022.

"Orientação: Prof. Dr. Adriano Elísio de Figueirêdo Lopes Lucena; Coorientação: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Lêda Christiane de Figueiredo Lopes Lucena".

Referências.

1. Pavimentação Asfáltica. 2. Material Fresado. 3. RAP. 4. Óleo Residual de Motor. 5. ADCAP WM. 6. Trincamento. I. Lucena, Adriano Elísio de Figueirêdo Lopes. II. Lucena, Lêda Christiane de Figueiredo Lopes. IV. Título.

CDU 625.8(043)

DANIEL BESERRA COSTA

**ANÁLISE DO ENVELHECIMENTO, RIGIDEZ E SUSCETIBILIDADE À  
PRESENÇA DE ÁGUA EM MISTURAS RECICLADAS COM ADIÇÃO DE  
AGENTES DE RECICLAGEM**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil e Ambiental.


Aprovado em: 12 / 05 / 2022

**BANCA EXAMINADORA**

*Adriano Elísio de F. de Lucena*

Prof. Dr. Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena (UFCG)

Orientador

 Documento assinado digitalmente  
LÉDA CHRISTIANE DE FIGUEIREDO LOPES LUCENA  
ID: 2196/2022-214259-930  
Verifique em <https://verificador.dl.br>


Profª. Dra. Lêda Christiane de Figueiredo Lopes Lucena (UFCG)

Coorientador

*Ana Maria Gonçalves Duarte Mendonça*

Profª. Dra. Ana Maria Gonçalves Duarte Mendonça (PNPD UFCG)

Membro interno

 Documento assinado digitalmente  
Francisco Thiago Sacramento Aragão  
Data: 21/05/2022 14:22:28-0300  
Verifique em <https://verificador.dl.br>

Prof. Dr. Francisco Thiago Sacramento Aragão (UFRJ - COPPE)

Examinador Externo

FABIANO PEREIRA  
CAVALCANTE 910  
39266487

Assinado de forma digital  
por FABIANO PEREIRA  
CAVALCANTE 910/26487  
Data: 2022.06.31 13:04:55  
-0300

Prof. Dr. Fabiano Pereira Cavalcante (JBR Engenharia Ltda)

Examinador Externo

JONNY DANTAS  
PATRICIO:07165586458

Assinado de forma digital por JONNY  
DANTAS PATRICIO:07165586458  
Data: 2022.06.31 13:04:34 -0300

Dr. Jonny Dantas Patricio

Examinador Externo

## DEDICATÓRIA

A DEUS, que até aqui me guiou.

À razão do meu viver: meus pais, Francisco de Assis da Costa e Claudezir Beserra Costa, minhas irmãs, Dayse Beserra Costa e Dayane Beserra Costa, e meu filho, Leonard Luna Costa, pelo amor gratuito, verdadeiro e eterno.

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, Francisco de Assis da Costa e Claudezir Beserra Costa, por todo esforço que fazem, pelo apoio, confiança e incentivo em cada etapa da minha vida. Ao meu filho Leonard Luna Costa por tudo que tem me ensinado. As minhas irmãs, Dayse e Dayane, por nossas arengas, pelo companheirismo e pelo amor que sempre me deram. A todos os demais familiares, que sempre me deram forças.

Ao meu orientador professor Dr. Adriano Elísio de Figueirêdo Lopes Lucena que acreditou e confiou em mim em um momento bem conturbado do doutorado, só tenho a agradecer toda a orientação e paciência.

A minha Coorientadora professora Dra. Lêda Christiane de Figueiredo Lopes Lucena pela atenção, amizade, orientação e compreensão durante todo esse tempo. Às vezes me chamando atenção, desde a graduação, mas sempre contribuindo com minha evolução pessoal.

Aos professores Dra. Ana Maria, Dr. Fabiano Cavalcante e Dr. John Kennedy por toda ajuda, apoio, amizade e conhecimento que me proporcionaram. Todos profissionais de excelência e grande fonte de inspiração durante o meu percurso acadêmico.

A todos os amigos e colegas da graduação e pós-graduação, sempre apoiando e dividindo dificuldades. Um agradecimento especial aos amigos Lidiane, Solomon, Laiana, Christian, Paulo, Conrado, Sonally, Priscila, Thamires, Leticia e Ablenya, que sempre que possível estiveram ao meu lado, ajudando e apoiando. Em especial Conrado, Christian e Paulo, grandes irmãos que a pós me proporcionou.

Aos meus companheiros de laboratório Jadilson, Joseildo, Ladijane, Arthur e todos os demais, com quem compartilhei alegrias e conhecimento.

A JBR Engenharia LTDA e ATECEL por toda a colaboração durante toda a minha vida acadêmica.

## RESUMO

Usualmente, a restauração de um pavimento envolve as etapas de fresagem do revestimento desgastado e aplicação de nova camada. A fresagem é processo mecânico de corte do revestimento do pavimento que gera um resíduo denominado fresado. As principais alternativas para a reutilização desse material na área de pavimentação são a utilização como estabilizante de bases e sub-bases ou como integrante da mistura asfáltica. As confecções de misturas recicladas devem considerar a presença do ligante envelhecido, do contrário a mistura reciclada apresentará baixa resistência ao trincamento. As diretrizes de projeto de mistura reciclado recomendam o rejuvenescimento do ligante oxidado por meio da adição de agentes de reciclagem (AR), que são aditivos redutores de viscosidade e, conseqüentemente, de temperatura. Por ser um componente de uso recente na pavimentação e a sua variedade, não existe um consenso na determinação do teor de AR ou o momento ideal de sua adição no processo de mistura dos asfaltos reciclados. A falta de concordância se deve a dificuldade de análise da interação entre os diversos ARs e o ligante envelhecimento presentes no fresado. Este trabalho teve como objetivo analisar misturas asfálticas com adição de alto teores de RAP (25%, 50%, 75% e 100%), de diferentes tipos de agentes de reciclagem (ADCAP WM e óleo residual de motor) e em etapas distintas da produção de mistura asfáltica reciclada (junto ao fresado, junto ao agregado e na adição ao ligante). Os resultados indicaram que é possível utilizar até 75% de fresado em misturas asfálticas recicladas, entretanto é necessário um acompanhamento detalhado de sua execução e desempenho ao longo de sua vida útil. Ao se adicionar óleo residual de motor é possível confeccionar misturas recicladas com adições de 50 e 75% de fresado, desde que a adição do óleo residual seja feita diretamente ao ligante novo. Para o caso de adições de ADCAP WM as mesmas adições podem ser realizadas e as configurações de adição podem ser acrescidas de adição do agente de reciclagem junto ao agregado. Por meio das análises realizadas nessa tese é possível afirmar que o máximo teor de RAP a ser aplicado deve ser 75% e a adição de ADCAP WM diretamente ao ligante apresentou resultados levemente melhores do que as demais combinações.

**Palavras-chaves:** Material fresado, RAP, Óleo residual de motor, ADCAP WM, trincamento.

## ABSTRACT

Usually, the restoration of a pavement involves the steps of milling the worn coating and applying a new layer. Milling is a mechanical process of cutting the floor covering that generates a residue called milled. The main alternatives for the reuse of this material in the paving area are the use as a stabilizer of bases and sub-bases or as an integral part of the asphalt mixture. The preparation of recycled mixtures must consider the presence of the aged binder, otherwise the recycled mixture will present low resistance to cracking. The recycled mix design guidelines recommend rejuvenating the oxidized binder through the addition of recycling agents (RA), which are viscosity and therefore temperature reducing additives. Because it is a component of recent use in paving and its variety, there is no consensus on the determination of the AR content or the ideal moment of its addition in the mixing process of recycled asphalts. The lack of agreement is due to the difficulty in analyzing the interaction between the various ARs and the aging binder present in the milled material. This study aimed to analyze asphalt mixtures with the addition of high levels of RAP (25%, 50%, 75% and 100%), of different types of recycling agents (ADCAP WM and residual engine oil) and in different stages of the production of recycled asphalt mix (next to milled, next to aggregate and in addition to binder). The results indicated that it is possible to use up to 75% of milled material in recycled asphalt mixtures, however, a detailed monitoring of its execution and performance throughout its useful life is necessary. By adding residual engine oil it is possible to make recycled mixtures with additions of 50 and 75% milled, provided that the addition of residual oil is made directly to the new binder. In the case of ADCAP WM additions, the same additions can be performed and the addition configurations can be added by adding the recycling agent to the aggregate. Through the analyzes carried out in this thesis, it is possible to state that the maximum RAP content to be applied should be 75%, the best additive, between the two used, is ADCAP WM, and the addition directly to the binder showed slightly better results.

**Palavras-chaves:** milled material, RAP, Engine residual oil, ADCAP WM, cracking.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Classificação ARRA (2015) para os métodos de reciclagem. ....	32
Figura 2 – Estratégias de reciclagem e recuperação para diferentes valores de serventia atual (VSA). ....	34
Figura 3 – Cenários de mistura entre ligante envelhecido e ligante virgem. ....	42
Figura 4 – Ilustração esquemática dos processos de produção de mistura reciclada. ....	56
Figura 5 – Modelo de usina fixa desenvolvida na NETAC. ....	59
Figura 6 – Modelos de usinas moveis de micro-ondas. ....	59
Figura 7 – Ensaios de fratura. ....	61
Figura 8 – Esquematização do ensaio de fratura por flexão em amostra semicircular. ....	62
Figura 9 – Critério para um resultado de teste válido. ....	63
Figura 10 – Peça opcional para facilitar a determinação da validade de um teste. ....	64
Figura 11 – Exemplos de ensaios validos. ....	64
Figura 12 – Exemplos de ensaios inválidos. ....	65
Figura 13 – Trabalho de fratura (a) e área de ligamento (b). ....	69
Figura 14 – Software I-FIT. ....	70
Figura 15 – Curva de fadiga, estágios de falha. ....	72
Figura 16 – Diferença entre os estados de tensão e deformação controlada no ensaio de fadiga. ....	73
Figura 17 – Fluxograma geral do programa experimental. ....	85
Figura 18 – Fluxograma de caracterização dos agregados e ligante asfáltico. ....	86
Figura 19 – Distribuição granulométrica dos agregados. ....	90
Figura 20 – Fluxograma de caracterização do RAP. ....	91
Figura 21 – Distribuição granulométrica do RAP. ....	93

Figura 22 – Evaporador rotativo para recuperação de ligante asfáltico. ....	94
Figura 23 – Recuperação do ligante envelhecido, estufa a vácuo. ....	95
Figura 24 – Distribuição granulométrica dos agregados. ....	97
Figura 25 – Composições granulométricas. ....	99
Figura 26 – Corpo de prova com 100% RAP, vista frontal (a) e vista superior (b). .	101
Figura 27 – Corpo de prova com 100% RAP com ADCAP WM, vista frontal (a) e vista superior (b). ....	101
Figura 28 – Corpo de prova com 100% RAP com óleo residual, vista frontal (a) e vista superior (b). ....	101
Figura 29 – Fluxograma dos ensaios mecânicos das misturas ensaiadas .....	102
Figura 30 – Esquema e acessório para o ensaio SCB. ....	108
Figura 31 – Ensaio de resistência a tração por compressão diametral. ....	114
Figura 32 – Resistência a tração por compressão diametral sem AR. ....	115
Figura 33 – Resistência a tração (amostras 100% de RAP + óleo residual de motor). ....	118
Figura 34 – Resistência a tração (amostras 75% de RAP + óleo residual de motor). ....	120
Figura 35 – Resistência a tração (amostras 50% de RAP + óleo residual de motor). ....	122
Figura 36 – Resistência a tração (amostras 100% de RAP + ADCAP WM). ....	125
Figura 37 – Resistência a tração (amostras 75% de RAP + ADCAP WM). ....	127
Figura 38 – Resistência a tração (amostras 50% de RAP + ADCAP WM). ....	129
Figura 39 – Ensaio de módulo de resiliência. ....	135
Figura 40 – Módulo de resiliência em amostras sem AR. ....	136
Figura 41 – Módulo de resiliência (amostras 100% de RAP + óleo residual de motor). ....	138
Figura 42 – Módulo de resiliência (amostras 75% de RAP + óleo residual de motor). ....	139

Figura 43 – Módulo de resiliência (amostras 50% de RAP + óleo residual de motor). .....	141
Figura 44 – Módulo de resiliência (amostras 100% de RAP + ADCAP WM). .....	143
Figura 45 – Módulo de resiliência (amostras 75% de RAP + ADCAP WM). .....	144
Figura 46 – Módulo de resiliência (amostras 50% de RAP + ADCAP WM). .....	146
Figura 47 – Ensaio de dano por umidade induzida condicionadas. ....	151
Figura 48 – Lottman condicionado F-T sem AR. ....	152
Figura 49 – Lottman condicionado F-T (amostras 100% de RAP + óleo residual de motor). ....	154
Figura 50 – Lottman condicionado F-T (amostras 75% de RAP + óleo residual de motor). ....	155
Figura 51 – Lottman condicionado F-T (amostras 50% de RAP + óleo residual de motor). ....	157
Figura 52 – Lottman condicionado F-T (amostras 100% de RAP + ADCAP WM). ..	159
Figura 53 – Lottman condicionado F-T (amostras 75% de RAP + ADCAP WM). ...	161
Figura 54 – Lottman condicionado F-T (amostras 50% de RAP + ADCAP WM). ...	163
Figura 55 – Curvas de fadiga amostras sem AR. ....	175
Figura 56 – Curvas de fadiga amostras 100% RAP com e sem óleo residual de motor. .....	177
Figura 57 – Curvas de fadiga amostras 75% RAP com e sem óleo residual de motor. .....	179
Figura 58 – Curvas de fadiga amostras 50% RAP com e sem óleo residual de motor. .....	181
Figura 59 – Curvas de fadiga amostras 100% RAP com e sem ADCAP WM. ....	182
Figura 60 – Curvas de fadiga amostras 75% RAP com e sem ADCAP WM. ....	183
Figura 61 – Curvas de fadiga amostras 50% RAP com e sem ADCAP WM. ....	185
Figura 62 – Gráfico de comportamento de ensaio SCB, amostra 100 P (a) e amostra 25 P (b). ....	188

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros para o ensaio SCB. ....	66
Tabela 2 – Correlação de envelhecimento em campo com protocolos LOTA de laboratório. ....	78
Tabela 3 – Caracterização reológica do ligante asfáltico utilizado na pesquisa. ....	87
Tabela 4 – Caracterização do agregado graúdo utilizado na pesquisa. ....	88
Tabela 5 – Caracterização do agregado miúdo utilizado na pesquisa. ....	89
Tabela 6 – Análise granulométrica dos agregados. ....	90
Tabela 7 – Caracterização dos agregados recuperados. ....	92
Tabela 8 – Análise granulométrica do RAP. ....	93
Tabela 9 – Teor de ligante do RAP. ....	94
Tabela 10 – Caracterização reológica do ligante asfáltico recuperado. ....	95
Tabela 11 – Caracterização dos agregados recuperados. ....	96
Tabela 12 – Análise granulométrica dos agregados recuperados. ....	97
Tabela 13 – Composições granulométricas. ....	98
Tabela 14 – Características volumétricas. ....	100
Tabela 15 – Modelo de apresentação de resultados do teste Tukey. ....	112
Tabela 16 – Modelo resumido de apresentação de resultados do teste Tukey. ....	112
Tabela 17 – Modelo de resultados do teste Tukey, comportamento similares. ....	112
Tabela 18 – Modelo resumido de resultados do teste Tukey, comportamentos similares. ....	112
Tabela 19 – Variação da RT entre amostras de 75% de RAP, em relação a NC. ....	122
Tabela 20 – Variação da RT entre amostras de 50% de RAP, em relação a NC. ....	123
Tabela 21 – Variação da RT entre amostras de 75% de RAP, em relação a NC. ....	128
Tabela 22 – Variação da RT entre amostras de 50% de RAP, em relação a NC. ....	130

Tabela 23 – ANOVA Resistencia a tração por compressão diametral amostras NC .....	132
Tabela 24 – ANOVA Resistencia a tração por compressão diametral amostras STA .....	132
Tabela 25 – ANOVA Resistencia a tração por compressão diametral amostras LOTA 5.....	132
Tabela 26 – Teste Tukey para a componente teor de RAP (RT).....	133
Tabela 27 – Teste Tukey para a componente agente de reciclagem (RT).....	133
Tabela 28 – Teste Tukey para a componente momento de adição (RT). ....	134
Tabela 29 – Variação do MR entre amostras de 75% de RAP, em relação a NC...140	
Tabela 30 – Variação do MR entre amostras de 50% de RAP, em relação a NC...142	
Tabela 31 – Variação da MR entre amostras de 75% de RAP, em relação a NC...145	
Tabela 32 – Variação da MR entre amostras de 50% de RAP, em relação a NC...147	
Tabela 33 – ANOVA Módulo de resiliência amostras NC .....	148
Tabela 34 – ANOVA Módulo de resiliência amostras STA .....	148
Tabela 35 – ANOVA Módulo de resiliência amostras LOTA 5.....	148
Tabela 36 – Teste Tukey para a componente teor de RAP (MR). ....	149
Tabela 37 – Teste Tukey para a componente agente de reciclagem (MR).....	149
Tabela 38 – Teste Tukey para a componente momento de adição (MR). ....	150
Tabela 39 – Variação do lottman (amostras 75% de RAP + óleo residual, em relação a 1 ciclo).....	156
Tabela 40 – Variação do lottman (amostras 50% de RAP + óleo residual, em relação a 1 ciclo).....	158
Tabela 41 – Variação do lottman (amostras 75% de RAP + ADCAP WM, em relação a 1 ciclo).....	162
Tabela 42 – Variação do lottman (amostras 50% de RAP + ADCAP WM, em relação a 1 ciclo).....	164
Tabela 43 – ANOVA Lottman condicionado a F-T amostras 1 ciclo. ....	166

Tabela 44 – ANOVA Lottman condicionado a F-T amostras 3 ciclos.....	166
Tabela 45 – ANOVA Lottman condicionado a F-T amostras 5 ciclos.....	166
Tabela 46 – Teste Tukey para a componente teor de RAP (Lottman NC e STA). ..	167
Tabela 47 – Teste Tukey para a componente agente de reciclagem (Lottman NC e STA).....	167
Tabela 48 – Teste Tukey para a componente momento de adição (Lottman NC e STA). .....	168
Tabela 49 – Teste Tukey para a componente teor de RAP (Lottman LOTA 5).....	168
Tabela 50 – Teste Tukey para a componente agente de reciclagem (Lottman LOTA 5).....	169
Tabela 51 – Teste Tukey para a componente momento de adição (Lottman LOTA 5). .....	169
Tabela 52 – Coeficientes de regressão para as amostras não condicionadas. ....	171
Tabela 53 – Coeficientes de regressão para as amostras condicionadas a curto prazo (STA).....	172
Tabela 54 – Coeficientes de regressão das amostras condicionadas a longo prazo, 3 dias (LOTA 3).....	173
Tabela 55 – Coeficientes de regressão das amostras condicionadas a longo prazo, 5 dias (LOTA 5).....	174
Tabela 56 – SCB de acordo com a norma BS EN 12697-44, NC. ....	187
Tabela 57 – SCB de acordo com a norma BS EN 12697-44, STA. ....	189
Tabela 58 – SCB de acordo com a norma BS EN 12697-44, LOTA 3. ....	190
Tabela 59 – SCB de acordo com a norma BS EN 12697-44, LOTA 5. ....	191
Tabela 60 – ANOVA Ensaio SCB norma BS EN 12697-44 amostras NC.....	192
Tabela 61 – ANOVA Ensaio SCB norma BS EN 12697-44 amostras STA.....	193
Tabela 62 – ANOVA Ensaio SCB norma BS EN 12697-44 amostras LOTA 3.....	193
Tabela 63 – ANOVA Ensaio SCB norma BS EN 12697-44 amostras LOTA 5.....	193

Tabela 64 – Teste Tukey componente teor de RAP (Ensaio SCB, BS EN 12697-44). .....	194
Tabela 65 – Teste Tukey componente agente de reciclagem (Ensaio SCB, BS EN 12697-44).....	194
Tabela 66 – Teste Tukey componente momento de adição (Ensaio SCB, BS EN 12697-44).....	195
Tabela 67 – Teste Tukey componente momento de adição (Ensaio SCB – LOTA 5, BS EN 12697-44).....	195
Tabela 68 – SCB de acordo com a norma AASHTO T 394-21, NC. ....	197
Tabela 69 – SCB de acordo com a norma AASHTO T 394-21, STA. ....	199
Tabela 70 – SCB de acordo com a norma AASHTO T 394-21, LOTA 3. ....	201
Tabela 71 – SCB de acordo com a norma AASHTO T 394-21, LOTA 5. ....	203
Tabela 72 – ANOVA Ensaio SCB norma AASHTO T 394-21 amostras NC.....	204
Tabela 73 – ANOVA Ensaio SCB norma AASHTO T 394-21 amostras STA.....	205
Tabela 74 – ANOVA Ensaio SCB norma AASHTO T 394-21 amostras LOTA 3.....	205
Tabela 75 – ANOVA Ensaio SCB norma AASHTO T 394-21 amostras LOTA 5.....	205
Tabela 76 – Teste Tukey para a componente teor de RAP. ....	206
Tabela 77 – Teste Tukey para a componente agente de reciclagem.....	206
Tabela 78 – Teste Tukey para a componente momento de adição. ....	207
Tabela 79 – Comparação dos ensaios e parâmetros. ....	208
Tabela 80 – Comparação com resultados mínimos exigidos em normas. ....	210
Tabela 81 – Comparação dos efeitos dos condicionamentos.....	212
Tabela 82 – Comparação análise estatística ANOVA.....	213

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Vantagens e desvantagens das técnicas de reciclagem de pavimentos flexíveis.....	33
Quadro 2 – Agentes de reciclagem e efeitos.....	46
Quadro 3 – Influência dos fatores na fadiga.....	75
Quadro 4 – Efeitos do envelhecimento a longo prazo. ....	77
Quadro 5 – Nomenclatura das amostras. ....	104



## **LISTA DE ABREVIATURAS**

AASHTO - American Association of State Highway Transportation Officials

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AR – Agentes de reciclagem

ARRA – Asphalt Recycling & Reclaiming Association

ASTM – American Society for Testing and Materials

BBR – Teste do reômetro de feixe de dobra

CAP – Cimento Asfáltico de Petróleo

CBUQ – Concreto Betuminoso Usinado a Quente

CCPR – Cold central plant recycling

CIR – Cold in-place recycling

CR – Cold recycling

CRI – Cracking Resistance Index

CP – Cold planing

DCT – Disk-shaped compact tension

Df – Parâmetro de dano

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes

DOT – Departamento de Transporte Estadual dos EUA

DRM - Densidade Relativa em Massa

EUA - Estados Unidos da América

F-T – Freeze-Thaw

FDR – Full depth reclamation

FHWA – Federal Highway Administration

Gmm – Densidade Máxima Medida

IEC – Índice de energia de compactação

I-FIT – Illinois Flexibility Index Test

HR – Hot recycling

HIR – Hot in-place recycling

LEP – Laboratório de Engenharia de Pavimentos

LOTA – Conditioning for Long-Term Aging

LVDT – Linear Variable Differential Transformer

MR – Módulo de resiliência

MSCR – Multiple Stress Creep Recovery

NAPA – National asphalt pavement association

Nf – vida de fratura

Ns – vida de serviço

PET – Politereftalato de etileno

PG – Grau de desempenho

RAP – Reclaimed asphalt pavement

RBV – Relação Betume Vazios

RRT - Razão de Resistência à Tensão

RT – Resistência à tração por compressão diametral

RTFO – Rolling Thin Film Oven

SCB – Semicircular bend test

SUPERPAVE – Superior Performing Asphalt Pavement System

STA – Conditioning for Short-Term Aging

UFCG – Universidade Federal de Campina Grande

VAM – Volume de Agregado Mineral

VECD - Viscoelastic Continuum Damage Mechanics

VSA – Valor de serventia atual

Vv – Volume de vazios

## LISTA DE SIMBOLOS

J<sub>nr</sub> – Compliância Não-Recuperável

D – Diâmetro

H – Altura

T – Comprimento

A - Zona válida para resultados de ensaios

B - Teste válido

C - Teste inválido

a - Ranhura (Notch Depth)

cP – Centipoise

J<sub>nr 0,1</sub> – Compliância Não-Recuperável para 0,1 KPa

J<sub>nr 3,2</sub> – Compliância Não-Recuperável para 3,2 KPa

J<sub>nr diff</sub> – Compliância Não-Recuperável diferencial

R<sub>0,1</sub> – Recuperação elástica para 0,1 KPa

R<sub>3,2</sub> – Recuperação elástica para 3,2 KPa

R<sub>diff</sub> – Recuperação elástica diferencial

KPa – KiloPascal

MPa – MegaPascal

mm – milímetros

KN – KiloNewton

$\sigma_{\max,i}$  - resistência ao trincamento

$\epsilon_{\max,i}$  - porcentagem de deformação na tensão máxima

K<sub>lc,i</sub> - tenacidade a fratura

$\Delta W_i$  - deslocamento vertical na carga máxima i (i= 1, 2, 3, 4) em mm

W<sub>i</sub> - altura da amostra i (i= 1, 2, 3, 4) em mm

$D_i$  - diâmetro da amostra  $i$  ( $i = 1,2,3,4$ ), em mm

$t_i$  - espessura da amostra  $i$  ( $i = 1,2,3,4$ ), em mm

$F_{\max,i}$  - carga máxima para a amostra  $i$  ( $i = 1,2,3,4$ ), em N

$a_i$  - profundidade da ranhura da amostra  $i$  ( $i = 1,2,3,4$ ), em mm

$f\left(\frac{a_i}{W_i}\right)$  - Fator geométrico da amostra  $i$  ( $i = 1,2,3,4$ ).

$J_c$  - Energia de fratura ( $\text{kJ/m}^2$ )

$b$  - espessura da amostra (m)

$U$  - energia de deformação até a falha (kJ)

$dU/da$  - variação da energia de deformação com a profundidade do entalhe ( $\text{kJ/m}$ )

$G_f$  - Energia de fratura ( $\text{J/m}^2$ )

$W_f$  - Trabalho da fratura (J)

$A_{\text{lig}}$  - Área de ligamento ( $\text{m}^2$ )

$|m|$  - inclinação da curva no trecho pós-pico

$\delta_{\text{crít}}$  - deslocamento crítico

FI - índice de flexibilidade

$\sigma_i$  - tensão de tração

$\epsilon_i$  - deformação de tração

$k_i, n_i$  - coeficientes experimentais

# SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	25
1.1	Objetivo Geral.....	27
1.1.1	Objetivos Específicos .....	27
1.2	Premissas e Hipóteses .....	28
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	30
2.1	Reciclagem de misturas asfálticas .....	30
2.1.1	Cold Planing (CP) .....	34
2.1.2	Hot recycling (HR) .....	35
2.1.3	Hot in-place recycling (HIR) .....	35
2.1.4	Cold recycling (CR).....	36
2.1.4.1	Cold Central Plant Recycling (CCPR) .....	36
2.1.4.2	Cold In-Place Recycling (CIR) .....	37
2.1.5	Full depth reclamation (FDR).....	37
2.2	Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) .....	38
2.2.1	Limitações do RAP .....	40
2.2.1.1	Granulometria e propriedades do RAP .....	40
2.2.1.2	Interação do ligante envelhecido e virgem .....	41
2.2.1.3	Problemas relacionados a misturas recicladas .....	43
2.3	Rejuvenescimento de misturas asfálticas .....	44
2.3.1	Agentes de reciclagem orgânicos .....	47
2.3.2	Agentes de reciclagem surfactantes .....	49
2.3.3	Agentes rejuvenescedores .....	51
2.4	Métodos de aplicações de agentes de reciclagem.....	55
2.5	Técnicas e restrições de misturas recicladas em usinas.....	57

2.6	Procedimentos não convencionais para misturas asfálticas .....	60
2.6.1	Ensaio em corpos de prova semicirculares .....	60
2.6.1.1	Ensaio de fratura por flexão em amostra semicircular (Semicircular Bend Test, SCB) .....	62
2.6.1.2	Normas do ensaio de fratura por flexão em amostra semicircular e suas semelhanças/diferenças.....	65
2.6.2	Fadiga em misturas asfálticas .....	71
2.6.2.1	Ensaio de fadiga em corpos de provas semicirculares .....	75
2.6.3	Condicionamento de envelhecimento .....	76
2.6.4	Condicionamento de gelo e degelo.....	79
2.6.4.1	Freeze–thaw (F-T) cycles .....	80
2.7	Considerações sobre o tema abordado .....	81
3	MATERIAIS E MÉTODOS .....	84
3.1	Materiais .....	86
3.1.1	Agregados e ligante asfáltico .....	86
3.1.1.1	Caracterização dos ligantes.....	87
3.1.1.2	Caracterização dos agregados .....	88
3.1.2	RAP e Agentes de reciclagem .....	91
3.1.2.1	Caracterização do RAP .....	92
3.1.2.2	Caracterização do ligante recuperado .....	94
3.1.2.3	Caracterização dos agregados recuperados.....	96
3.2	Dosagem das misturas asfálticas .....	98
3.3	Procedimentos experimentais.....	102
3.3.1	Resistencia à tração por compressão diametral .....	106
3.3.2	Módulo de resiliência .....	106
3.3.3	Ensaio em corpos de prova semicircular.....	107
3.3.3.1	Ensaio de fadiga semicircular .....	107

3.3.3.2	Ensaio de fratura por flexão em amostra semicircular .....	107
3.3.4	Condicionamento de misturas asfálticas ao envelhecimento .....	108
3.3.4.1	Conditioning for Short-Term Aging (STA) .....	108
3.3.4.2	Conditioning for Long-Term Aging (LOTA).....	109
3.3.5	Condicionamento de gelo e degelo.....	109
3.3.5.1	Resistência ao dano por umidade induzida .....	109
3.3.5.2	Condicionamento Freeze–thaw (F-T) cycles.....	110
3.3.6	Análise estatística.....	110
3.3.6.1	Análises de variância (ANOVA) .....	110
3.3.6.2	Comparações múltiplas, Teste Tukey .....	111
4	RESULTADOS .....	113
4.1	Ensaio padrões .....	113
4.1.1	Resistência à tração por compressão diametral .....	113
4.1.1.1	Sem agente de reciclagem .....	115
4.1.1.2	Óleo residual de motor .....	117
4.1.1.3	ADCAP WM.....	125
4.1.2	Módulo de resiliência .....	134
4.1.2.1	Sem agente de reciclagem .....	136
4.1.2.2	Óleo residual de motor .....	138
4.1.2.3	ADCAP WM.....	143
4.2	Lottman condicionado pelo método Freeze-thaw (F-T) cycles .....	150
4.2.1.1	Sem agente de reciclagem .....	152
4.2.1.2	Óleo residual de motor .....	153
4.2.1.3	ADCAP WM.....	159
4.3	Ensaio de resistência ao trincamento.....	169
4.3.1	Fadiga em corpos de prova semicirculares.....	170

4.3.1.1	Sem agente de reciclagem .....	175
4.3.1.2	Óleo residual de motor .....	177
4.3.1.3	ADCAP WM.....	182
4.3.2	Fratura por flexão em amostra semicircular .....	186
4.3.2.1	Fratura por flexão em amostra semicircular pela norma BS EN 12697-44.	186
4.3.2.2	Fratura por flexão em amostra semicircular pela norma AASHTO T 394-21 196	
4.4	Resumo dos resultados obtidos.....	207
5	Considerações finais .....	214
5.1.1.1	Avaliação e percepção da influência do teor de RAP.....	215
5.1.1.2	Avaliação e percepção da influência do AR e seu teor .....	216
5.1.1.3	Avaliação e percepção da influência do momento de adição do AR .....	217
5.1.1.4	Avaliação e percepção sobre a análise estatística.....	217
6	CONCLUSÕES .....	219
6.1	Sugestões para pesquisas futuras .....	221
	REFERENCIAS.....	222



# 1 INTRODUÇÃO

A degradação do pavimento gera necessidade constante de manutenção e rejuvenescimento dessas estruturas. O método usual de recuperação das condições de qualidade do revestimento dos pavimentos é por meio da fresagem do revestimento asfáltico desgastado e aplicação de nova camada. Entretanto, tais intervenções originam elevados volumes de resíduos, denominado de fresado, que nem sempre possuem demanda de reciclagem ou descarte fácil.

Hilário (2016) destaca que a realização de fresagem está entre as atividades que produzem a maior quantidade de resíduos poluentes nas obras de manutenção e restauração de rodovias. As principais alternativas para utilização do fresado, na área de pavimentação, são o uso como estabilizante de bases e sub-bases ou como integrante da mistura asfáltica. A utilização em misturas asfálticas é denominada como mistura reciclada, quando o fresado passa a ter essa finalidade ele passa a ser denominado de Reclaimed Asphalt Pavement (RAP).

Apesar da elevada capacidade de reciclagem, o RAP ainda apresenta uma variedade de questões a serem resolvidas. Filho (2019) cita que as principais dificuldades no processo de reciclagem são: falta de dados da construção, heterogeneidade da mistura, granulometria das misturas (o processo de fresagem gera desgaste no agregado original), tipo e envelhecimento do ligante asfáltico utilizado (característica determinante para a interação ligante novo-velho e aditivos), variação da espessura da camada de revestimento (que influencia na qualidade e tipo de fresagem) e modificações na usina.

Essa complexidade limita a utilização de RAP em misturas recicladas a teores baixos, uma vez que a incorporação de destes teores não implicam em mudanças no procedimento de usinagem e seleção de componentes (Guduru et al., 2020). Todavia, mesmo em escala reduzida é possível deduzir que existe uma pequena parcela de interação entre o ligante novo e o envelhecido. Este fato muda ao serem adicionados altos teores de RAP, devendo ser considerada a presença do ligante envelhecido (nível de envelhecimento do ligante presente no RAP, volume de ligante envelhecido, qualidade e tipo de interação com o novo ligante e/ou agente reciclagem, entre outros), do contrário a mistura reciclada apresentará baixa resistência ao trincamento (Abdo,

2016; Koudelka & Varaus, 2017; Yang et al., 2020). As diretrizes de projeto de asfalto reciclado recomendam algumas estratégias para recuperação do ligante oxidado, e.g.: utilização de um novo ligante menos viscoso, adição de agentes rejuvenescedores, redutores de temperatura de mistura, utilização de asfalto espuma, entre outros.

Agentes de Reciclagem (AR) são produtos com características físicas que podem restaurar as propriedades do ligante asfáltico oxidado (GU et al., 2019). A determinação de um teor adequado de agente de reciclagem é imprescindível para a correta interação entre RAP e ligante virgem. Um teor elevado pode causar problemas de: adesividade, afundamento de trilha de roda, escorregamento, desagregação da mistura, entre outros; por outro lado, uma quantidade insuficiente tornará a mistura mais rígida (Devulapalli et al., 2019). Os agentes de reciclagem podem ser classificados em: agentes de reciclagem redutores ou amolecedores e agentes rejuvenescedores.

Os agentes de reciclagem redutores são aditivos redutores de viscosidade e, conseqüentemente, redutores de temperatura de trabalhabilidade. Esses podem ser classificados em orgânicos e surfactantes. Os agentes de reciclagem orgânicos como o próprio nome indica são agentes a base de produtos orgânicos, por exemplo: óleos orgânicos, tall oil, ceras vegetais e orgânicas, entre outras. Os agentes de reciclagem surfactantes são aditivos químicos que atuam como agentes ativos de superfície. De acordo com Ceratti et al. (2015), os agentes surfactantes são substâncias que adsorvem na superfície dos glóbulos do fluido em suspensão, reduzindo a tensão interfacial, a exemplo do EVOTHERM 3G, Rediset, GEMUL® XT-14, entre outros.

Devido à variedade de agentes de reciclagem, não existe um consenso na determinação do teor de AR ou o momento ideal de sua adição no processo de mistura dos asfaltos reciclados. É compreensível a falta de consenso quanto ao teor, já que esses vão ter maior ou menor atividade a depender do grau de envelhecimento do ligante presente no fresado. Entretanto, o momento de adição do AR influencia diretamente na configuração da usina, sendo assim, identificar o momento correto resultará diretamente nos custos e desempenho das composições, tornando-se ponto fundamental misturas recicladas.

Os fornecedores de agentes rejuvenescedores indicam a sua aplicação diretamente sobre o RAP e antes da inclusão dos demais componentes das misturas

recicladas. Os agentes de reciclagem orgânicos têm sua indicação a ser adicionados ao novo ligante que será modificado, enquanto os agentes de reciclagem surfactantes podem ser aplicados em ambos os momentos.

A escolha inadequada do momento de adição do agente de reciclagem pode acarretar em um desgaste excessivo no ligante envelhecido, bem como comprometer o agente rejuvenescedor ou o novo ligante utilizado, produzindo uma mistura mais frágil. Isso demonstra a importância dessa etapa, pois pode resultar na diminuição do uso do agente de reciclagem, redução dos custos, mistura reciclada com melhor desempenho e maior vida útil.

Diante de todas as problemáticas supracitadas surgem algumas lacunas que necessitam serem preenchidas como: Qual o teor máximo de RAP que é possível utilizar? Qual a interação existente entre o ligante envelhecido presente no RAP e o ligante virgem adicionado? Como determinar o melhor agente de reciclagem a ser utilizado? Ou esse produto pode ser aplicado como agente de reciclagem? Desta forma, este trabalho teve como objetivo analisar misturas recicladas com altos teores de RAP e responder algumas dessas questões.

## **1.1 Objetivo Geral**

Essa pesquisa pretende analisar a viabilidade de misturas asfálticas recicladas com adição dois agentes de reciclagem em etapas distintas da produção de mistura asfáltica.

### **1.1.1 Objetivos Específicos**

- analisar o efeito da adição de agentes de reciclagem no comportamento mecânico das misturas asfálticas produzidas com a incorporação de RAP;
- analisar o efeito do envelhecimento a curto e a longo prazo (conditioning for short-term aging, STA, e effects of long term aging, LOTA, respectivamente) nas misturas asfálticas produzidas com os aditivos e RAP;

- avaliar a suscetibilidade à presença de água, sob ações prolongadas, nas misturas asfálticas produzidas com os aditivos e RAP;
- determinar a etapa produtiva na qual deve ser adicionado o agente de reciclagem;
- estabelecer o percentual ideal de RAP em relação a cada agente de reciclagem e em relação a cada etapa de acréscimo de agente de reciclagem;
- avaliar a importância de cada variável por meio de análise estatística ANOVA e teste Tukey.

## 1.2 Premissas e Hipóteses

Para o desenvolvimento desse trabalho, algumas premissas foram adotadas:

- o RAP presente nas misturas recicladas apresentará, em todas as configurações, interação total com os demais constituintes, sendo assim, terá máxima ativação;
- a efetividade da interação entre o AR e os ligantes novos e envelhecidos produzirão alterações nas propriedades mecânicas das misturas recicladas produzidas;
- o método de adição do AR apresenta indicações para cada tipo de AR, sendo assim, a sua escolha será adequada para um determinado AR e inadequado a outro; e
- a identificação correta do melhor AR, teor ideal de AR, método adequado de adição e, conseqüentemente, teor adequado de RAP, resultará em uma mistura reciclada de alto desempenho e economicamente viável.

Considerando essas premissas, as hipóteses a serem testadas por essa tese são:

- a reatividade entre AR e ligante envelhecido depende da proporção entre os seus volumes, assim, o grau de restauração das propriedades físicas e químicas depende do teor de adição do AR;

- o teor de agente de reciclagem excedente pode proteger o ligante quanto ao envelhecimento durante a fase de mistura, bem como, comprometer as reações de interação entre os ligantes novos e envelhecidos;
- os métodos de acréscimo produzirão graus de reações distintas nas misturas recicladas. Com isso, a velocidade ou grau de restauração das propriedades físicas e químicas do ligante envelhecido irá variar e, conseqüentemente, produzir misturas recicladas com propriedades distintas entre si; e
- a correta adequação dos parâmetros (escolha do melhor AR, teor do AR e método adequado de inserção do AR) permitirá o desenvolvimento de uma mistura de reciclagem com o teor máximo de RAP possível, sem comprometer suas características físicas e mecânicas.

Com a avaliação adequada dessas variáveis, tentar-se-á desenvolver uma metodologia para confecção de misturas recicladas com altos teores de RAP. O plano experimental da pesquisa tentará avaliar essas variáveis quanto ao seu desempenho mecânico e identificar a melhor configuração para ser utilizada em misturas recicladas com altos teores de RAP.

## **2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

Neste capítulo são apresentados tópicos relacionados com a reciclagem de pavimentos, de modo a possibilitar uma melhor compreensão do que é esta técnica, quais são as metodologias comumente utilizadas para execução, as principais qualidades, bem como, suas limitações e problemas. Além dos tópicos supracitados serão abordados os ensaios necessários para a caracterização mecânica das misturas recicladas.

### **2.1 Reciclagem de misturas asfálticas**

Os termos reciclagem, impactos ambientais, fontes renováveis, entre outros, vêm se tornando cada vez mais tópicos rotineiros no vocabulário do dia a dia, e sendo explorados no contexto acadêmico. A busca de soluções com o menor impacto ambiental possível se tornou ponto chave da produção acadêmica mundial, em especial nas áreas das engenharias, sendo estas, grandes responsáveis pela interação sociedade/meio ambiente. Portanto, o setor da engenharia civil envolvida com a pavimentação deve corresponder adequadamente ao apelo social em prol do meio ambiente, e uma forma de potencializar este possível benefício é a união da prática com a academia. Ou seja, buscar via academia, inovações e respostas para as atividades de pavimentação que serão desenvolvidas “in situ”.

Nesse contexto, o aperfeiçoamento de novas e antigas técnicas, para reduzir os impactos ambientais causados tanto pela construção e reabilitação quanto pela operação de rodovias, vem sendo foco de estudos (Oliveira, 2014; Rosa Júnior, 2015; Noferini et al., 2017; Song et al., 2018; Kaseer et al., 2019; Luz, 2019; Yousefi et al., 2021). Specht et al. (2013) citam como exemplos: incorporação de resíduos em camadas de pavimentos (como escórias, resíduos de construção e demolição, borracha de pneu, resíduos industriais etc.), possibilitando um descarte seguro e ambientalmente adequado a esses resíduos; reciclagem de pavimentos, de maneira a recuperar as camadas de pavimentos e diminuir o gasto com de insumos virgens; utilização de misturas mornas, reduzindo o consumo de energia e a emissão de gases; etc.

Reciclar um pavimento é o processo de reconstrução parcial de um pavimento, por meio da reutilização e reciclagem da totalidade ou parte dos materiais existentes em uma ou mais camadas deste pavimento. Esse processo ocorre com ou sem a adição de novos componentes e, o material resultante, será utilizado nas camadas de reforço, sub-base, base ou revestimento. Dias et al. (2015) ressaltam que a reutilização do material fresado diminui a quantidade de resíduos descartados, a exploração da matéria-prima, o custo final da restauração, além de, quando se é reaproveitado os resíduos da própria obra, reduz-se o tempo e custos de transporte.

No Brasil, a técnica de reciclagem de pavimentos se tornou usual a partir da década de 90, sendo corriqueiramente utilizado o termo de reutilização, para quando o material reaproveitado ira exercer função diferente do original, e reciclagem, para quando, após reabilitação, o material reaproveitado irá exercer a mesma função (MEDINA e MOTTA, 2015). Cunha (2010) à define como sendo um processo alternativo, com reaproveitamento dos materiais provenientes de pavimentos degradados (que serão incorporados a novos pavimentos), apresentando vantagens ambientais, técnicas e económicas e evitando-se a utilização de zonas de descarte ou aterros.

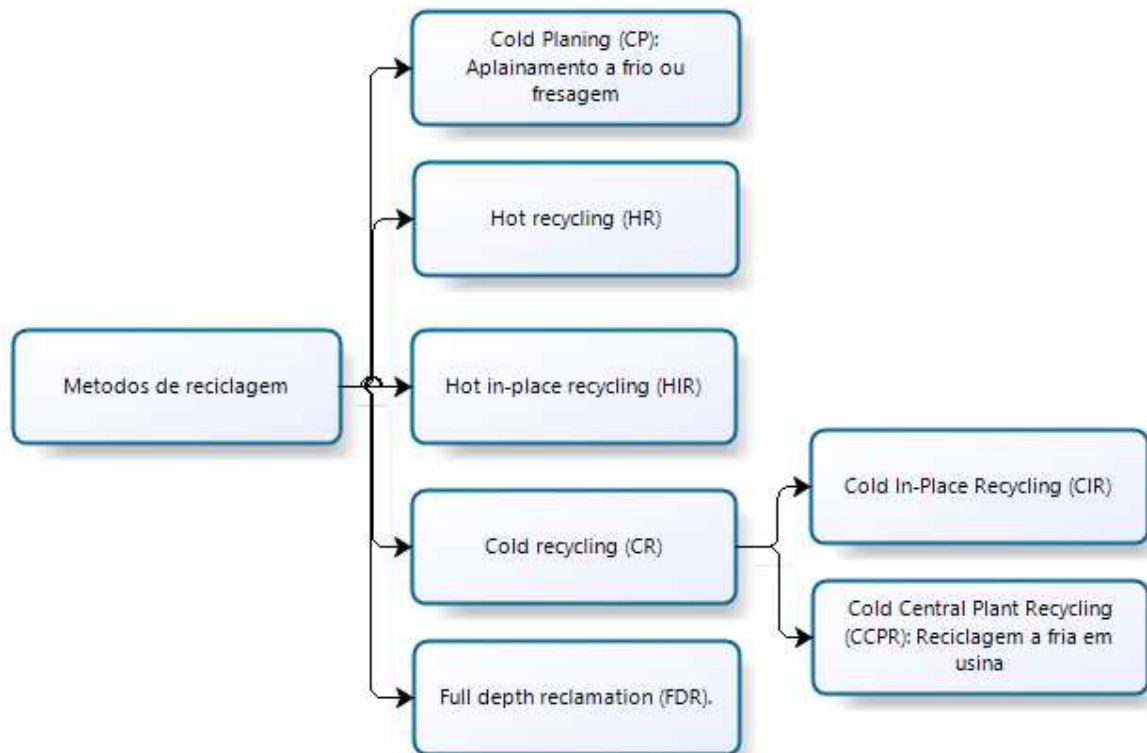
O processo de reciclagem de uma camada de revestimento tem como objetivo reabilitar as características estruturais do pavimento, de forma a restaurar o seu comportamento de projeto. A técnica de reabilitação permite o aproveitamento dos materiais existentes no pavimento antigo e incorporação deste a estrutura do novo pavimento, resultando na redução do consumo dos recursos naturais. A reciclagem pode ser a frio ou a quente, dependendo do desgaste da camada de revestimento a ser restaurada. Existem diversas técnicas de reciclagem e, conseqüentemente, diversas formas de classifica-las.

A FHWA (1997) possui uma das mais antigas e usuais classificações de reciclagem de revestimento asfáltico, dividindo em quatro diferentes métodos de reciclagem, sendo eles:

- Hot recycling (HR): Reciclagem a quente em usina;
- Hot in-place recycling (HIR): Reciclagem a quente no local;
- Cold in-place recycling (CIR): Reciclagem a frio no local;
- Full depth reclamation (FDR): Reciclagem profunda.

Enquanto a Asphalt Recycling & Reclaiming Association - ARRA (2015) divide em cinco diferentes métodos, e apresenta uma subdivisão para a reciclagem a frio (CR), conforme demonstrado na Figura 1.

Figura 1 – Classificação ARRA (2015) para os métodos de reciclagem.



Fonte: adaptado de ARRA (2015).

Outra forma de classificação consiste em agrupar os métodos em função do local de realização da reciclagem, sendo agrupados em dois grupos: In-situ e em usinas. Cunha (2010) resume as vantagens e desvantagens de cada método (Quadro 1).



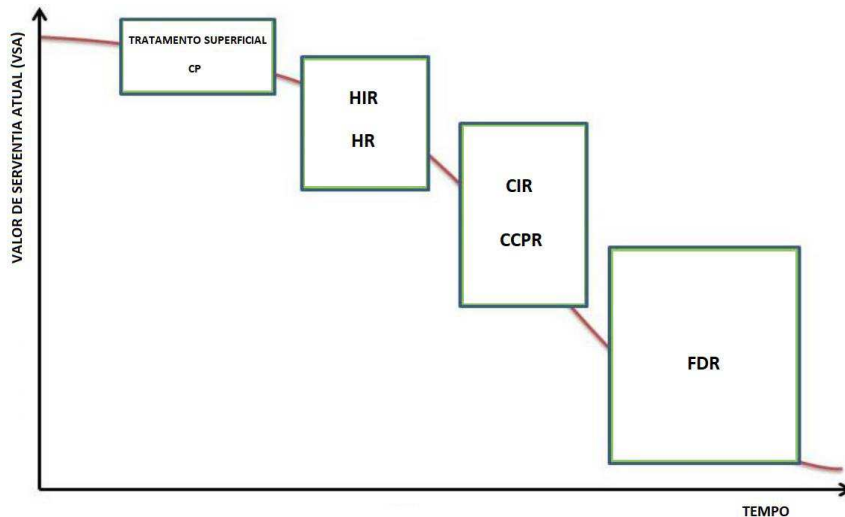
Quadro 1 – Vantagens e desvantagens das técnicas de reciclagem de pavimentos flexíveis

Vantagens e desvantagens dos métodos de reciclagem de pavimentos flexíveis			
Técnica de reciclagem	Vantagens	Desvantagens	
Reciclagem In-situ	A frio	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Possibilidade de incorporação de 100% do material fresado</li> <li>2. Dispensa zonas de descarte</li> <li>3. Menor consumo de energia</li> <li>4. As novas misturas podem ser usadas em camadas de base</li> <li>5. Aumenta a capacidade estrutural do pavimento</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Não apresenta o mesmo desempenho ao longo de toda a obra</li> <li>2. Qualidade do trabalho afetada pelas condições locais</li> <li>3. Dependente das condições climáticas</li> <li>4. Interferência com o tráfego</li> <li>5. Necessita de uma camada de sobreposição</li> </ol>
	A quente	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Possibilidade de incorporação de 100% do material fresado</li> <li>2. Dispensa zonas de descarte</li> <li>3. Melhora as características funcionais do pavimento</li> <li>4. Diminui a permeabilidade do pavimento</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Não pode ser utilizado quando existem problemas estruturais no pavimento</li> <li>2. Elevado consumo de energia</li> <li>3. Emissão de poluentes</li> <li>4. Equipamento muito complexo</li> </ol>
Reciclagem em usina	A frio	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. As novas misturas podem ser usadas em camadas de base</li> <li>2. Aumenta a capacidade estrutural do pavimento</li> <li>3. A qualidade da mistura não é afetada por fatores climáticos</li> <li>4. Maior controle de qualidade das misturas obtidas</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Necessidade de transportar o material fresado à usina</li> <li>2. Impossibilidade de incorporar 100% do material fresado</li> <li>3. Necessita de zonas de descarte</li> <li>4. Necessita de uma camada de sobreposição</li> </ol>
	A quente	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. A qualidade da mistura não é afetada por fatores climáticos</li> <li>2. Maior controle de qualidade das misturas obtidas</li> <li>3. As novas misturas podem ser usadas em camadas de base, regularização e de desgaste</li> <li>4. As misturas obtidas são comparáveis qualitativamente a misturas novas</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Necessidade de transportar o material fresado à usina</li> <li>2. Elevado consumo de energia</li> <li>3. Emissão de poluentes</li> <li>4. Necessita de zonas de descarte</li> <li>5. Custos elevados</li> </ol>
	Semi quente	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Possibilidade de incorporação de 100% do material fresado</li> <li>2. A qualidade da mistura não é afetada por fatores climáticos</li> <li>3. Maior controle de qualidade das misturas obtidas</li> <li>4. Menor consumo de energia</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Necessidade de transportar o material fresado à usina</li> <li>2. Técnica pouco desenvolvida</li> <li>3. Não são conhecidas as reais características de desempenho das misturas</li> </ol>

FONTE: adaptado de CUNHA (2010)

A correta escolha de qual método a ser utilizado irá depender de fatores como: grau de deterioração da camada a ser reciclada, grau de envelhecimento do ligante, profundidade a ser extraída da camada, nível de tráfego, entre outros. A Figura 2 apresenta, de forma ilustrativa, uma sugestão da FHWA (2018) de qual método de reciclagem é mais adequado em cada fase da vida útil da camada de revestimento.

Figura 2 – Estratégias de reciclagem e recuperação para diferentes valores de serventia atual (VSA).



FONTE: Adaptado FHWA (2018).

### 2.1.1 Cold Planing (CP)

O CP é o processo que remove parte da superfície do revestimento asfáltico até determinada profundidade, a depender do desgaste da camada de revestimento, e é comumente conhecido como fresagem. O CP é normalmente utilizado antes da aplicação de novos materiais e removerá defeitos de superfície, como ondulações, trincas, escorrimentos e afundamentos de trilha de rodas, bem como correção de inclinação transversal e operações para ajustar a frisos do meio-fio.

A superfície texturizada torna os pavimentos ásperos, restaurando o atrito e permitindo sua utilização imediata, pode também, ser tratada posteriormente com um dos outros métodos de reciclagem de asfalto ou, sobreposta com uma nova mistura asfáltica. Porém, esse método reduz sensivelmente o conforto do usuário do veículo que trafega pelo pavimento.

### **2.1.2 Hot recycling (HR)**

Reciclagem de asfalto a quente é o processo no qual o RAP é combinado com novos materiais, com adição de um agente de reciclagem quando necessário, produzindo misturas recicladas. Normalmente, neste método há necessidade de remoção total da camada de revestimento, ou grande parte dela. Esse método utiliza usinas fixas ou semifixas para a produção das misturas asfálticas, ou seja, utiliza-se da estrutura convencional de produção.

De acordo com a Sivilevičius (2017) a reciclagem a quente é atualmente o método mais utilizado no mundo. Nos EUA, aproximadamente 33% estão sendo usados na reciclagem a quente, 47% estão sendo usados em outras aplicações de reciclagem ou reutilização de asfalto e menos de 20% estão sendo descartados (ARRA, 2018).

A quantidade de RAP usada na reciclagem à quente tem algumas limitações práticas que estão relacionadas à graduação dos agregados dentro do RAP, propriedades físicas do ligante asfáltico no RAP e regulamentos de emissão de gases. Normalmente, 10 a 30 por cento de RAP é usado em misturas a quente recicladas, mas valores maiores têm sido utilizados com sucesso.

Depois de produzida a mistura reciclada, ela é transportada, aplicada e compactada com equipamentos convencionais de misturas asfálticas. Nenhuma técnica especial é necessária para deposição e compactação, mas a mistura reciclada é frequentemente aplicada em temperaturas ligeiramente mais altas do que as utilizadas convencionalmente em misturas asfálticas. As vantagens da reciclagem de mistura à quente incluem desempenho igual, ou melhor, em comparação ao misturas asfálticas convencionais e capacidade de corrigir a maioria dos defeitos de superfície, deformação e trincas.

### **2.1.3 Hot in-place recycling (HIR)**

O processo consiste no aquecimento do pavimento asfáltico a ser extraído, permitindo sua fresagem até a profundidade especificada. As profundidades típicas variam de 20 a 50 mm, embora alguns equipamentos possam tratar até 75 mm. O RAP resultante é completamente misturado e posteriormente colocado e compactado

com o equipamento de pavimentação para misturas asfálticas convencionais. Todo o processo executado é in-situ, devido a isso o processo de HIR usa uma série de equipamentos, incluindo pré-aquecedores, aquecedores, fresadores, misturadores, pavimentadoras de asfalto e rolos. Conseqüentemente, o equipamento combinado se estende por uma distância considerável e é frequentemente referido como um "trem".

A reciclagem à quente no local apresenta as seguintes vantagens:

- eliminação das trincas superficiais, ondulações, remendos, escorrimientos e afundamentos
- o asfalto envelhecido é rejuvenescido
- a gradação de agregados e o conteúdo de asfalto podem ser modificados
- a interrupção do tráfego é mínima
- os custos de transporte da matéria prima utilizados no pavimento são minimizados

#### **2.1.4 Cold recycling (CR)**

CR consiste na reciclagem do pavimento asfáltico sem a aplicação de calor durante o processo de reciclagem para produzir um pavimento reabilitado. Duas subcategorias dentro de CR são usadas para definir melhor a CR com base no processo usado. Esses processos são a Reciclagem a frio no local (CIR) e a Reciclagem de usinas centrais a frio (CCPR).

##### **2.1.4.1 Cold Central Plant Recycling (CCPR)**

CCPR é o processo no qual a reciclagem do asfalto ocorre em uma localização fixa ou semifixa, utilizando uma usina de mistura a frio estacionária, sendo possível o armazenamento das misturas CCPR. Os materiais asfálticos são fresados, processados e então novamente pavimentados usando práticas tradicionais. A espessura da camada típica varia de 75 a 150 milímetros e emulsões asfálticas ou agentes de reciclagem emulsionados são normalmente usados.

O CCPR geralmente consiste em uma série de silos de alimentação a frio para o RAP e novo agregado, uma balança de esteira, um sistema de aditivo de reciclagem de líquido controlado por computador, uma pugmill, uma tremonha para armazenamento temporário e carregamento de caminhões de transporte. Dado que se espera que os controles de processo para CIR e CCPR sejam muito semelhantes, esses dois são normalmente tratados de forma semelhante em termos de especificações.

#### **2.1.4.2 Cold In-Place Recycling (CIR)**

A reciclagem a frio no local (CIR) envolve a reutilização do material do pavimento existente sem a aplicação de calor, exceto para o agente de reciclagem se for utilizado. Normalmente, a profundidade do tratamento é de 75 a 100 mm e é utilizado uma emulsão asfáltica como aglomerante. Profundidades maiores são possíveis com sistemas de duas camadas que incorporam processos CCPR.

O processo CIR normalmente usa vários tanques de agente de reciclagem, fresadoras, unidades de britagem/peneiramento, misturadores, pavimentadoras e rolos, similar ao HIR.

As vantagens da reciclagem a frio no local incluem tratamento estrutural significativo da maioria dos danos do pavimento, melhoria da qualidade da via, transporte mínimo de materiais, redução de emissão de gases e capacidade de alargamento da via pavimentada.

#### **2.1.5 Full depth reclamation (FDR)**

FDR é a técnica de reabilitação na qual a espessura total do pavimento asfáltico e uma porção predeterminada dos materiais subjacentes (base, sub-base e/ou subleito) é uniformemente retirada e misturada para fornecer um material de base estabilizada. Este é um processo de reciclagem de mistura a frio no qual diferentes tipos de aditivos são adicionados para obter uma base melhorada. A aplicação de um tratamento superficial ou revestimento asfáltico é realizada como uma operação separada no final do período de cura.

As profundidades do tratamento variam, dependendo da espessura da estrutura do pavimento existente, entre 100 e 300 mm. Por se tratar de uma base melhorada, em alguns casos é necessário a utilização de um aditivo estabilizador, mas este só é utilizado quando o material recuperado não tiver, por si só, as propriedades mecânicas e/ou resistência estrutural necessárias para suportar as cargas previstas. As quatro etapas principais neste processo são fresagem, introdução de aditivo, compactação e aplicação de uma superfície ou camada de desgaste.

As vantagens da recuperação de profundidade total são que a maioria dos defeitos do pavimento são tratados, ocorre a conservação de recursos não renováveis, poucas peças de equipamento são necessárias, os custos de transporte são minimizados, as deficiências de subleito podem ser corrigidas por estabilização, e melhorias estruturais significativas podem ser feitas

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

Os pavimentos estão sujeitos à contínua ação do tráfego e das condições climáticas juntamente com o envelhecimento natural dos materiais, fazendo com que o pavimento sofra um processo de deterioração progressiva durante sua vida útil. Veiga (2013) cita que a degradação de um pavimento se inicia logo após a sua construção, devido à contribuição dos agentes atmosféricos, que o afetam mesmo sem haver circulação, demonstrando que o pavimento sofrerá degradação antes de qualquer aplicação de carga a estrutura. Com o decorrer de sua vida útil, essas degradações vão se alastrando e produzindo novas patologias, de maiores extensões e danos. A degradação excessiva restringe a utilização do pavimento e, conseqüentemente, ao final de seu tempo de serviço, a camada revestimento deverá ser removida por meio do processo de fresagem.

O material removido é conhecido como Reclaimed Asphalt Pavement (RAP), sendo geralmente despejado em aterros sanitários e apresentando potencial de contaminação ambiental. De acordo com a FHWA (2016), quando devidamente triturado e peneirado, o RAP consiste em agregados de alta qualidade e bem graduados, revestidos por ligante asfáltico. Segundo Unger Filho (2019) o RAP deve

ser considerado como um novo material de pavimentação e ser reutilizado, podendo ser melhorado por meio de correção granulométrica, adição de novos materiais e/ou adição de agentes estabilizadores. Yang et al. (2018) cita que as três principais vantagens na reutilização do RAP são: redução da demanda de asfalto e agregado virgem, redução de aplicações em aterro e redução dos custos envolvidos.

Segundo a NAPA (2018) 100% dos materiais de pavimento asfáltico fresados em rodovias dos EUA são reutilizados, sendo uma média anual de cerca de 100 milhões de toneladas em 2018. Estes podem ser misturado em um novo pavimento, usado como uma base ou sub-base granular, agregado de base estabilizada ou como material de aterro.

O Departamento de Transporte Estadual dos EUA (DOT) sugere a utilização do teor de 30% de RAP nas camadas intermediárias e na camada superficial do pavimento sem comprometer o desempenho mecânico. Hansen e Copeland (2013) citam que a porcentagem de RAP que irá ser adicionado dependerá da legislação específica de cada estado, variando de 20 a 30%, podendo em casos especiais atingir até 50%.

O Japão, de acordo com a NAPA (2018), reutiliza cerca de 99% do RAP produzido, seja em adição a novas misturas asfálticas ou como estabilizantes em base e/ou sub-base. No caso do Japão, os teores de RAP adotados podem chegar até 47% da massa total da mistura asfáltica e a seleção de tal teor depende dos padrões das usinas fabricantes. Também de acordo com a NAPA (2018) mais de 75% de toda a mistura asfáltica produzida no Japão contem a presença de RAP em sua composição.

Entretanto, os teores de RAP em misturas recicladas ainda são reduzidos, pois o teor de RAP depende do processo de mistura, agente de reciclagem, design de mistura, processo de fabricação (tipo de usina, temperatura de produção, tempo de mistura e temperatura de aplicação), desempenho esperado, bem como fonte e propriedades do RAP (Sabahfar e Hossain, 2016). A qualidade do RAP depende do tipo de equipamento de fresagem, da velocidade de fresagem e profundidade de recuperação (Kerkhof, 2012). Em países em desenvolvimento, a prática de mistura asfáltica incorporada com RAP não recebe muita atenção devido à falta de conhecimento sobre os processos de fabricação, nível de interação entre o ligante envelhecido e o ligante virgem e o desempenho da mistura reciclada em campo.

Entretanto, os desenvolvimentos recentes nas tecnologias RAP podem aumentar o uso de misturas RAP e torná-las mais populares na indústria de pavimentação (Devulpalli et al., 2019).

### **2.2.1 Limitações do RAP**

A literatura (Tran et al., 2012; Xu et al., 2014; Zaumanis et al., 2014; Sabahfar & Hossain, 2016; entre outros) mostra que as principais limitações do RAP são: granulometria e propriedade do RAP; interação entre o ligante envelhecido e o ligante virgem; e as propriedades mecânicas das misturas recicladas.

#### **2.2.1.1 Granulometria e propriedades do RAP**

A remoção do pavimento antigo requer fresagem, escarificação e às vezes trituração, o que produz uma quantidade excessiva de agregados finos, dificultando o controle das propriedades volumétricas da mistura final, especialmente quando grandes quantidades de RAP são adicionadas à mistura. As características originais dos agregados usados nas misturas asfálticas mudam durante as operações de fresagem e processamento envolvidas na obtenção do RAP (Sabahfar e Hossain, 2016).

Segundo Silva (2011) a mudança granulométrica, devido a fresagem, ocorre em razão da quebra de parte dos agregados na altura da linha de corte da máquina fresadora. Em decorrência disso, ao analisar os componentes após a extração do ligante presente no fresado, observa-se que o agregado resultante apresenta uma quantidade excessiva de agregados finos. Essa característica dificulta o controle das propriedades volumétricas da mistura final, principalmente quando teores de RAP acima de 25% são adicionadas à mistura.

O RAP é composto por grumos, apresentando assim uma curva granulométrica mais aberta. Devido a elevada quantidade de materiais finos é necessário a correção da curva granulométrica com o acréscimo de agregados “novos”. Além disso, o RAP segregará quando for armazenado. A fração mais fina do RAP contém maior teor de ligante asfáltico (do que a fração mais grossa) devido a uma área de superfície



aumentada, o que dificulta o controle do volume de vazios na mistura asfáltica (Sabahfar & Hossain, 2016).

Além disso, existe uma diferença considerável entre as propriedades do RAP e as propriedades do novo agregado, como gravidade específica, angularidade e valor de abrasão. Assim, as propriedades do agregado RAP podem influenciar as propriedades volumétricas e o desempenho de novas misturas, especialmente quando uma grande quantidade de RAP é usada (Subhash et al., 2011).

Essa complexidade limita a utilização de RAP em misturas recicladas a teores baixos, pois, em menores teores ele é considerado como agregado (Black rock), não ocorrendo mudança no procedimento de usinagem e nem de seleção do novo ligante, ou seja, as usinas podem adotar o ligante convencional (Guduru et al., 2020). Todavia, mesmo em escala reduzida é possível deduzir que existe uma pequena parcela de interação entre o ligante novo e o envelhecido.

Pesquisas anteriores (Zaumanis et al., 2014; Sabahfar e Hossain, 2016; entre outras) mostraram que o efeito do ligante envelhecido se torna mais pronunciado à medida que a porcentagem de RAP aumenta na mistura. Embora a adição de até 30% de RAP à mistura asfáltica tenha um efeito insignificante nas características da mistura, 40% de RAP influencia significativamente as propriedades mecânicas (Abdo, 2016). Porcentagens mais altas de RAP dificultam a conformidade com as especificações Superpave ao ponto que o uso de RAP em misturas asfálticas deve ser restrito a 40–50%, pois, o alto teor de finos de RAP impede o cumprimento dos requisitos volumétricos do Superpave.

O elevado custo de produção das misturas recicladas, devido às modificações da usina e ao alto consumo de energia, resulta no desinteresse da utilização dessas técnicas em países como o Brasil, que possuem elevada quantidade de matéria prima. Este fato poderá ser mudado se altos teores de adição de RAP demonstrarem rendimento e eficácia comprovados.

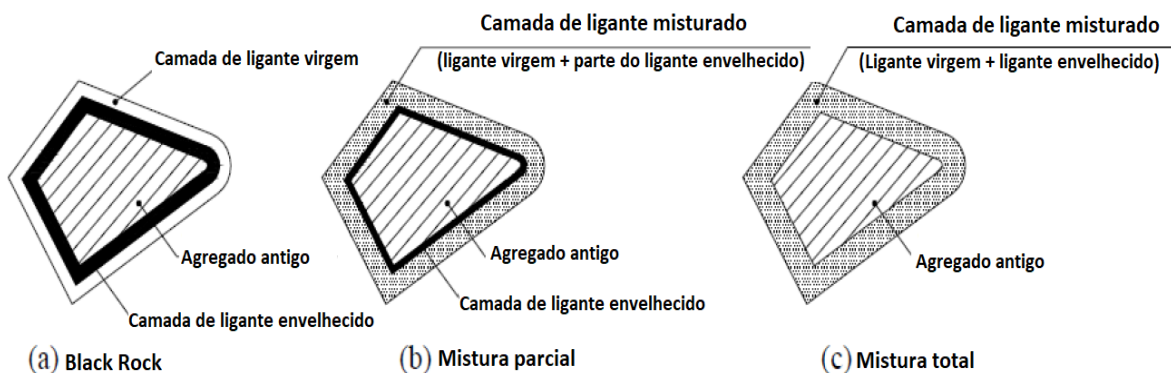
### **2.2.1.2 Interação do ligante envelhecido e virgem**

A confiabilidade da produção de uma mistura uniforme uma vez que o processo de mistura esteja completo não é clara. Existindo 3 cenários possíveis:

- mistura total: assume que o ligante envelhecido se mistura completamente com o ligante virgem.
- black rock: assume que o ligante envelhecido não se mistura com o ligante virgem e que o RAP permanece como um agregado na mistura.
- mistura parcial: assume que o ligante envelhecido se mistura com o ligante virgem, mas não completamente.

O procedimento atual para produção de misturas recicladas assume que o ligante envelhecido se mistura totalmente com o ligante virgem. A suposição imprecisa da mistura pode complicar o processo de projeto da mistura e as expectativas de desempenho do pavimento. Se o ligante envelhecido não se mistura adequadamente com o agente de reciclagem (ou misturar em um grau menor do que o especulado), o conteúdo real de asfalto da mistura reciclada é menor do que o conteúdo ideal especificado pelo projeto. Entretanto, se a proporção de agente de reciclagem em relação ao ligante envelhecido for maior do que o desejado, e previsto, a mistura resultante apresentará baixa consistência (Zaumanis et al., 2013). Na realidade, a mistura real que ocorre entre os ligantes é desconhecida e a contribuição efetiva do ligante envelhecido não é identificada (Zaumanis et al., 2014). A Figura 3 mostra os três cenários para a mistura de ligantes virgem e envelhecido.

Figura 3 – Cenários de mistura entre ligante envelhecido e ligante virgem.



FONTE: Xu et al. (2014).

Espera-se que o ligante envelhecido influencie positivamente o desempenho de deformação da mistura reciclada, ao mesmo tempo que o torna mais vulnerável à fadiga e rachaduras térmicas. Se o ligante envelhecido não puder se misturar

totalmente com o ligante virgem, ele forma uma camada de revestimento ao redor do agregado. O envelhecimento de longo prazo faz com que a camada de revestimento seja muito mais rígida do que o ligante virgem, resultando na formação de um sistema de camadas compostas que contém RAP na mistura asfáltica (Xu et al., 2014).

A interação entre ligantes envelhecidos e virgens aumentam com o decorrer do tempo até que um estado de mistura estável seja alcançado. Em consequência da constante alteração de estado de mistura, o desempenho da mistura reciclada irá variar. Pesquisas mostraram que a mistura de ligante virgem e envelhecido, ou sua difusão, pode continuar por 3-6 meses após a conclusão da atividade de pavimentação (Tran et al., 2012; Xu et al., 2014). Consequentemente, os indicadores de desempenho do pavimento que são aceitáveis no momento da mistura e compactação podem não ser aceitáveis vários meses depois, e podem ocorrer desgastes prematuros no pavimento.

### **2.2.1.3 Problemas relacionados a misturas recicladas**

#### **2.2.1.3.1 Trincas**

Os resultados dos testes de resistência à tração e de fadiga da viga tendem a indicar maior rigidez em misturas com alto teor de RAP, possibilitando o surgimento de trincas se nenhum ajuste for feito no projeto da mistura. Bennert e Dongré (2010) relataram que um aumento linear na rigidez com base nos incrementos da quantidade de RAP pode ser impreciso quando a mistura contém altas proporções de RAP. Nesses casos, a rigidez da mistura e a magnitude das trincas dependem do grau de mistura entre o ligante virgem e o ligante envelhecido (Zaumanis et al., 2014).

Mogawer et al. (2012) investigaram a rigidez e o trincamento em baixa temperatura de misturas asfálticas produzidas com 40% de RAP. Os resultados mostraram que a rigidez das misturas contendo RAP aumentou em até 49% comparado com a mistura convencional. Entretanto, o trincamento em baixa temperatura para misturas convencionais e com RAP não diferiu significativamente. West et al. (2013) avaliaram o uso de misturas RAP de 25% e 55%, os autores observaram que a rigidez medida pelo módulo dinâmico, em várias temperaturas e

frequências, aumentou em 25-60% em comparação com misturas convencionais. A pesquisa também concluiu que a energia de fratura, que é um indicador da suscetibilidade à trinca por fadiga da mistura asfáltica foi 20-50% melhor para misturas convencionais em comparação com misturas com alto teor de RAP.

#### **2.2.1.3.2 Suscetibilidade à umidade**

As misturas com RAP devem ser menos suscetíveis à umidade porque o agregado RAP é coberto com uma camada extra de ligante. Entretanto, a cobertura do ligante é apenas um fator que influencia o comportamento do ligante na presença de umidade. Por exemplo, se o pavimento original demonstrou adesão fraca entre o agregado e o ligante, o problema provavelmente ocorrerá novamente se os aditivos de adesão não forem adicionados à mistura reciclada. Os resultados das avaliações de suscetibilidade à umidade de misturas contendo RAP são contraditórios. Mogawer et al. (2012) mostraram que a suscetibilidade à umidade de misturas contendo 40% de RAP foi igual ou melhor do que a suscetibilidade à umidade de misturas convencionais. Os autores também observaram que a resistência ao dano por umidade era acrescida conforme o teor de RAP aumentava. Entretanto, os resultados obtidos por Elwardany e Daniel (2011) mostraram que o potencial de danos por umidade de misturas recicladas geralmente é inferior que de uma convencional.

### **2.3 Rejuvenescimento de misturas asfálticas**

A adição de RAP à uma mistura asfáltica afeta o desempenho da mistura em termos de afundamento de trilha de roda e trincas por fadiga, pois o ligante envelhecido e os agregados no RAP têm propriedades que diferem das propriedades originais. Ao se realizar uma reciclagem de uma camada de revestimento é necessário analisar duas características principais do material fresado: a granulometria e o envelhecimento do ligante.

Com relação a granulometria, as características apresentadas pelo RAP já foi discutida no tópico 3.3.1.1. No que se refere ao envelhecimento do ligante, devido ao efeito da temperatura, oxigênio, chuva e tempo, o ligante asfáltico tem sua

consistência aumentada, promovendo o envelhecimento (YANG et al., 2020). O ligante envelhecido é o principal obstáculo que impede o aumento do teor de RAP das misturas asfálticas, porque as misturas com alto teor de RAP são consideradas suscetíveis à fadiga e rachaduras térmicas. Assim, para recuperar as propriedades originais do ligante asfáltico, é necessário a incorporação de aditivos restauradores de maltenos ou redutores de consistência, denominados agentes de reciclagem (AR). Os ARs são produtos com características físicas que podem restaurar as propriedades do ligante asfáltico oxidado (GU et al., 2019).

As primeiras experiências realizadas para recuperação das propriedades do ligante envelhecido foram realizados com utilização de aditivos redutores de viscosidade, são exemplos: Óleos de processo industrial, ligantes asfálticos de baixa viscosidade, Tall oil refinado, óleos vegetais, graxa vegetal, óleo lubrificante e pasta de óleo. Dentre estes, os óleos de processo industrial (óleos lubrificantes e extensores) foram os primeiros em aplicação prática, devido à sua alta proporção de constituintes dos maltenos, que restaura as propriedades reológicas do ligante envelhecido presente no RAP. No Quadro 2 estão apresentados diferentes agentes de reciclagem usados nas misturas RAP, com teores e efeitos na mistura reciclada.

Quadro 2 – Agentes de reciclagem e efeitos.

Tipo	Nome	Teor****	Efeito	
Base de petróleo	Extrato aromático	12%	Baixa resistência à fadiga em comparação a referência	*
		18%	Fluência em baixa temperatura, alta resistência à tração e bom desempenho de energia de fratura	**
	Óleo a base de parafina	18%	Melhor desempenho sob fluência em baixa temperatura e resistência ao trincamento	**
	Óleo de motor residual	12%	Menor resistência à fadiga e trincamento em baixa temperatura.	*
		18%	Falha na penetração	**
	Óleo de pongamia	5%	Bom desempenho à fadiga e resistência razoável a deformação	***
Óleo aromático	5%	Alta resistência à fadiga	***	
Base orgânica	Óleo residual vegetal	12%	Desempenho melhor do que a de referência e resultados negativos para trincas em baixa temperatura.	*
	Graxa de resíduo vegetal	12%	Desempenho melhor do que a de referência e resultados negativos para trincas em baixa temperatura	*
	Tall oil destilado	12%	Resistência a trincas a baixas temperaturas e tendência a falhas por fadiga.	*
	Sebo refinado	9%	Fluência em baixa temperatura, alta resistência à tração e bom desempenho de energia de fratura	**
	Tall oil destilado	9%	Bom desempenho de fluência em baixa temperatura, resistência à tração e energia de fratura	**
Produto orgânico	Mistura orgânica	9%	Fluência em baixa temperatura, resistência à tração e bom desempenho de energia de fratura	**
	Óleo orgânico	12%	Trincas em baixa temperatura	*
	Óleo de mamona	5%	Comportamento desejável de deformação e fadiga	***

\* Zaumanis et al. (2015); \*\* Zaumanis et al. (2013); \*\*\*Patrik e Umesh (2015); \*\*\*\* Em peso do ligante envelhecido

Entretanto, inicialmente os agentes de reciclagem apresentavam apenas a característica de reduzir a viscosidade do ligante envelhecido presente no RAP sem recuperar as propriedades químicas do ligante envelhecido. Posteriormente, com o aprimoramento das técnicas de produção de misturas recicladas, foram desenvolvidos aditivos restauradores de maltenos, os agentes rejuvenescedores.

Em decorrência do aumento e composições dos ARs, se tornou necessário uma classificação para facilitar sua identificação. Assim, os agentes de reciclagem podem se dividir em agentes de reciclagem redutores e agentes rejuvenescedores. Por consequência de suas características e composições, os ARs redutores, por sua vez, podem ser divididos em agentes reciclagem orgânicos e agentes de reciclagem surfactantes.

### **2.3.1 Agentes de reciclagem orgânicos**

Os agentes de reciclagem orgânicos como o próprio nome indica são agentes a base de produtos orgânicos, que apresentam vantagens e desvantagens em sua utilização. Pois, se por um lado, eles reduzem a viscosidade do ligante a altas temperaturas e, assim, reduzem as temperaturas de usinagem e compactação, diminuindo o desgaste do RAP e do novo ligante, aumentando a resistência a deformações permanentes em temperaturas intermediárias. Por outro lado, podem diminuir a resistência a fadiga a baixa temperatura e diminuir a resistência a deformações permanente em temperaturas maiores. Alguns agentes existentes nesta classe são: Sasobit, CCBIT 113AD, óleos orgânicos em geral, tall oil, graxa vegetal, entre outros.

Asli et al. (2012) usaram óleo de cozinha residual como um agente de reciclagem, demonstrando o rejuvenescimento do ligante envelhecido e propriedades físicas finais semelhantes às do ligante original. Zaumanis et al. (2014) estudaram o desempenho de seis agentes de reciclagem com 100% RAP: óleo vegetal residual, graxa vegetal residual, óleo orgânico, tall oil destilado, extrato aromático e óleo de motor residual. A dosagem de cada agente de reciclagem foi de 12% em massa do teor de ligante envelhecido. Cinco dos seis agentes de reciclagem reduziram com

sucesso o grau de desempenho (PG) do ligante envelhecido para o nível desejado, reduções de até 22°C~-22°C (óleo de motor residual falhou), e todos os agentes de reciclagem mostraram resistência satisfatória ao afundamento de trilha de roda, com resultados que correspondiam a 10-60% da amostra de referência, e vida de fadiga em comparação com as misturas de referência com resultados 75-200% maiores. A maioria dos agentes de reciclagem também reduziu a temperatura crítica de trinca em comparação com as misturas de referência.

Ali et al. (2016) avaliaram a capacidade de cinco agentes de reciclagem em restaurar os graus de desempenho de ligantes envelhecidos em baixa e alta temperatura. Os agentes de reciclagem considerados incluíram: óleo naftênico, óleo parafínico, extrato aromático, tall oil e ácido oleico. As misturas foram preparadas contendo diferentes porcentagens de RAP (25% e 45%). As misturas soltas foram envelhecidas por duas horas e seis horas para avaliar o impacto do envelhecimento na eficácia dos diferentes de reciclagem. Após envelhecimento e compactação, o ligante asfáltico contido em cada uma dessas misturas foi extraído e recuperado. Os resultados mostraram que todos os ligantes rejuvenescidos tiveram grau de desempenho inferior do que o ligante de controle. Além disso, a eficácia da reciclagem não foi afetada pelo envelhecimento (de 2 a 6 h) e pelo aumento da quantidade de materiais RAP (até 45%). Os agentes de reciclagem também melhoraram, em até 10%, a resistência à fadiga sem influenciar substancialmente o desempenho quanto a deformação permanente.

Nabizadeh et al. (2017) analisaram os efeitos de três agentes de reciclagem (extrato aromático, tall oil e óleo de soja) sobre as características mecânicas das misturas asfálticas contendo uma alta porcentagem de RAP (65% da massa total da mistura). Os resultados do teste mostraram que os agentes de reciclagem aumentaram a ductilidade das misturas de alto teor de RAP, conseqüentemente, ocorrendo uma melhoria na resistência ao trincamento. Esse benefício foi observado pelos autores, por meio da análise do parâmetro de dano (Df) do ensaio Semicircular Bend Test (SCB), onde o Df obtido para as amostras rejuvenescidas apresentou valores próximos ao dobro dos resultados da amostra de referência.

Elkashef et al. (2018) analisaram um derivado de óleo de soja para rejuvenescer o ligante envelhecido extraído de uma amostra de RAP. O agente de



reciclagem foi inicialmente adicionado a um ligante virgem, usando uma dosagem de 12% da massa total do ligante. O ligante modificado foi misturado com o ligante extraído de uma amostra de RAP, em uma proporção de 1: 5. Como resultados da adição, as temperaturas críticas do ligante rejuvenescido foram significativamente reduzidas, conforme revelado por ensaios de reologia e o teste do reômetro de feixe de dobra (BBR). A adição do agente de reciclagem derivado da soja mudou o grau de desempenho do ligante envelhecido de PG106-10 para PG70-22. Um estudo das curvas principais de BBR mostra uma melhora de 15% na compliância de fluência do ligante RAP rejuvenescido, indicando a capacidade do ligante de dissipar o carregamento de fadiga térmica.

Leng et al. (2018) investigou a viabilidade de utilização dos aditivos, derivados de resíduos de PET por meio de um processo de aminólise, para melhorar o desempenho de misturas betuminosas contendo RAP, por meio de ensaios reológicos. Nestes foram preparadas amostras compostas de ligante virgem, ligante envelhecido (nas porcentagens de 15%, 25% e 40%) e aditivos derivados de PET (nos teores de 1%, 1,5% e 2%). Os resultados indicaram que as amostras contendo aditivos de RAP e PET proporcionaram melhor desempenho geral em relação ao ligante convencional, aumentando a resistência a deformação permanente em pelo menos 15% e a resistência à trinca por fadiga em até 60%.

### **2.3.2 Agentes de reciclagem surfactantes**

Os agentes de reciclagem surfactantes são aditivos químicos que atuam como agentes ativos de superfície, conseguindo reagir simultaneamente com o ligante e com o agregado. Dessa forma, a redução da viscosidade é obtida pela melhor interação e envolvimento entre o ligante e o agregado. Esse tipo de aditivo é também considerado um melhorador de adesividade, além de permitir uma trabalhabilidade da mistura na fase de espalhamento e compactação. Alguns agentes existentes nessa classe são: ADCAP WM, EVOTHERM 3G, Rediset, Sylvaroad, Cecabase RT, GEMUL® XT-14, entre outros.

Lu e Saleh (2016) analisaram o desempenho de misturas mornas adicionadas com RAP com diferentes proporções, de 0 a 70% em massa da mistura. Eles

utilizaram um ligante com grau de penetração 80/100 e dois tipos de aditivos (Evotherm 3G e Sylvaroad) e os analisaram por meio de ensaios de viscosidade para os ligantes e resistência à umidade, resistência à fissura por fadiga e deformação permanente, para o desempenho mecânico de misturas. Os resultados mostraram que os dois aditivos reduziram a viscosidade do ligante em até 10% e melhoraram a resistência à umidade em até 7%. As misturas mornas com os agentes de reciclagem também apresentaram maior número de ciclos até a falha por fadiga (o dobro do obtido pela amostra de referência). Todas as misturas mornas com adição dos agentes de reciclagem mostraram resistência a deformação permanente consideravelmente melhor do que as sem adição. Com relação a deformação permanente, os autores realizaram o ensaio Wheel-tracking test e obtiveram resultados de 2922 ciclos para a amostra de referência, enquanto que para amostras com 50% de RAP valores 18576 ciclos e para amostras com 70% de RAP 62543 ciclos.

Omranian et al. (2018) avaliaram os efeitos do Evotherm®, RH-WMA e RAP no comportamento das misturas em termos de índice de energia de compactação (IEC), resistência à tração indireta e módulo de resiliência. Os resultados mostraram que os aditivos de mistura quente reduziram o IEC (redução de aproximadamente 15%, o que resulta em uma redução de temperatura de compactação de 25°C), o RT (aproximadamente 50% menor que a mistura de referência) e o módulo de resiliência (redução de 16% em relação a mistura de referência). As misturas adicionadas com RAP aumentaram os valores correspondentes ao RT e MR (30% e 11%, respectivamente). A análise estatística mostrou que as misturas que incorporam Evotherm® e RAP tiveram efeitos significativos no IEC, enquanto os efeitos do RH-WMA no valor correspondente foram considerados estatisticamente insignificantes. O Modelo Linear Geral mostrou que Evotherm®, RAP e RH-WMA não exibiram efeitos significativos no RT e no módulo de resiliência. A análise de variância unilateral mostrou que o Evotherm® influenciou significativamente o comportamento da mistura ( $p < 0,005$ ), enquanto os efeitos RAP e RH-WMA foram considerados estatisticamente insignificantes.

Lu et al. (2019) investigaram o uso de um agente de reciclagem (Evotherm 3G) na produção de misturas mornas com Sylvaroad contendo RAP. Os testes realizados foram: módulo de resiliência, resistência à tração indireta, teste de fratura por flexão

em amostra semicircular e teste de fadiga por flexão de quatro pontos. As misturas mornas adicionadas com RAP e agente de reciclagem tiveram melhor desempenho na resistência à fissuração por fadiga (melhorando em até 25% em relação a mistura de referência). Para resultados gerais, adicionar o agente de reciclagem ao RAP foi considerado mais eficaz do que adicionar o agente de reciclagem ao ligante asfáltico antes de misturar.

### **2.3.3 Agentes rejuvenescedores**

Os agentes rejuvenescedores podem fornecer maltenos sem conteúdo aromático, a fim de eliminar as preocupações ambientais associadas ao uso de produtos à base de óleo. A inexistência do anel aromático nos agentes rejuvenescedores diminui a emissão de gases poluentes durante o processo de produção das misturas recicladas. Entretanto, a introdução dos agentes rejuvenescedores sugere que devesse considerar a sua compatibilidade com o ligante envelhecido. Esta compatibilidade deve ser suficientemente alta para garantir a difusão do agente rejuvenescedor e a restauração do ligante asfáltico (O'Sullivan, 2011).

Os agentes rejuvenescedores são produtos de hidrocarboneto com características físicas selecionadas que podem restaurar as características necessárias (parâmetro maltenos) do ligante asfáltico oxidado (GU et al., 2019). Além dos requisitos para a composição química de agentes rejuvenescedores (restaurando os componentes necessários do ligante envelhecido), ele também deve ter um alto ponto de fulgor, ser facilmente disperso, demonstrar baixa perda de voláteis durante a mistura a quente, resistir ao endurecimento e ser uniforme (O'Sullivan, 2011).

Os agentes rejuvenescedores devem fornecer propriedades de curto e longo prazo necessárias para um pavimento (ZAUMANIS et al., 2014). A curto prazo, o agente rejuvenescedor deve se difundir rapidamente no ligante RAP, mobilizar o ligante envelhecido e endurecido e produzir um revestimento uniforme. Um agente de rejuvenescimento deve amolecer o ligante RAP para produzir uma mistura trabalhável que pode ser facilmente aplicada e compactada até a densidade necessária sem produzir emissões. A maior parte do processo de difusão deve ser concluída antes de

permitir o tráfego, a fim de evitar a redução do atrito e a suscetibilidade ao afundamento. A longo prazo, os agentes rejuvenescedores devem rejuvenescer as propriedades químicas e físicas do ligante envelhecido e manter a estabilidade por um período de serviço adicional. Ajustes na reologia do ligante asfáltico devem reduzir a suscetibilidade do ligante à fadiga e rachaduras em baixa temperatura. O ligante também não deve ficar excessivamente macio, tornando a estrutura do pavimento suscetível a sulcos.

Durante a produção de HR e HIR, o RAP é tipicamente misturado com o agente rejuvenescedor (ocasionalmente com agregados e ligante “novos”) por um curto tempo de mistura (geralmente menos de 1 minuto). Espera-se que ao ligante envelhecido atingir a viscosidade necessária, se misture com o agente rejuvenescedor e se mobilize. Para que todo o processo HR e HIR seja concluído no curto tempo de mistura, uma quantidade suficiente de agente rejuvenescedor deve ser aplicada no RAP, a fim de restaurar suas propriedades ao nível necessário.

Sabahfar e Hossain (2016) categorizaram o mecanismo ou processo de difusão de um agente rejuvenescedor em quatro etapas. Na primeira etapa, o agente rejuvenescedor forma uma camada de baixa viscosidade ao redor do agregado RAP revestido com ligante altamente envelhecido. Na segunda etapa, o agente rejuvenescedor começa a penetrar na camada de ligante envelhecida, resultando em uma diminuição da quantidade de agente rejuvenescedor bruto revestindo as partículas e amolecendo o ligante envelhecido. O ligante envelhecido consome o agente rejuvenescedor na terceira etapa e a penetração continua quando a viscosidade da camada interna diminui e a viscosidade da camada externa aumenta gradualmente. Na quarta etapa, o equilíbrio é alcançado para a maioria da película do ligante reciclado uma vez que o tempo suficiente tenha passado (IM et al., 2014).

O uso bem-sucedido de um agente rejuvenescedor deve reverter o processo de envelhecimento do ligante RAP, restaurar as propriedades do ligante de asfalto por outro período de serviço e tornar o ligante presente no RAP efetivamente disponível para a mistura (Zaumanis et al., 2013). Ou seja, o ligante envelhecido no RAP deve ser rejuvenescido para que obtenha características químicas e reológicas semelhantes ao ligante virgem para participar do processo de produção de misturas asfálticas. Os agentes rejuvenescedores restauram a proporção original de asfaltenos

para maltenos, aumentando o poder de peptização da fase de malteno (Dony et al., 2013).

Embora o uso de agentes rejuvenescedores tenha benefícios econômicos e ambientais (ao permitir maiores quantidades de RAP em misturas asfálticas recicladas), algumas instituições relutam em permitir o uso de agentes rejuvenescedores. Isso ocorre devido ao dano potencial quanto ao afundamento de trilha de roda que os agentes rejuvenescedores podem causar, amolecendo excessivamente o ligante. Se a mistura entre o agente rejuvenescedor e o ligante envelhecido estiver incompleta, uma micro camada com baixa rigidez pode se formar na superfície RAP, levando a danos prematuros. Embora terminologia idêntica seja frequentemente usada, amolecer o ligante envelhecido e rejuvenescer o ligante envelhecido são processos distintos. Os agentes redutores diminuem a viscosidade do ligante envelhecido, enquanto os agentes rejuvenescedores restauram as propriedades físicas e químicas do ligante envelhecido (Karlsson & Isacsson, 2006).

A suposição imprecisa da mistura pode complicar o processo de projeto da mistura e as expectativas de desempenho do pavimento. Se o ligante envelhecido no RAP não se mistura com agente rejuvenescedor (ou se mistura em um grau menor do que o especulado), o conteúdo real de ligante da mistura reciclada é menor do que o conteúdo ideal especificado pelo projeto. Além disso, como a mistura não ocorre conforme o esperado, a viscosidade final do ligante difere da viscosidade prevista. Entretanto, se o agente rejuvenescedor se difundir no ligante envelhecido em uma extensão maior do que o desejado e previsto, a mistura de asfalto pode se tornar muito mole (Xu et al., 2014). Os efeitos mistos dos agentes rejuvenescedores nas qualidades do pavimento final são considerados mais influenciados pela aplicação do produto do que pelo desempenho do produto. Portanto, além da seleção meticulosa de agente rejuvenescedor com base nas propriedades RAP, a consideração do tempo e da temperatura de mistura é necessária para garantir propriedades de curto e longo prazo para um pavimento HR E HIR (Zaumanis et al., 2013).

Dony et al. (2013) estudaram três agentes de reciclagem: óleo aromático, óleo vegetal e AR a base de xisto. Os resultados de seu estudo mostraram que, para alto conteúdo de RAP, o ligante de RAP pode ser rejuvenescido usando qualquer um dos três agentes de reciclagem utilizados na pesquisa. Eles também determinaram que o

comportamento dos ligantes rejuvenescidos pode variar durante os estágios de envelhecimento de curto e longo prazo. Zanette et al. (2016) avaliaram a influência do uso do agente rejuvenescedor AR-5 (a base de xisto) na resistência à tração de uma mistura reciclada. Os resultados mostraram que a adição de 30% de agente rejuvenescedor AR-5, em relação à massa de ligante envelhecido, aumentam a resistência da mistura asfáltica em até 99% em relação à mistura envelhecida. Ensaios de FTIR, realizados no ligante envelhecido e rejuvenescido, mostraram que o ligante rejuvenescido apresentou estrutura química similar a um ligante novo.

Cong et al. (2016) analisaram os efeitos do RAP e do agente rejuvenescedor a base de petróleo produzido em laboratório, nas propriedades mecânicas das misturas recicladas. Os autores realizaram ensaio de suscetibilidade à umidade, resistência à deformação permanente, módulo dinâmico, desempenho anti-fissuração em baixa temperatura e fadiga. Os resultados indicaram que a mistura asfáltica que incorporou RAP de ligante asfáltico modificado com SBS recuperado apresentou diminuição de até 5% na resistência à umidade. Porém, apresentou melhores resultados para os ensaios de deformação permanente (com aumento de 50% de resistência) e módulo dinâmico (com ganhos de 10-20%). Os resultados de fadiga e desempenho anti-fissuração não apresentaram variação significativa.

Yang e Lee (2016) avaliaram três ligantes envelhecidos, dois cenários de mistura de RAP, dois ligantes virgens e dois rejuvenescedores comerciais (AR-25 e AR-75) e verificaram as propriedades químicas e reológicas nas combinações executadas. Os resultados indicaram que todos os ligantes envelhecidos rejuvenescidos apresentaram maiores valores de  $G^* / \sin \delta$  e menores valores de  $J_{nr}$  em comparação com os ligantes virgens de controle, implicando que as misturas rejuvenescidas têm menos suscetibilidade a deformação permanente). Nenhuma tendência particular foi encontrada entre os rejuvenescedores.

Silva e Farias (2020) analisaram os efeitos de agentes rejuvenescedores sobre o comportamento do ligante asfáltico envelhecido, para possível aplicação na reciclagem de revestimentos de pavimentos asfálticos. Os agentes rejuvenescedores adicionados foram a base de alcatrão (RejuvaSeal) e outro a base de óleo de xisto, comercialmente conhecido como AR-5, AR-250 e AR-500 foram adicionados nos teores de 15, 20 e 25% da massa total do ligante envelhecido. Os autores concluíram

que todas as porcentagens de incorporação de agentes rejuvenescedores ao ligante asfáltico envelhecido favorecem a diminuição da consistência do ligante envelhecido, conferindo maiores valores de penetração e redução do ponto de amolecimento. Os autores destacaram que a mistura contendo 20% de AR-5 apresentou melhor desempenho se comparada a uma mistura contendo ligante asfáltico novo (CAP 50-70)

## **2.4 Métodos de aplicações de agentes de reciclagem**

Devido à variedade de agentes de reciclagem, não existe um consenso quanto ao momento ideal para a adição no processo de mistura dos asfaltos reciclados. Além disso, de acordo com Zhang et al. (2019), os comportamentos discrepantes das misturas recicladas se devem à negligência da influência dos processos de produção (tempo de mistura, temperatura de produção, temperatura e tempo de armazenamento, etc.), que resultam em perdas no desempenho mecânico das misturas recicladas.

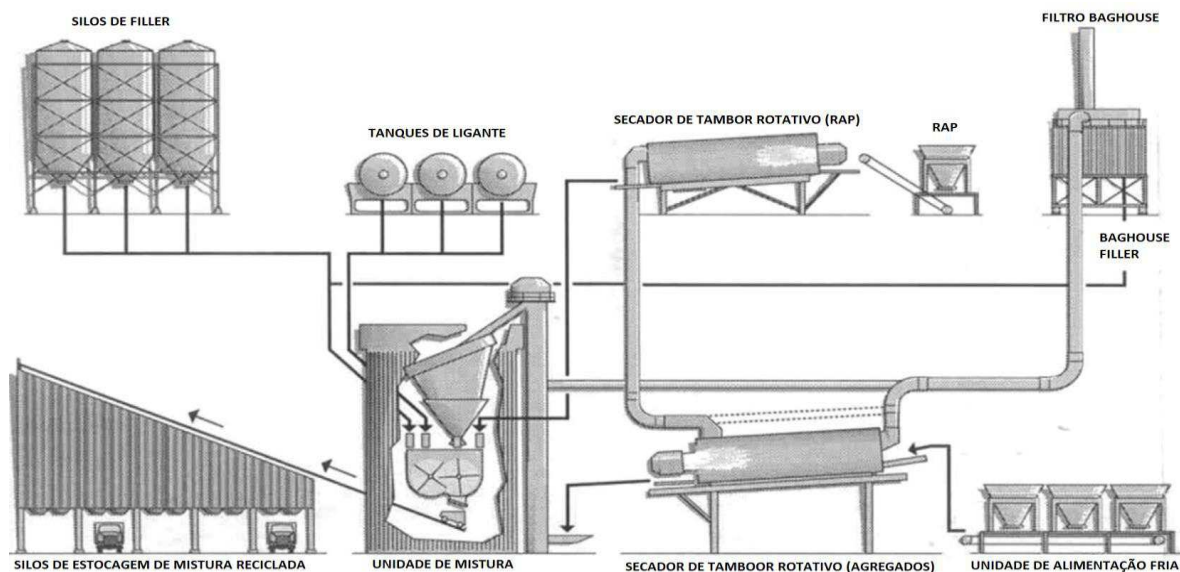
ABDO (2016) cita que para 15% RAP, ou menos, o PG do novo ligante é o mesmo ligante usado em uma mistura virgem; para a adição de 15-25% RAP, o PG do novo ligante deve ser um grau mais baixo em ambas as extremidades de alta e baixa temperatura; quando for maior que 25% de RAP, torna-se necessária a realização de testes (como: PG, MSCR e viscosidade) para garantir a qualidade da mistura. Os órgãos reguladores e associações técnicas (FHWA, NAPA, etc.) recomendam a utilização de agentes de reciclagem em misturas recicladas com altos teores de RAP, ou seja, composições com inserções superiores a 25%.

Para o caso de utilização de agentes rejuvenescedores, é recomendada a utilização diretamente sobre o RAP. A FHWA (2016) recomenda que os processos de confecção de asfaltos reciclados com a utilização de agentes rejuvenescedores sigam as seguintes etapas: aquecimento do RAP, adição do agente rejuvenescedor, mistura RAP+AR, estabilização de temperatura, acréscimo de novos componentes (agregados e ligante) e mistura final.

Tal processo também é recomendado pelos fornecedores de agentes rejuvenescedores. De acordo com Moghaddam e Baaj (2016) a adição direta sobre o

RAP se deve a necessidade de o agente rejuvenescedor corresponder aos critérios de curto e longo prazo (rápida difusão e restauração das propriedades do ligante, respectivamente). Entretanto, torna-se um processo mais longo e dependente de alteração da estrutura da usina (Figura 4) que será produzida a mistura reciclada. Dessa forma, o RAP estará sujeito a temperaturas elevadas (devido a exposição direta do RAP a chama do tambor de mistura) e essa exposição será prolongada (devido ao próprio processo de confecção de misturas recicladas). Esse desgaste excessivo pode danificar ainda mais o comportamento já fragilizado do ligante envelhecido, bem como comprometer o agente de reciclagem ou do novo ligante utilizado, podendo produzir uma mistura mais frágil.

Figura 4 – Ilustração esquemática dos processos de produção de mistura reciclada.



FONTE: Zhang et al. (2019), adaptado.

No caso de utilização de agente de reciclagem redutor a literatura recomenda a aplicação direta no novo ligante (Tuner et al., 2015; Lu et al., 2019; Zhang et al., 2019). Esse método reduz as modificações nas usinas e, conseqüentemente o tempo de produção das misturas recicladas, porém não evitam a exposição do RAP a altas temperaturas. Outra questão abordada sobre essa metodologia é a eficiência da interação do asfalto modificado com o agente de reciclagem e o ligante envelhecido presente no RAP, onde uma falha nessa interação resulta em misturas mais frágeis ou fora das especificações pretendidas.



Entretanto, a adição do agente de reciclagem em etapa posterior pode prevenir o desgaste tanto do RAP como do próprio agente de reciclagem, que pode resultar na diminuição do uso de agente de reciclagem, conseqüentemente dos custos, e numa mistura com melhor desempenho e maior vida útil. Assim, torna necessário o entendimento aprofundado dos teores aplicados de agente de reciclagem, bem como da etapa de adição do agente de reciclagem.

## **2.5 Técnicas e restrições de misturas recicladas em usinas**

A incorporação de RAP em usinas de asfalto é totalmente diferente do que é feito geralmente em laboratório. Em laboratório, a utilização de altos teores de RAP (mais de 30%) são viáveis, tendo em vista que, as condições de fabricação podem ser controladas. Para teores de RAP acima de 40%, o aquecimento é essencial para garantir a trabalhabilidade adequada. Algumas pesquisas (Zaumanis, et al. 2014; Liphardt et al., 2015; Sivilevičius et al., 2017) restringem o uso de altos teores de RAP em usinas devido aos problemas relacionados à não homogeneidade do RAP, processo de fabricação e modificações na usina. Hofko et al. (2017) cita que o superaquecimento, envelhecimento, qualidade e origem do RAP, são problemas comuns enfrentados nas usinas e afetam a durabilidade das misturas asfálticas.

Esses problemas não inviabilizam a confecção de misturas recicladas em usinas com plantas convencionais, no entanto, dificultam a produção de composições com altos teores de RAP. Em uma usina convencional, teores de 60-70% podem ser processados, mas a NAPA (2018) recomenda o uso máximo 50%. Essa restrição se deve ao envelhecimento de curto prazo e a emissão de gases que ocorre devido à exposição direta do RAP à chama do queimador. Para mitigar esses efeitos alguns ajustes na metodologia e/ou na planta da usina podem ser realizados.

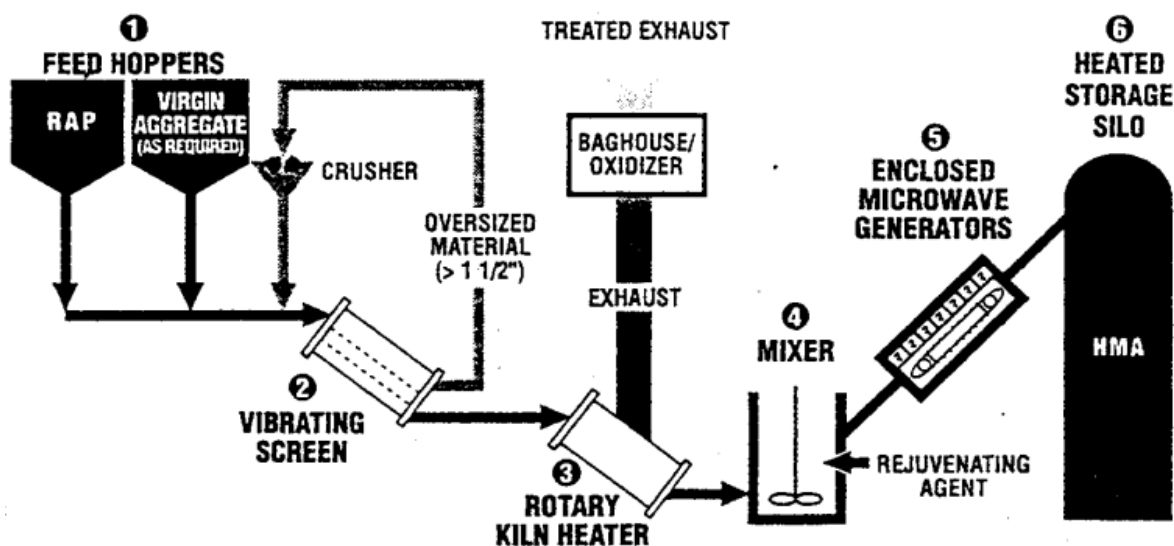
O método mais utilizado consiste no superaquecimento dos agregados virgens, seguida de adição ao RAP, reduzindo a oxidação do ligante envelhecido (Zaumanis, et al. 2014). Se o método de superaquecimento do agregado for seguido, o tempo de mistura é estendido para garantir o aquecimento e mistura adequada entre o RAP e os materiais virgens. Entretanto, alguns autores (Zaumanis, et al. 2014; Hofko et al.,

2017) relatam que essa metodologia continua expondo o RAP a temperaturas extremas e, assim, podendo haver sua degradação.

Outro método que pode ser utilizado, é o ajuste da planta da usina onde agregados e RAP são aquecidos em tambores separados. Nesse método, usualmente, o RAP é aquecido em um tambor especial separadamente, acrescido em um segundo tambor onde são introduzidos os agregados e ligantes virgens. Esse método permite reduzir a emissão de gases e diminuir o efeito do envelhecimento em curto prazo. Entretanto, o ajuste realizado na usina gera gastos extras para a produção, além de que, a utilização de dois tambores de aquecimento de material irá dobrar os gastos com energia.

Outra metodologia que apresenta bons resultados de desempenho são as usinas com tecnologia de micro-ondas, esse procedimento foi desenvolvido na National Environmental Technology Applications Corporation (NETAC) pela universidade de Pittsburgh. Essa metodologia se utiliza da aplicação de feixes de micro-ondas na confecção de misturas asfálticas, sendo rotineiramente utilizada em regiões e países com climas mais frios (EUA, China, Canadá, entre outros) em usinas fixas ou móveis. Na Figura 5 está o modelo de usina fixa desenvolvida na NETAC e na Figura 6 um modelo de usina móvel. As usinas com a tecnologia de micro-ondas podem permitir teores de 100% de RAP, pois as micro-ondas tendem a aquecer o RAP sem causar o seu envelhecimento e reduzem as emissões de gases. Entretanto, a aplicação dessa tecnologia é limitada, uma vez que o custo do aquecimento é superior ao do método convencional. Outro método é reduzir a temperatura de aquecimento como no caso das misturas mornas, o que reduzirá o envelhecimento a curto prazo, superando o alto custo da tecnologia de micro-ondas e permitindo misturas com teores de 100%.

Figura 5 – Modelo de usina fixa desenvolvida na NETAC.



Fonte: EPRI Industrial Program - Environment & Energy Management No. 2, 1992

Figura 6 – Modelos de usinas moveis de micro-ondas.



Fonte: Guangdong Esun Heavy Industry Co., 2021.



Fonte: MnDOT Research & Innovation, 2013.

Zaumanis et al. (2018) avaliaram as propriedades mecânicas e químicas das misturas de RAP de usina de asfalto com agentes rejuvenescedores e observaram que a adição dos agentes rejuvenescedores ao RAP reduziu o envelhecimento de curto prazo e o excesso de aquecimento. Liphardt et al. (2015) recomendam determinar as propriedades físicas do ligante envelhecido, pois a oxidação do RAP altera sua estrutura molecular e isso leva à fragilização do pavimento. Sivilevičius et al. (2017), afirmam que o desempenho à fadiga é a principal preocupação nas misturas RAP. Portanto, o seu estudo em misturas recicladas é de grande importância.

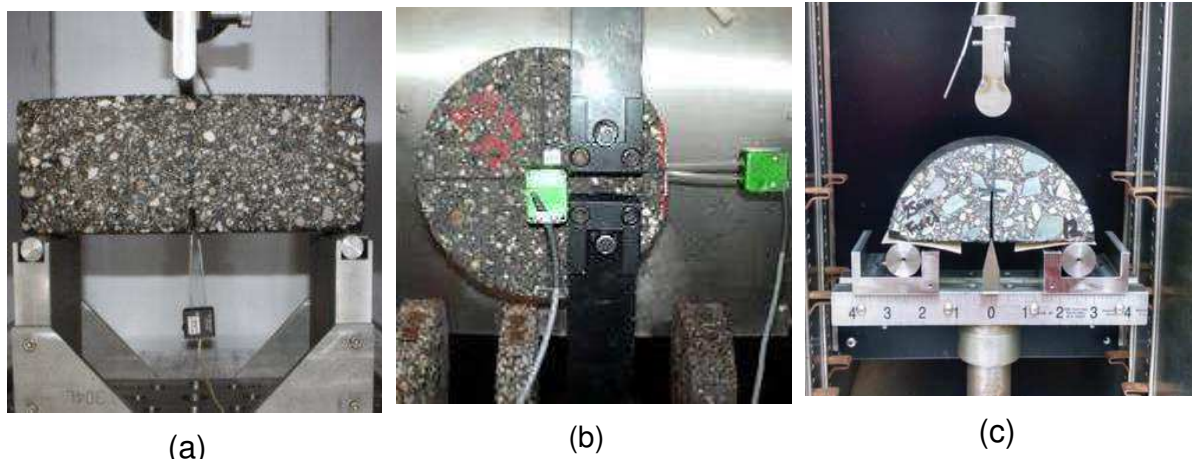
## **2.6 Procedimentos não convencionais para misturas asfálticas**

A busca por aprimoramento nas análises de misturas asfálticas possibilita o desenvolvimento constante de novos métodos de ensaios. Muitas vezes esses ensaios carecem de consolidação de resultados para demonstrar sua viabilidade prática. Outras vezes, o ensaio apresenta grande aceitação em determinadas regiões e pouca em outras. O que proporciona uma busca constante de validação desses novos métodos nas diversas localizações do globo. Na pavimentação não é diferente, a adição constante de novos materiais, ou a execução de novos métodos de dosagem ou mistura, forçam ao avanço metodológico. No caso, de misturas com adição de RAP é corriqueiro análises que identifiquem a resistência ao trincamento das misturas recicladas. Entretanto, dada a complexidade das misturas recicladas, nem sempre os métodos convencionais apresentam boa correlação ou, simplesmente, apresentam dificuldades em sua realização. Para validação de misturas recicladas com altos teores é primordial a análise por métodos que possam responder a sua complexidade.

### **2.6.1 Ensaios em corpos de prova semicirculares**

Entender como funciona os mecanismos envolvidos no processo de fratura de misturas asfálticas é uma ferramenta primordial para caracterizar o início e a propagação de trincas em materiais. Em um esforço para caracterizar a fratura por fadiga em misturas asfálticas e, ao mesmo tempo, melhorar o desempenho mecânico e estrutural do pavimento, vários ensaios de fratura foram desenvolvidos. Exemplos de ensaios desenvolvidos são: teste de viga entalhada de borda única (Figura 7, a), ensaio de tração em disco circular com fenda (disk-shaped compact tension, DCT) (Figura 7, b) e teste de fratura por flexão em amostra semicircular (semicircular bending, SCB) (Figura 7, c).

Figura 7 – Ensaio de fratura.



(a)  
Fonte: Andrew F. Braham  
Laboratory Capabilities

(b)  
Fonte: ASTM D7313 – 07

(c)  
Fonte: ASTM D8044 – 16

O teste de viga entalhada de fenda única envolve a flexão em três pontos de uma viga retangular entalhada no centro, o entalhe deve favorecer o trincamento na região de interesse. Esse ensaio é vantajoso para investigar configurações de carregamentos simples. Pesquisadores como Ping et al. (2017), Ding et al. (2018), Sudarsanan et al. (2019), Zou et al. (2020), encontraram boas correlações entre esse ensaio e o desempenho das misturas a fraturas.

O ensaio de Tração em disco circular com fenda é normatizado pela ASTM D7313-07. Alguns pesquisadores como Amir Khanian et al. (2016), Cifuentes et al. (2016), Stewart et al. (2018), Oshone et al. (2019) utilizam esse ensaio em suas pesquisas. A amostra tem uma geometria circular com orifícios de carga em cada lado do entalhe, esta geometria pode direcionar a área de fratura e, portanto, é capaz de reduzir a variabilidade associada à geometria dos resultados. Entretanto, a fabricação e preparação do corpo de prova para o ensaio não é uma tarefa simples, o que torna esse tipo de ensaio bem mais trabalhoso.

Dentre os métodos de ensaios, anteriormente citados, para análise de fraturas em misturas asfálticas, os ensaios que utilizam corpos de provas semicirculares têm ganhado cada vez mais atenção dos profissionais da pavimentação, isso devido às suas várias vantagens:

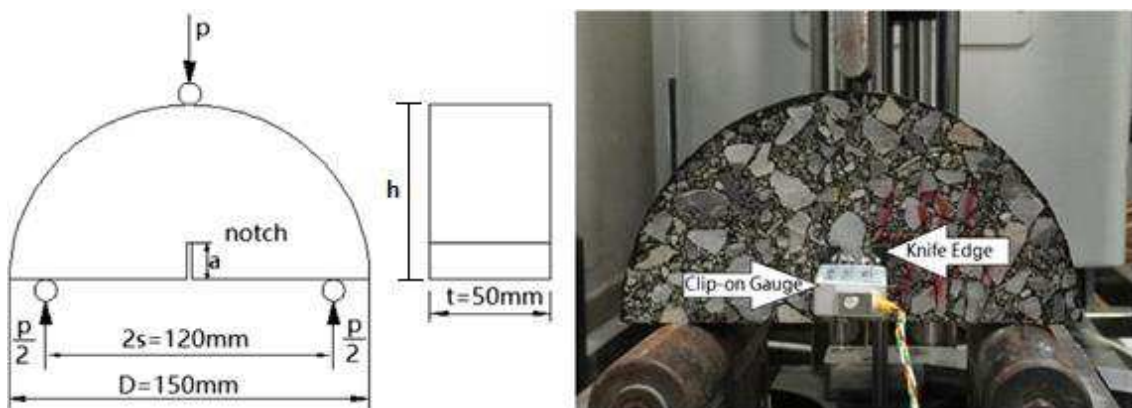
- Facilidade na fabricação de espécimes;
- Adequação para núcleos de campo;
- Economia de material;
- Repetibilidade em resultados de teste.

Este teste é usado por pesquisadores como Kim e Aragão (2013), Jahanbakhsh et al. (2019), Lu et al. (2020), Chen (2019). Os resultados mostram sensibilidades suficientes para testar variáveis como taxa de carregamento, espessura da amostra e temperatura de teste (Molenaar et al., 2015). Entretanto, não está claro quantas amostras devem ser testadas para examinar os comportamentos de fratura de uma mistura asfáltica (Nsengiyumva et al., 2015).

### 2.6.1.1 Ensaio de fratura por flexão em amostra semicircular (Semicircular Bend Test, SCB)

O ensaio de fratura por flexão em amostra semicircular é um ensaio mecânico utilizado para avaliar a resistência à fratura de misturas asfálticas. Na Figura 8 está apresentada uma esquematização do ensaio, o método é fundamentalmente um teste de flexão de três pontos de uma amostra de formato semicircular com um entalhe. Esta geometria induz tensão na parte inferior da amostra, resultando na propagação da trinca por toda a amostra.

Figura 8 – Esquematização do ensaio de fratura por flexão em amostra semicircular.



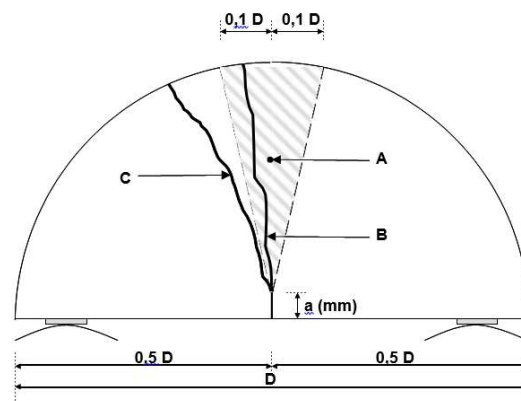
Fonte: Fan et al., 2018.

Esse ensaio foi desenvolvido primeiro para estudar a resistência à fratura de materiais rochosos (Chong e Kuruppu, 1984). E posteriormente adotado por engenheiros de pavimentação para análises de fraturas em misturas asfálticas.

O ensaio é executado em um corpo de prova semicircular de diâmetro  $D$ , altura  $h$  e comprimento  $t$ , com ranhura no centro da base reta do corpo de prova com altura  $a$  (Figura 8). O corpo de prova deverá ser condicionado a temperatura de ensaio e posicionado sobre dois roletes de suporte que possuem rotação livre, distantes entre si em  $120,0 \pm 1,0$  mm (Figura 8). Após ajustado no suporte, o corpo de prova será submetido a um carregamento, com deformação controlada e constante. Sendo assim, o ensaio apresenta carregamento monotônico no topo da amostra e, devido ao carregamento, tensões de tração se desenvolvem na base do corpo de prova provocando a propagação de uma trinca a partir da ranhura (Saha e Biligiri, 2016).

Um ensaio é considerado válido, se a expansão da trinca ocorrer em uma zona de  $\pm 15$  mm (ou 10% do diâmetro  $D$  do corpo de prova) do centro da faixa de carregamento, como demonstrado na Figura 9. Se a trinca ocorrer ou terminar fora da área A o ensaio foi falho e uma nova amostra deve ser testada.

Figura 9 – Critério para um resultado de teste válido.



Fonte: BS EN 12697-44

- Onde: A - Zona válida para resultados de ensaios  
B - Teste válido  
C - Teste inválido  
D - Diâmetro  
a - Ranhura (Notch Depth)

A definição de uma zona válida é necessária para limitar a variação nos resultados do ensaio. A variação nos resultados do ensaio aumenta com o tamanho nominal do agregado. Isso é causado pelo fato de que em amostras com um grande tamanho de agregado nominal, exista uma alta probabilidade de que as alterações provocadas pela produção da ranhura afetem as partículas de agregado. Para facilitar a determinação de um teste válido, pode ser utilizado uma peça opcional conforme mostrado na Figura 10. Na Figura 11 estão apresentados alguns exemplos de ensaios validos, enquanto que, na Figura 12 alguns exemplos de ensaios inválidos.

*Figura 10 – Peça opcional para facilitar a determinação da validade de um teste.*



Fonte: BS EN 12697-44



Fonte: Godoi, 2017.

*Figura 11 – Exemplos de ensaios validos.*



Fonte: Autor



Figura 12 – Exemplos de ensaios inválidos.



Fonte: Autor

Nota-se na Figura 12 (a) que o início da trica ocorreu na lateral da ranhura, e embora tenha se propagado para dentro da zona válida, é considerado como ensaio inválido. Na Figura 12 (b) a evolução da trinca ocorre fora da zona válida, invalidando o ensaio.

#### **2.6.1.2 Normas do ensaio de fratura por flexão em amostra semicircular e suas semelhanças/diferenças**

A utilização do ensaio SCB em misturas asfálticas possibilitou o desenvolvimento de normas para condições de carregamento estático, sendo elas as normas ASTM D8044–16, BS EN 12697-44, AASHTO T 393-21 e AASHTO T 394-21. Os principais parâmetros utilizados para a realização do ensaio SCB descrito nessas normas estão mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros para o ensaio SCB.

Parâmetros	Normas			
	ASTM D 8044-16	BS EN 12697-44	AASHTO T 393-21	AASHTO T 394-21
Diâmetro (mm)	150,0 ± 1,0	150,0 ± 1,0	150,0 ± 9,0	150,0 ± 1,0
Espessura (mm)	57,0 ± 1,0	50,0 ± 3,0	25,0 ± 2,0	50,0 ± 1,0
Altura (mm)	75,0 ± 1,0	75,0 ± 2,0	-	-
Ranhura (mm)	25, 32 e 38 ± 1,0	10,0 ± 1,0	15,0 ± 1,0	15,0 ± 1,0
Espessura ranhura (mm)	< 3,5	0,35 ± 0,10	1,5	1,5 ± 0,1
Volume de vazios (%)	7,0 ± 0,5	7,0 ± 0,5	7,0 ± 0,5	7,0 ± 0,5
Temperatura (°C)	PG IT *	Θ **	+10 do PG Max -2 do PG Min	25 ± 0,5
Tempo mínimo de estabilização de temperatura (h)	2,0 ± 0,5	> 4,0	2,0 ± 0,2	2,0 ± 0,5
Taxa de deslocamento (mm/min)	0,5	5,0 ± 0,2	0,06 (Inicial - atuador) 0,03 (secundária - expansão da ranhura)	5,0
Carga de contato (KN)	0,045 ± 0,010	0	1,0 ± 0,1	0,10 ± 0,01
Quantidade mínima de CP (unidade)	3 por ranhura	4	3	3
Critério de parada	< 25% pico de carga	-	< 0,5 KN	< 0,1 KN

Fonte: Autor.

\* PG IT é a temperatura intermediária de PG (°C), definida nas especificações ASTM D6373-21a, ASTM M332-21 ou AASHTO M320-21 e calculada através da Equação 1.

$$PG\ IT = \frac{PG\ HT + PG\ LT}{2} + 4 \quad \text{Equação 1}$$

Onde: PG HT é a máxima temperatura do PG (°C)

PG LT é a mínima temperatura do PG (°C)

\*\* Θ – temperatura não definida. A norma não determina uma temperatura padrão, deixando a escolha a critério do pesquisador. Entretanto, apresenta uma observação onde em muitos casos a temperatura de análise (θ) foi de 0°C.

Como é possível observar na Tabela 1 os parâmetros estabelecidos para esse ensaios dependem da norma utilizada, tornando as formas de cálculo e interpretação dos resultados divergentes. A norma europeia BS EN 12697-44 descreve as equações para obtenção a máxima tensão necessária para propagação da trinca, ou resistência ao trincamento ( $\sigma_{max,i}$ ), a porcentagem de deformação na tensão máxima ( $\epsilon_{max,i}$ ) e a tenacidade a fratura ( $K_{Ic,i}$ ), correspondente a carga de pico. A obtenção desses resultados requer a captura dos dados de carga máxima ( $F_{max,i}$ ) e deformação vertical ( $\Delta W_i$ ), dados esses registrados pelo dispositivo. A porcentagem de deformação na tensão máxima ( $\epsilon_{max,i}$ ) é obtida por meio da Equação 2.

$$\epsilon_{max,i} = \frac{\Delta W_i}{W_i} \times 100\% \quad \text{Equação 2}$$

Onde:  $w_i$  = altura da amostra  $i$  ( $i= 1, 2, 3, 4$ ) em mm

$\Delta w_i$  = deslocamento vertical na carga máxima  $i$  ( $i= 1, 2, 3, 4$ ) em mm

O cálculo da máxima tensão necessária para propagação da trinca ( $\sigma_{max,i}$ ), é de acordo com a Equação 3.

$$\sigma_{max,i} = \frac{4,263 \times F_{max,i}}{D_i \times t_i} \left( \frac{N}{mm^2} \right) \quad \text{Equação 3}$$

Onde:  $D_i$  = diâmetro da amostra  $i$  ( $i = 1,2,3,4$ ), em mm

$t_i$  = espessura da amostra  $i$  ( $i = 1,2,3,4$ ), em mm

$F_{max,i}$  = carga máxima para a amostra  $i$  ( $i = 1,2,3,4$ ), em N

O cálculo da resistência a fratura ( $K_{Ic,i}$ ) ocorre de acordo com a Equação 4.

$$K_{Ic,i} = \sigma_{max,i} \times f\left(\frac{a_i}{W_i}\right) \left( \frac{N}{mm^{3/2}} \right) \quad \text{Equação 4}$$

Onde:  $a_i$  = profundidade da ranhura da amostra  $i$  ( $i = 1,2,3,4$ ), em mm

$f\left(\frac{a_i}{W_i}\right)$  = Fator geométrico da amostra  $i$  ( $i = 1,2,3,4$ ) de acordo com a Equação 5. Este fator geométrico não tem unidade e deve ser arredondado para três dígitos.

$$f\left(\frac{a_i}{W_i}\right) = -4,9965 + 155,58\left(\frac{a_i}{W_i}\right) - 799,94\left(\frac{a_i}{W_i}\right)^2 + 2141,9\left(\frac{a_i}{W_i}\right)^3 - 2709,1\left(\frac{a_i}{W_i}\right)^4 + 1398,6\left(\frac{a_i}{W_i}\right)^5 \quad \text{Equação 5}$$

Entretanto, Mubaraki et al. (2019) questionam a equação 4, tendo em vista que, a  $f\left(\frac{a_i}{W_i}\right)$  seria uma variável adimensional e, assim, existindo uma incoerência nas unidades da equação. Devido a isso, a análise pela norma europeia BS EN 12697-44 foi reduzida, se restringindo a análise da porcentagem de deformação na tensão máxima e resistência ao trincamento.

As demais normas são baseadas na obtenção da energia de fratura ( $J_c$ , na norma ASTM D 8044–16; ou  $G_f$ , nas normas AASHTO T 393-21 e AASHTO T 394-21). Geralmente, essa propriedade é pouco dependente da elasticidade linear e homogeneidade em comparação com outras propriedades de fratura, como taxa de liberação de energia de deformação crítica e fator de intensidade de tensão (Nsengiyumva et al., 2019). Assim, tendo em vista a heterogeneidade e o comportamento não linear das misturas asfáltica, este método pode ser eficaz para avaliar a resistência ao trincamento das misturas asfálticas.

A energia de fratura tem sido usada como um parâmetro simples que representa a fratura para misturas asfálticas. Entretanto, sua obtenção deriva de cálculos diferentes dependendo da norma utilizada. A energia de fratura obtida pela norma ASTM D 8044–16 é calculada pela Equação 6:

$$J_c = \frac{-1}{b} \left( \frac{dU}{da} \right) \quad \text{Equação 6}$$

Onde:  $J_c$  = Energia de fratura (kJ/m<sup>2</sup>)

$b$  = espessura da amostra (m)

$a$  = profundidade do entalhe (m)

$U$  = energia de deformação até a falha (kJ)

$dU/da$  = variação da energia de deformação com a profundidade do entalhe (kJ/m)

Enquanto que, a energia de fratura obtida pelas normas AASHTO T 393-21 e AASHTO T 394-21 é calculada pela Equação 7.

$$G_f = \frac{W_f}{A_{lig}} \quad \text{Equação 7}$$

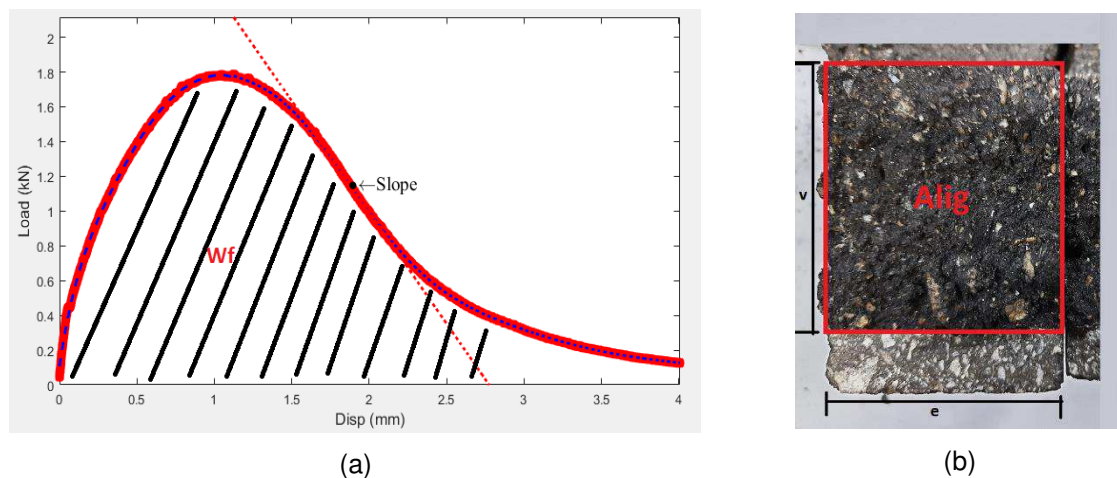
Onde:  $G_f$  = Energia de fratura ( $J/m^2$ )

$W_f$  = Trabalho da fratura (J)

$A_{lig}$  = Área de ligamento ( $m^2$ )

O trabalho de fratura  $W_f$ , corresponde a área sob a curva do ensaio, carga *versus* deslocamento (Figura 13, a). Enquanto que, área de ligamento é o produto do comprimento de ligamento,  $v$ , pela espessura,  $e$ , da amostra (Figura 13, b).

Figura 13 – Trabalho de fratura (a) e área de ligamento (b).



Fonte: Autor

Ambas as normas desenvolvem análises similares, onde são obtidos os resultados de energia de fratura ( $G_f$ ), a carga de pico ( $\sigma_{\max,i}$ ), a inclinação da curva no trecho pós-pico ( $|m|$ ) e o deslocamento crítico ( $\delta_{\text{crít}}$ ). Os dois últimos parâmetros citados são relacionados a capacidade da mistura de resistir à propagação de trincas (AL-QADI et al., 2015). Ou seja, quanto maior o deslocamento crítico e a inclinação da curva no trecho pós-pico, mais dúctil será a mistura, enquanto que quanto menor for esses parâmetros mais frágil será a mistura.

A norma AASHTO T 394-21 difere da norma AASHTO T 393-21 pela inserção do índice de flexibilidade (FI). Esse parâmetro foi desenvolvido no intuito de

reconhecer misturas frágeis, que são propensas à fratura prematura. O índice de flexibilidade é calculado considerando a energia de fratura e a inclinação da curva pós-pico de carga-deslocamento conforme indica a equação 8.

$$FI = \frac{G_f}{|m|} \times A \quad \text{Equação 8}$$

Onde: FI = índice de flexibilidade

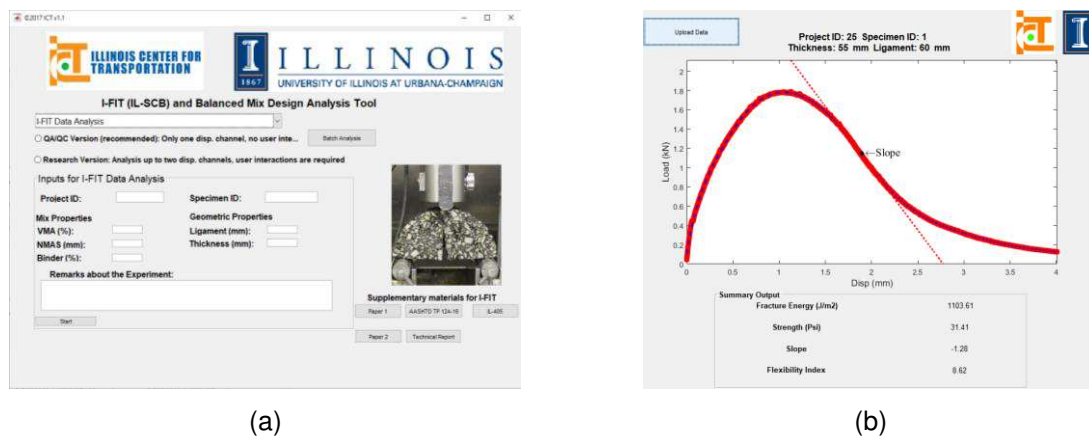
$G_f$  = energia de fratura ( $J/m^2$ )

$|m|$  = valor absoluto da inclinação da curva pós-pico  $m$  ( $kN/mm$ )

$A$  = fator unidade de conversão, sendo igual a 0,01.

Com o desenvolvimento da norma AASHTO T 394-21, a Universidade de Illinois desenvolveu um software (Illinois Flexibility Index Test, I-FIT) no qual se torna prático o cálculo de parâmetros como: energia de fratura, inclinação da reta pós-pico, índice de flexibilidade e deslocamento crítico. Utilizam-se como dados de entrada as propriedades da mistura e geometria das amostras e, na sequência, o tempo de ensaio, carga e deslocamento. Na Figura 14 é possível visualizar a interface do software (a) e um exemplo de um resultado de ensaio (b).

Figura 14 – Software I-FIT.



Fonte: Autor

Entretanto, não existe consenso em quais parâmetros devem ser adotados, a maioria dos autores (Saha e Biligiri, 2016; Lu et al., 2020; Zhou et al., 2020; entre outros) não seguem qualquer destas especificações, ou as seguem parcialmente.

Adaptando as suas análises, parâmetros como espessura do corpo de prova, dimensão da ranhura, temperatura de ensaio, taxa de carregamento, entre outros. O que resulta na falta de padronização do ensaio SCB, devido as mais diversas escolhas e nas mais diversas formas de análise.

Kasser et al. (2018) analisou a introdução de um parâmetro de fissuração, denominado Índice de Resistência à Fissuração (Cracking Resistance Index, CRI), derivado da resposta carga-deslocamento obtida durante um ensaio de fratura por flexão em amostra semicircular, e comparou-o com o Índice de Flexibilidade (Flexibility Index, FI). Os resultados dos testes indicaram que tanto FI quanto CRI são sensíveis ao grau de desempenho do ligante asfáltico, ao conteúdo de materiais reciclados e ao agente de reciclagem. Em comparação com o FI, o CRI proposto proporcionou melhor distinção entre as diferentes misturas asfálticas, menor variabilidade e cálculo mais fácil.

Lu et al. (2020) realizaram um estudo com o objetivo de investigar o potencial de caracterização do comportamento de fissuração para misturas asfálticas por meio do ensaio de fratura por flexão em amostra semicircular. Os testes de laboratório foram realizados em diferentes misturas, incluindo mistura asfáltica a quente, misturas asfálticas mornas e misturas asfálticas mornas com RAP adicionado, em várias configurações para amostras de 150 mm de diâmetro. Um ensaio de fadiga por flexão de quatro pontos também foi realizado para comparar com os resultados do ensaio de fratura por flexão em amostra semicircular. O estudo concluiu que o ensaio de fratura por flexão em amostra semicircular pode ser usado para avaliar a resistência à fissuração de misturas asfálticas. Também foi descoberto que as temperaturas de produção, tecnologias misturas mornas, conteúdo RAP, comprimentos de entalhe e vazios de ar afetaram consideravelmente o comportamento de fissuração de misturas de asfalto.

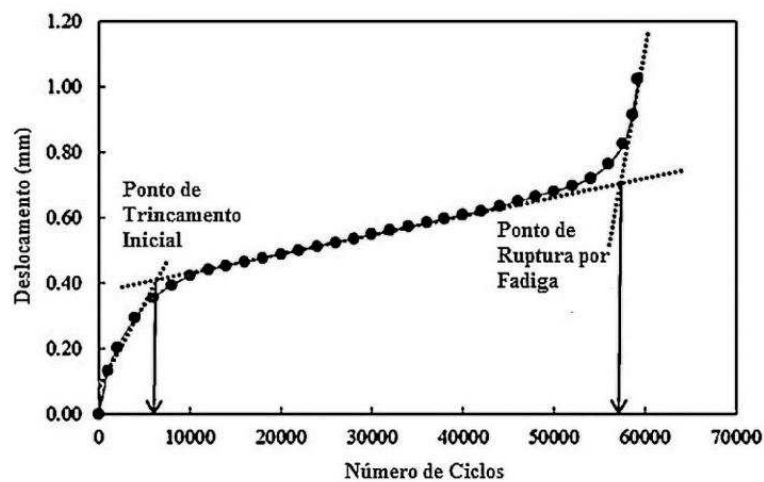
## **2.6.2 Fadiga em misturas asfálticas**

A fadiga, em geral, é o dano estrutural progressivo e localizado que ocorre quando um material é submetido a carregamentos e descarregamentos (carregamento cíclico). A norma do DNIT 183/18 – ME define fadiga como a redução

da resistência de um material sob um carregamento repetido, de magnitude inferior à sua resistência sob o carregamento estático. Onde o dano por fadiga é normalmente mostrado na forma de um padrão de fissura longitudinal, transversal ou hexagonal.

Em geral, as análises realizadas por meio de ensaios de fadiga consideram que a tensão de tração aplicada é sempre menor do que a tensão de tração necessária para ruptura da mistura asfáltica após apenas um único carregamento, ou seja, consideram uma fração da resistência à tração do material. Outra característica desse ensaio é o seu mecanismo de falha, que pode ser descrito como um processo de três estágios: o início da trinca, propagação da trinca e falha final da amostra. A Figura 15 ilustra adequadamente os três estágios.

Figura 15 – Curva de fadiga, estágios de falha.



Fonte: Godoi, 2017.

A deformação (ou deslocamento) aumenta rapidamente até o fim do primeiro estágio, caracterizado pelo ponto de trincamento inicial, onde surgem as primeiras trincas. No segundo estágio ocorre um aumento quase que linear da deformação, indicando que as microtrincas estão se desenvolvendo para macrotrincas. No terceiro estágio o deslocamento novamente aumenta rapidamente, ocorrendo a ruptura por fadiga da amostra (SHEN e LU, 2011).

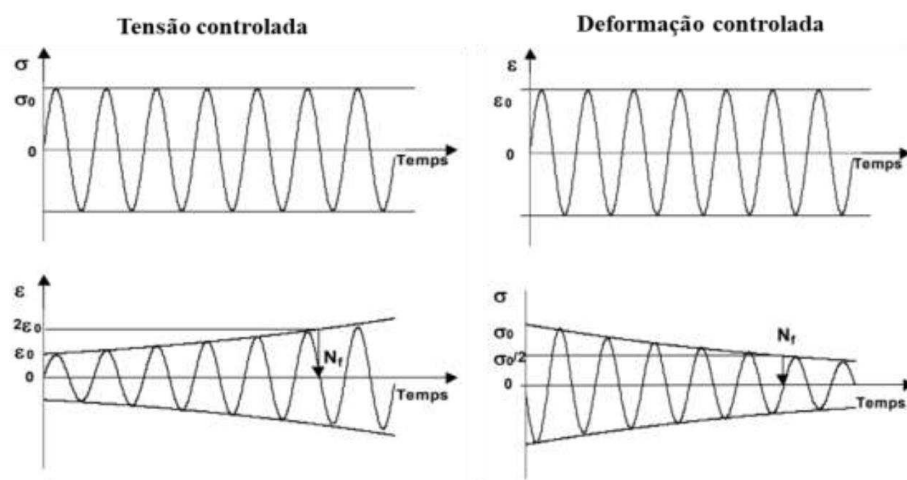
Os ensaios de fadiga nas misturas asfálticas podem ser realizados com parâmetros de tensão ou deformação controlada. Sua escolha de adoção irá depender do equipamento disponível para ensaio, e da metodologia de confecção dos corpos de prova.



Nos procedimentos com tensão controlada, a repetição do carregamento causa danos à amostra, diminuindo a rigidez da mistura em virtude do surgimento e expansão das microtrincas (Figura 16). Esse tipo de procedimento é recomendado para pavimentos cuja camada asfáltica é mais espessa. Isso se dá, devido ao fato que, essa camada é o principal componente de suporte da carga, o que resulta num menor desgaste das camadas subsequentes.

Nos ensaios a deformação controlada há diminuição da tensão para que se mantenha uma mesma deformação (Figura 16). Este tipo de carregamento é recomendável em camadas de misturas asfálticas menos espessas. Neste caso, a camada asfáltica não é o principal componente de suporte, enquanto a deformação desta camada é governada pelas camadas subjacentes.

Figura 16 – Diferença entre os estados de tensão e deformação controlada no ensaio de fadiga.



Fonte: Oliveira, 2020.

A vida de fadiga de uma mistura asfáltica é definida em termos da vida de fratura ( $N_f$ ) ou vida de serviço ( $N_s$ ). A  $N_f$ , refere-se ao número total de aplicações de carga necessária até a ruptura completa da amostra e, a  $N_s$ , ao número total de aplicações da mesma carga que reduz o desempenho da amostra, a um nível pré-estabelecido. Chen (2019) cita que existem quatro abordagens para caracterizar o comportamento de fadiga de misturas de asfalto usando testes de laboratório:

- abordagem fenomenológica tradicional, onde as respostas de tensão ou deformação e rigidez das misturas asfálticas estão relacionadas ao

número de repetições de carga até a ruptura completa. Exemplo: Fadiga por compressão diametral.

- a abordagem da mecânica da fratura se concentra na análise de propagação de trincas. Parâmetros como Fator de intensidade de tensão, energia de fratura e índice de flexibilidade, são usados para caracterizar a capacidade do material de resistir ao trincamento. Exemplo: Semicircular Beam (SCB) Test.
- baseada no dano contínuo viscoelástico proposta por Kim (1988), com base no princípio da correspondência e na teoria do potencial de trabalho desenvolvida por Schapery (1984). Esta fornece fundamentos do desempenho de fadiga da mistura asfáltica, ex Viscoelastic Continuum Damage Mechanics (VECD).
- baseada na energia dissipada, esta assume que a vida à fadiga das misturas asfálticas está relacionada à energia dissipada de cada ciclo de carregamento. Exemplo: Fadiga em vigas na flexão.

Oliveira (2020) cita que os ensaios de previsão de fadiga levaram a criação de modelos de determinação, cujos os modelos iniciais consideravam uma relação similar ao que ocorria em metais. Assim, utilizando os modelos fenológicos, foi possível determinar a vida de fadiga por meio de ensaios de tensão ou deformação controlada (equações 9 e 10).

$$Nf = ki \times \left(\frac{1}{\sigma_i}\right)^{ni} \quad \text{Equação 9}$$

$$Nf = ki \times \left(\frac{1}{\varepsilon_i}\right)^{ni} \quad \text{Equação 10}$$

Onde: Nf = vida de fadiga da mistura (número de ciclos)

$\sigma_i$  = tensão de tração

$\varepsilon_i$  = deformação de tração

$k_i, n_i$  = coeficientes experimentais

A resistência da mistura asfáltica à fadiga depende de sua composição e das propriedades dos materiais constituintes. Assim, cada tipo de asfalto possui diferentes

comportamentos à fadiga. Este comportamento deve ser determinado a fim de projetar o pavimento de forma que ele não rompa prematuramente. No Quadro 3 está sumarizada a influência dos componentes de uma mistura asfáltica que afetam a resistência à fadiga.

*Quadro 3 – Influência dos fatores na fadiga*

Fatores	Evolução dos fatores	Efeito da evolução do fator no ensaio	
		Tensão controlada	Deformação controlada
Viscosidade do ligante	Aumento	Aumenta	Reduz
Teor de ligante	Aumento	Aumenta	Aumenta
Granulometria	Aberta para densa	Aumenta	Reduz
Porosidade da mistura	Redução	Aumenta	Aumenta
Temperatura da mistura	Redução	Aumenta	Reduz

Fonte: Oliveira, 2020.

### **2.6.2.1 Ensaio de fadiga em corpos de provas semicirculares**

A trinca por fadiga ocorre sob carregamento cíclico em temperaturas intermediárias. A trinca por fadiga é uma deterioração importante sob tensões ou deformações de tração repetidas. As trincas se iniciam na parte inferior ou superior das camadas de asfalto e se propagam nas camadas. Após um certo número de cargas repetidas, ocorrem microfissuras no pavimento asfáltico. As microfissuras se desenvolvem e formam macro fraturas, que se propagam pela camada de pavimento asfáltico. Normalmente, para a fase de formulação de microfissuras, os ensaios associados são chamados de ensaios de fadiga.

Poucos estudos (Huang et al., 2013; Abdo, 2016; Godoi, 2017; Gao et al., 2018; Lu et al., 2020) fizeram uma correlação entre resultados de ensaios de fadiga em corpos de provas semicirculares e a capacidade de fratura destes. Além disso, torna-se uma abordagem de interesse acadêmico, pois as misturas asfálticas estarão sujeitas a carregamentos cíclicos. Diferentemente do que acontece no ensaio de fratura por flexão em amostra semicircular que tem como parâmetro de ensaio o carregamento estático.

### 2.6.3 Condicionamento de envelhecimento

O envelhecimento em estufa é o método mais comum usado para simular o envelhecimento oxidativo de misturas asfálticas em laboratório. O procedimento padrão atual, AASHTO R30, consiste de condicionamento de misturas asfálticas em estufa a 135 ° C. Tal procedimento é importante para análise da vida útil do pavimento. O tipo de condicionamento varia com o tempo ao qual a mistura asfáltica fica sujeita ao desgaste, sendo classificado em dois tipos:

- condicionamento a curto prazo (Conditioning for Short-Term Aging, STA): Esse tipo de condicionamento está normalmente ligado ao desgaste sofrido pelas misturas asfálticas durante as fases de produção, transporte e aplicação. Em geral, o período de envelhecimento indicado pelas diversas normas para esse procedimento não deve ser superior a 5 horas de exposição a uma temperatura 135°C.
- condicionamento a longo prazo (Conditioning for long term aging, LOTA): Diferentemente do STA, que avalia o desgaste imediato das misturas asfálticas, o LOTA avalia o desgaste durante a vida útil da mistura asfáltica. Devido a isso não existe um consenso na literatura de um intervalo máximo de exposição das misturas asfálticas a esse procedimento. É comum a indicação de intervalos de no máximo 5 dias, porém análises mais profundas com período de intervalos maiores (chegando a 12 dias de exposição), também são abortadas na literatura.

Alguns estudos relacionam uma série de fatores ao envelhecimento de uma mistura asfáltica aplicada em campo, entre eles: temperatura e tempo em serviço do pavimento, volume de vazios da mistura, teor de ligante e absorção de agregados. Semelhante ao envelhecimento em campo, os protocolos de envelhecimento realizados em laboratório, sejam eles a curto ou longo prazo, são capazes de produzir amostras de misturas asfálticas com rigidez aumentada, se comparada com misturas não envelhecidas. Sendo mais sensíveis à temperatura que foi realizado o

envelhecimento do que em relação ao tempo de envelhecimento. No Quadro 4 estão relacionados alguns estudos que analisaram os efeitos dos envelhecimentos produzidos em campo e em laboratório.

Quadro 4 – Efeitos do envelhecimento a longo prazo.

Referencia	Tipo de envelhecimento	Características observadas
Rondon et al. (2012)	Em campo	- Aumento da rigidez da mistura, resistência a deformação permanente e resistência à fadiga durante os primeiros 29 meses de exposição ambiental - Tendência oposta observada entre 30 e 42 meses
Farrar et al. (2013)	Em campo	- Envelhecimento não limitado aos 25 mm superiores do pavimento - Gradiente de envelhecimento do campo observado
West et al. (2014)	Em campo	- Menor envelhecimento de mistura morna que CBUQ durante produção - Diferença reduzida entre mistura morna e CBUQ envelhecidas - Grau equivalente de ligante e absorção para misturas mornas e CBUQ após dois anos de envelhecimento
Tarbox and Sias Daniel (2012)	Laboratório (2 e 5 dias a 85°C)	- Maior resistência à deformação permanente com LOTA - Interdependência observada entre STA e LOTA
Azari and Mohseni (2013)	Laboratório (2, 4 e 8 dias a 85°C)	- Maior rigidez com LOTA - Efeito de enrijecimento do LOTA: mistura virgem > mistura RAP - Modelo de sistema de envelhecimento global > LOTA
Safaei et al. (2014)	Laboratório (2 e 8 dias a 85°C)	- Maior rigidez com LOTA - Reduzida diferença na rigidez entre misturas mornas e CBUQ com LOTA
Brown and Scholz (2000)	Campo x laboratório (4 dias a 85°C)	- Rigidez: LOTA de 4 dias a 85°C equivalente a 15 anos de envelhecimento em campo nos Estados Unidos - Envelhecimento significativo em campo e laboratório
Harrigan (2007)	Campo x laboratório (5 dias a 80, 85 e 90°C)	- Efeito do conteúdo Vv no envelhecimento do campo - 5 dias a 85°C vs. 7–10 anos de envelhecimento em campo: laboratório > campo quando Vv < 8%; laboratório < campo quando Vv > 8%
Epps Martin et al. (2014)	Campo x laboratório (1 – 16 semanas a 60°C)	- Maior rigidez com envelhecimento em campo e LOTA de laboratório - Rigidez: Mistura morna = CBUQ, após seis a oito meses de envelhecimento em campo - Rigidez: STA de duas horas a 135°C para CBUQ e duas horas a 116°C para mistura morna acrescida de LOTA de 4 a 8 semanas a 60 ° C = primeiro verão de envelhecimento em campo

Fonte: Adaptada, Yin et al. (2017)

Como se pode observar no Quadro 4, diversos estudos já foram realizados com o objetivo de correlacionar o envelhecimento de amostras confeccionadas em laboratório com revestimentos asfálticos em serviço. O protocolo LOTA especificado em AASHTO R30, por exemplo, indica que esse procedimento simula adequadamente o envelhecimento ocorrido em campo em 7 a 10 anos após a colocação e compactação. Entretanto, esses protocolos estão sendo questionados recentemente.

Yin et al. (2017) analisou amostras em laboratório e em campo e conseguiu correlacioná-las com base na rigidez da mistura e resistência a deformação permanente. Os autores elaboraram protocolos com misturas asfálticas envelhecidas nas condições: LOTA de três dias a 85°C ou duas semanas a 60°C e cinco dias a 85°C. Em seguida, realizaram ensaios de módulo de resiliência e HWTT, para identificar o MR ratio e o HWTT RR ratio, para em sequência determinar o desgaste cumulativo da mistura asfáltica em dias (Tabela 2).

*Tabela 2 – Correlação de envelhecimento em campo com protocolos LOTA de laboratório.*

Projeto	Clima	2 semanas a 60°C ou 3 dias a 85°C	5 dias a 85°C
Texas	Mais quente	6 meses	11 meses
Novo México	-	8 meses	14 meses
Florida	-	7 meses	12 meses
Média		7 meses	12 meses
Wyoming	Mais frio	12 meses	23 meses
Dakota do Sul	-	12 meses	23 meses
Iowa	-	12 meses	23 meses
Indiana	-	11 meses	22 meses
Média		12 meses	23 meses

Fonte: Yin et al. (2017)

Os protocolos de LOTA de três dias a 85°C ou duas semanas a 60°C foram equivalentes a aproximadamente sete meses em serviço em climas mais quentes e 12 meses em serviço em climas mais frios. Quanto ao protocolo LOTA do laboratório de cinco dias a 85°C, foi representativo do envelhecimento em campo de aproximadamente 12 meses e 23 meses em serviço para climas mais quentes e climas mais frios, respectivamente.

#### **2.6.4 Condicionamento de gelo e degelo**

Nas áreas frias, a vida útil do pavimento diminui devido aos ciclos de Congelamento-Descongelação (F-T). Durante os ciclos F-T, a temperatura ambiente muda repetidamente de positiva para negativa e o pavimento sofre repetidas tensões térmicas e influências de umidade (Din et al., 2020). Danos por congelamento e descongelamento na mistura de asfalto são uma das principais causas de degradação em regiões frias. A penetração da água nos poros das misturas asfálticas associada a variação de temperatura diminui a adesão entre ligante asfáltico e o agregado (Tang et al., 2013).

Badelli et al. (2018) cita que os processos de degradação de uma mistura asfáltica em termos de ciclos F-T são categorizados como diminuição da resistência, perda de desempenho e perda de adesão entre o agregado e o ligante. Ma et al. (2015) também apresenta entendimento similar, indicando que a resistência à compressão e o módulo de resiliência da mistura asfáltica diminuem quando ela é submetida a ciclos F-T.

Em camadas de revestimento, a diminuição da temperatura tem efeito direto sobre o ligante asfáltico, resultando em um aumento da rigidez e conseqüentemente aumentando o módulo. Do ponto de vista estrutural, essas mudanças nos módulos da camada de revestimento não são críticas, uma vez que a capacidade de carga da estrutura é aumentada. Entretanto, o desempenho funcional da estrutura diminuí devido às fissuras induzidas termicamente (El-Hakim e Tighe, 2014).

Durante o período de degelo, o derretimento da neve induz a perda de capacidade de carga. A perda de suporte estrutural das camadas subjacentes cria um aumento significativo nas tensões de tração na parte inferior das camadas de revestimento. Além disso, o aumento das tensões devido às variações de temperatura (expansão/contração da água) causa um aumento nas fissuras por fadiga. Verifica-se então que a ação do tráfego por si só não é a causa dessas fissuras na camada de revestimento. Em vez disso, é provavelmente o efeito do estresse térmico, ciclos térmicos e penetração de umidade que resulta em estresse que excede a resistência à tração dos materiais asfálticos (Carter & Paradis, 2010).

#### **2.6.4.1 Freeze–thaw (F-T) cycles**

Özgan e Serin (2013) avaliaram a resistência ao degelo e congelamento de misturas de asfalto. Os resultados experimentais das amostras que foram submetidas a diferentes ciclos de F-T (6, 12, 18 e 24 dias) mostraram que a estabilidade Marshall diminuiu substancialmente após 6 dias de ciclos de congelamento-descongelamento e gradualmente suave para os 12, 18 e 24 dias de ciclos de F-T. Islam e Tarefder (2016) investigaram o comportamento de rigidez na flexão e da resistência à tração de misturas asfálticas, em amostras condicionadas de longo prazo de F-T em laboratório. As amostras preparadas foram condicionadas em diferentes números de ciclos F-T, variando de um dia inteiro até 150. Os resultados mostram que a rigidez na flexão das amostras condicionadas F-T diminui com o condicionamento F-T, enquanto o RT não muda significativamente com os ciclos F-T.

Teltayev et al. (2019) investigaram o efeito do F-T sobre as características do ligante puro e modificados com diferentes polímeros, bem como de misturas asfálticas preparados com eles. A temperatura máxima e mínima em ciclos de F-T foi igual a +20 °C e -18 °C, respectivamente. Os ligantes e suas modificações foram ensaiados na condição inicial e após 25 e 50 ciclos de F-T, enquanto que as misturas asfálticas, na condição inicial e após 50 ciclos de F-T. Os resultados obtidos experimentalmente mostraram que o F-T impacta essencialmente nas características investigadas dos ligantes (penetração, ponto de amolecimento, viscosidade dinâmica, entre outras) e das misturas asfálticas (resistência a tração e deformação permanente). A modificação com polímeros melhora as características mecânicas dos betumes e diminui o efeito de F-T.

Cong et al. (2020) investigaram o efeito dos ciclos de F-T na deterioração do desempenho de misturas de mistura asfáltica. As amostras foram condicionadas a 10 ciclos de F-T. Medições de parâmetros volumétricos e teste de resistência à tração indireta foram realizados após 1, 3, 5 e 10 ciclos. Os resultados encontrados indicam que com o aumento dos ciclos de F-T, a RT e a Razão de Resistência à Tensão (RRT) diminuem enquanto a Densidade Relativa em Massa (DRM) aumenta primeiro depois diminui. Também foi observado que o aumento apropriado do teor de asfalto tem um efeito positivo em desacelerar o crescimento de danos na mistura de asfalto.



## 2.7 Considerações sobre o tema abordado

A complexidade envolvida no desenvolvimento de misturas recicladas com altos teores de RAP está intimamente ligada a dois fatores: momento de adição do agente de reciclagem e teor do agente de reciclagem. Com isso, para se desenvolver uma mistura reciclada com o máximo teor de RAP possível é necessário dominar esses dois fatores para o agente de reciclagem a ser utilizado. Ao analisar momentos distintos de adição espera-se identificar possíveis desgastes que comprometam a ação efetiva dos agentes de reciclagem e identificar as melhores configurações mistura/teor que desenvolvam os melhores resultados mecânicos das misturas. Enquanto que analisar o teor mínimo de agente de reciclagem tem por objetivo identificar a mistura reciclada economicamente viável, apresentando o melhor desempenho e o melhor custo benefício.

Para isso é necessário o desenvolvimento de um quadro experimental que analise todas as principais variáveis de risco de uma mistura asfáltica reciclada, sendo elas: fragilidade ao trincamento e baixa resistência ao efeito deletério da água. Os ensaios em corpos de provas semicirculares embora já sejam utilizados em estudos internacionais, ainda são pouco usados nacionalmente, e mais restritos a misturas convencionais. O ensaio de flexão em corpos de prova semicircular é considerado adequado para qualificar misturas de asfalto para atender às diferentes demandas de tráfego e condições estruturais do pavimento. Este apresenta facilidade de execução, boa repetibilidade e acessibilidade para laboratórios menos sofisticados.

O ensaio de flexão pode fornecer informações da resistência ao trincamento de misturas asfálticas, fato de importância em misturas recicladas tendo em vista sua elevada rigidez, sendo essa uma das principais dificuldades em sua realização. Esse fato, associado as características do ensaio (praticidade, repetibilidade e precisão), faz com que análise desse ensaio seja uma importante ferramenta a ser utilizada nesse trabalho. Em contrapartida, devido ao emprego desse ensaio nessa tese, pode-se contribuir com sua divulgação e aprofundamento sobre o entendimento de parâmetros como temperatura do ensaio, espessura da amostra, diâmetro da fissura, distribuição de cargas, entre outros.

O ensaio de fadiga em corpos de prova semicircular é pouco usual, porém pode ser uma alternativa mais rápida e eficiente ao ensaio de fadiga por compressão diametral. A aceleração e a eficiência do ensaio de fadiga em corpos de prova semicirculares podem ser aumentadas devido a fissura no corpo de prova semicircular. A fissura favorece a linha de ação de carregamento, permitindo menores dispersões das tensões aplicada, o que é um grande entrave no ensaio de fadiga por compressão diametral.

Devido o foco em misturas, com teores elevados de RAP, é importante a análise de parâmetros que possam identificar a eficiência da interação ligante envelhecido/ agente de reciclagem. Uma das formas de analisar o nível de interação ligante envelhecido/ agente de reciclagem é por meio da análise do desempenho das misturas após o envelhecimento acelerado das amostras em laboratório.

As aplicações de condicionamento de envelhecimento a curto e longo prazo, ajudam na verificação da oxidação das misturas asfálticas ao longo do tempo. Além de proporcionar uma análise aproximada de vida útil que as misturas condicionadas apresentarão na prática. Ao realizar o condicionamento de envelhecimento e, em seguida, a repetição dos ensaios de RT, flexão e fadiga em corpos de provas semicirculares, será possível analisar o quanto efetiva é a mistura ao longo da vida útil da mistura reciclada.

Outro condicionamento que apresentam boas respostas a essa interação, é o condicionamento de ciclos de gelo e degelo. Esse condicionamento verifica o efeito deletério da água nas misturas asfálticas em condições prolongadas, sendo esse uma deterioração da capacidade de ligação ligante/agregado. O processo ocorre com a penetração da água nos vazios da mistura asfáltica e, conseqüentemente, prejudicando a adesividade entre seus componentes, no caso de misturas recicladas ligante/AR/agregado.

Durante o período de congelamento, a diminuição da temperatura tem efeito direto sobre o ligante asfáltico, resultando em um aumento da rigidez, já durante o degelo, induzirá a perda de capacidade de carga. Além disso, o aumento das tensões devido às variações de temperatura (expansão/contração da água) causa um aumento nas fissuras por fadiga. Comportamento indesejado em misturas asfálticas,

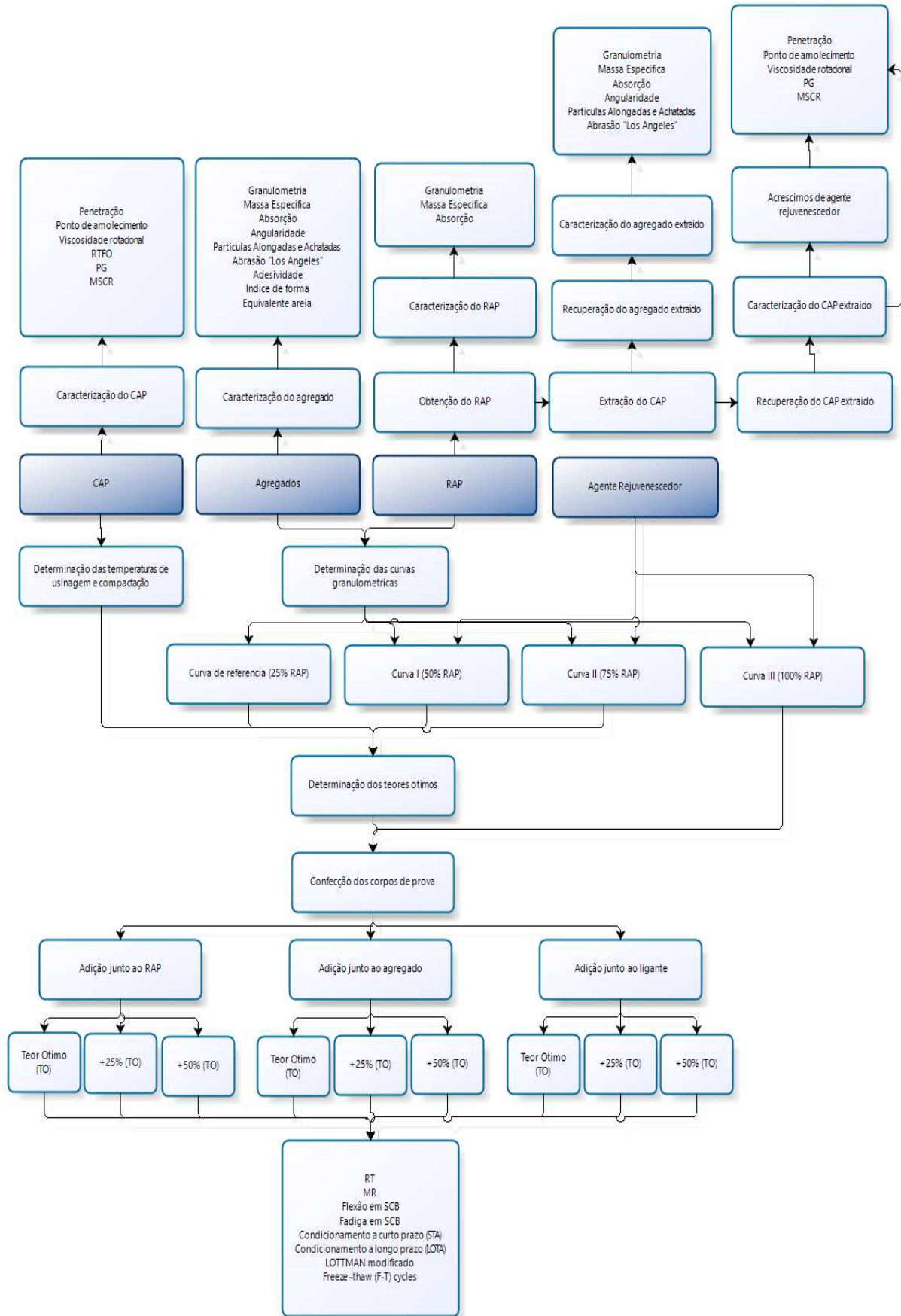
principalmente em misturas recicladas tendo em vista sua fragilidade em relação ao trincamento.

Embora seus resultados apresentem significância apropriada, ao realizar uma breve análise na literatura nacional nota-se a carência de estudos que utilizem em sua abordagem esses condicionamentos, tanto envelhecimento como gelo e degelo em condições prolongadas. Assim, essa tese pode fomentar a utilização de tais métodos, não só para misturas recicladas, mas outros estudos de misturas asfálticas.

### **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

O programa experimental desta pesquisa consiste na avaliação das propriedades mecânicas de misturas asfálticas com adição de diferentes agentes de reciclagem em etapas distintas durante a produção da mistura asfáltica. Os corpos de prova (CPs) foram moldados seguindo os critérios da metodologia SUPERPAVE. A pesquisa seguiu o fluxograma geral exposto na Figura 17.

Figura 17 – Fluxograma geral do programa experimental.



### 3.1 Materiais

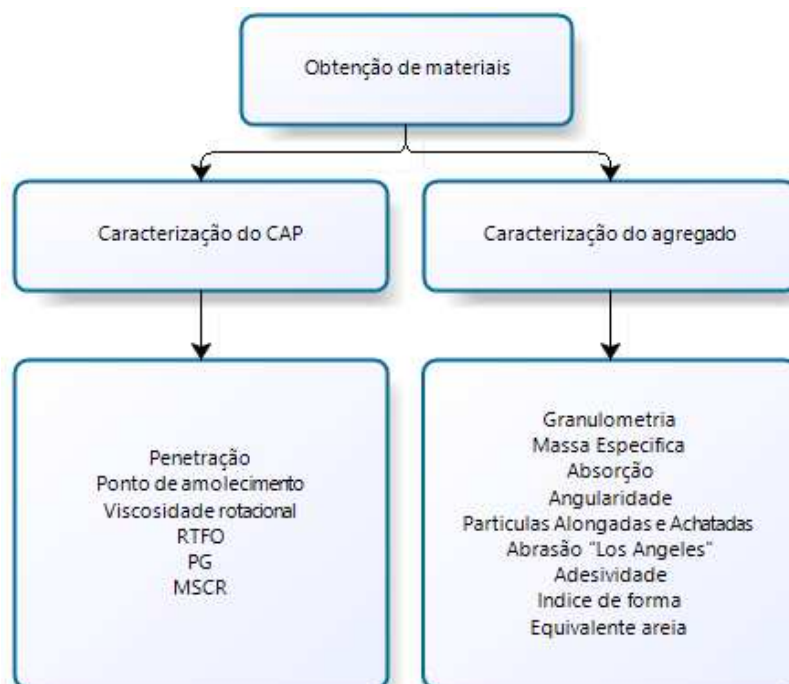
Os ensaios, dosagem e moldagem dos corpos de prova foram realizados no Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP), na Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

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

#### 3.1.1 Agregados e ligante asfáltico

A caracterização dos agregados e do ligante asfáltico seguiu o fluxograma apresentado na Figura 18.

Figura 18 – Fluxograma de caracterização dos agregados e ligante asfáltico.



### 3.1.1.1 Caracterização dos ligantes

O resultado da caracterização física e reológica do ligante asfáltico está apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 – Caracterização reológica do ligante asfáltico utilizado na pesquisa.

Ensaio	Amostra	Limites	Normas
Ponto de Amolecimento (° C)	48	Min, 43	ABNT NBR 6560
Penetração (mm)	56,5	50 a 70	ABNT NBR 6576
Ponto de Fulgor (° C)	>250	Min, 235	ABNT NBR 11341
Viscosidade Rotacional			
Temperatura 135 ° C (cP)	384,0	Min, 274	ABNT NBR 15184
Temperatura 150 ° C (cP)	186,0	Min, 112	
Temperatura 177 ° C (cP)	71,5	57 a 285	
RTFO			ASTM D 2872
Perda de Massa (%)	0,088	0,5	
Penetração Retida (%)	75,2	Min, 55	ABNT NBR 6576
Variação de Ponto de Amolecimento (° C)	+4	+8	ABNT NBR 6560
PG (° C)	58	-	AASHTO M 320
MSCR			
R <sub>0,1</sub> (%)	2,2	-	
R <sub>3,2</sub> (%)	1,1	-	
R <sub>diff</sub> (%)	50,5	-	AASHTO TP 70
J <sub>nr 0,1</sub> (kPa <sup>-1</sup> )	2,0	-	
J <sub>nr 3,2</sub> (kPa <sup>-1</sup> )	2,5	-	
J <sub>nr diff</sub> (%)	4,8	-	

Fonte: Autor

Os resultados obtidos na caracterização dos ligante atendem aos critérios estabelecidos pela Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

(ANP), segundo resolução nº 19/2005. Os resultados indicam a qualidade satisfatória do ligante asfáltico empregado nessa pesquisa.

### 3.1.1.2 Caracterização dos agregados

Os agregados utilizados nesta pesquisa são do tipo granítico e foram adquiridos junto à Construtora Rocha Cavalcante, localizada na cidade de Campina Grande, Paraíba. A caracterização do agregado graúdo está apresentada na Tabela 4.

*Tabela 4 – Caracterização do agregado graúdo utilizado na pesquisa.*

Ensaio	Amostra		
	Norma	Brita 12,5"	Limite
Determinação do índice de forma	DNIT – ME 086/94	0,666	Min, 0,5
Massa específica real (g/cm <sup>3</sup> )		2,625	-
Massa específica aparente (g/cm <sup>3</sup> )	DNIT – ME 081/98	2,611	-
Absorção (%)		0,52	-
Abrasão “Los Angeles” (%)	DNIT – ME 035/98	21,26	Max, 50
Partícula alongada e achatada (%)	ASTM D 4791	8,74	Max, 10
Adesividade ao ligante asfáltico	DNIT – MR 078/94	Não satisfatório	-

Fonte: Autor

Os resultados obtidos atendem aos critérios empregados pela metodologia Superpave, bem como, das especificações do DNIT. A adesividade entre a brita 12,5 e o CAP 50/70 foi insatisfatória, portanto é necessário o melhoramento do ligante asfáltico por meio da adição de dope. Entretanto, nessa pesquisa optou-se por não realizar esse melhoramento, uma vez que a adição do dope pode influenciar na viscosidade do ligante. A caracterização do agregado miúdo está apresentada na Tabela 5.



Tabela 5 – Caracterização do agregado miúdo utilizado na pesquisa.

Ensaio	Amostra		
	Norma	Pó de Pedra	Limite
Massa Específica Real (g/cm <sup>3</sup> )		2,542	-
Massa Específica Aparente (g/cm <sup>3</sup> )	DNIT – ME 084/95	2,430	-
Absorção (%)		0,66	-
Equivalente areia (%)	DNIT – ME 054/97	74,39	Min, 55
Angularidade de Agregado Miúdo (%)	AASHTO T 304	45,04	Min, 40

Fonte: Autor

O agregado miúdo atende as especificações técnicas para utilização em misturas asfálticas pela metodologia Superpave e DNIT. Entretanto, ao analisar o ensaio de equivalente areia é possível detectar uma considerável presença de finos, que embora atenda as especificações, esse valor indica uma proporção considerável de material de enchimento (fíler). A presença excessiva de fino em uma mistura asfáltica pode torná-la mais rígida, ou seja, uma mistura de comportamento frágil. Em casos onde o volume de RAP, nessas condições, forem maiores que o volume de agregados, a matriz pétreo da composição não terá ajuste adequado e, conseqüentemente, a mistura asfáltica resultante apresentará desempenho inadequado.

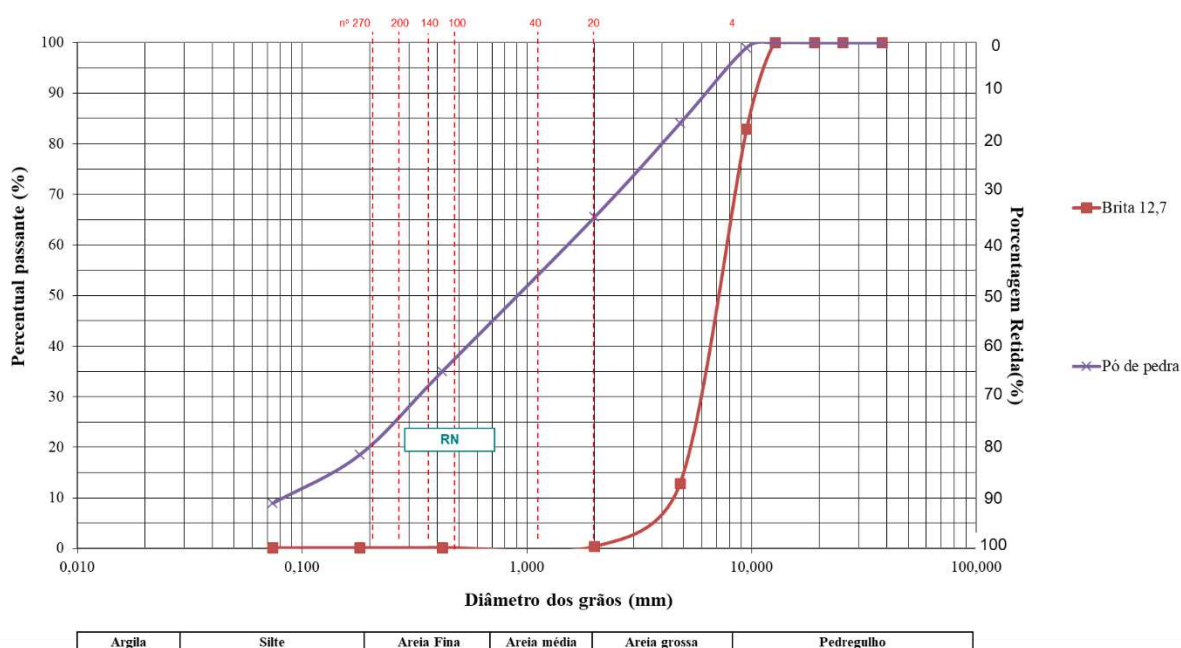
A determinação da granulometria dos agregados foi realizada seguindo a norma DNIT – ME 083/98. A Tabela 6 apresenta os resultados das análises granulométricas, as curvas granulométricas dos agregados são apresentadas na Figura 19.

Tabela 6 – Análise granulométrica dos agregados.

Peneira	Percentagem passante em massa (%)			
	Nº	mm	Brita 12,5"	Pó de Pedra
1 1/2 "		38,1	100,00	100,00
1"		25,4	100,00	100,00
3/4 "		19,1	100,00	100,00
1/2 "		12,7	100,00	100,00
3/8 "		9,5	82,92	99,04
Nº 4		4,8	12,86	84,06
Nº 10		2	0,45	65,52
Nº 40		0,42	0,24	35,04
Nº 80		0,18	0,22	18,53
Nº 200		0,08	0,18	8,97

Fonte: Autor

Figura 19 – Distribuição granulométrica dos agregados.



Fonte: Autor

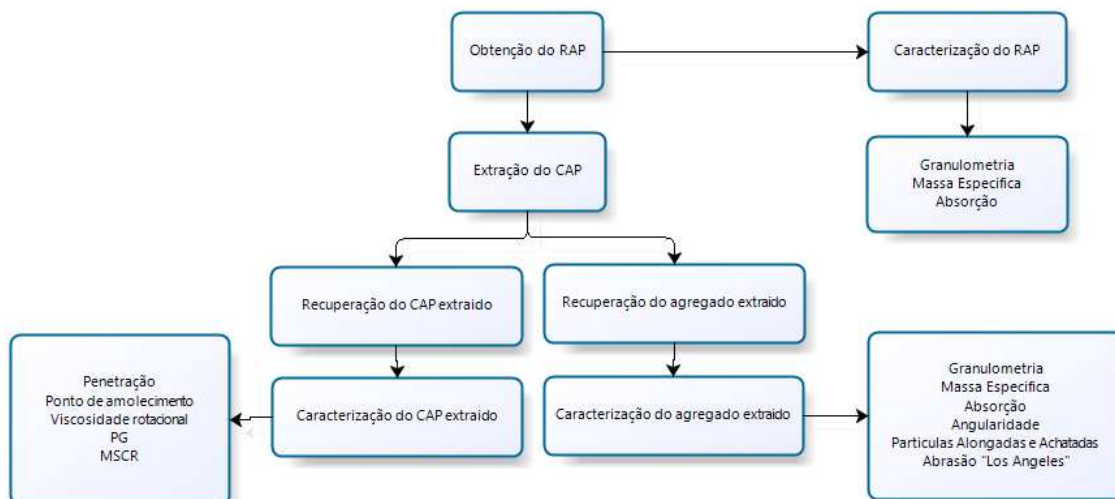
### 3.1.2 RAP e Agentes de reciclagem

O RAP utilizado na pesquisa foi adquirido por meio de doação junto a JBR Engenharia LTDA. Os agentes de reciclagem adotados nesse estudo foram redutor de temperatura ADCAP WM e óleo de motor residual.

A escolha dos agentes de reciclagem foi feita por representar grupos específicos de agentes de reciclagem, sendo o ADCAP WM, um agente redutor de temperatura surfactante; e o óleo de motor residual, um agente redutor de temperatura reciclável. O aditivo ADCAP WM foi adquirido por doação da AminoCap - Química e o óleo de motor residual foi adquirido em oficinas de auto locais. Com o objetivo de determinar o máximo teor possível de RAP, em uma mistura reciclada, serão analisadas composições com 25, 50, 75 e 100% de RAP, essas proporções são em relação a massa total do corpo de prova. Devido a utilização de teores de 100%, o RAP será tratado como Black Rock, pois metodologias como blending chart não possibilitam a utilização de teores tão elevados.

A caracterização dos agregados e do ligante asfáltico do RAP foi realizada de acordo com o Fluxograma apresentado na Figura 20.

Figura 20 – Fluxograma de caracterização do RAP.



Os teores a serem utilizados de ADCAP WM nessa pesquisa foram determinados conforme indicação técnica de utilização do produto, que recomenda a

adição de 0,5 a 2% de ADCAP WM em relação a massa total do ligante asfáltico. Os teores acrescentados foram de:

- 2,0% em massa total do ligante presente no RAP, considerado o teor ótimo (S);
- 2,5% em massa total do ligante presente no RAP, considerado o teor ótimo com acréscimo de 25% do teor ótimo (S +);
- 3,0% em massa total do ligante presente no RAP, considerado o teor ótimo com acréscimo de 50% do teor ótimo (S ++);

Os teores a serem utilizados de óleo residual de motor nessa pesquisa foram determinados conforme estudos de Zaumanis et al. (2015), os autores identificaram como teor ótimo 12% em massa de RAP. Os teores utilizados foram de:

- 12,0% em massa total do RAP, considerado o teor ótimo (O);
- 15,0% em massa total do RAP, considerado o teor ótimo com acréscimo de 25% do teor ótimo (O +);
- 18,0% em massa total do RAP, considerado o teor ótimo com acréscimo de 50% do teor ótimo (O ++);

### 3.1.2.1 Caracterização do RAP

O RAP utilizado nessa pesquisa provém de extração da BR-230/PB, Km 15. A caracterização física do RAP está apresentado na Tabela 7.

*Tabela 7 – Caracterização dos agregados recuperados.*

Ensaio	Amostra	Limites*	Norma
Densidade máxima medida (g/cm <sup>3</sup> )	2,465	-	ASTM D 2041
Absorção (%)	0,50	-	
Equivalente Areia (%)	86,59	Min, 55	DNIT – ME 054/97

Fonte: Autor

Embora não existam limites normativos para o material fresado, este atende aos limites normativos indicados para os agregados convencionais. Entretanto, deve-

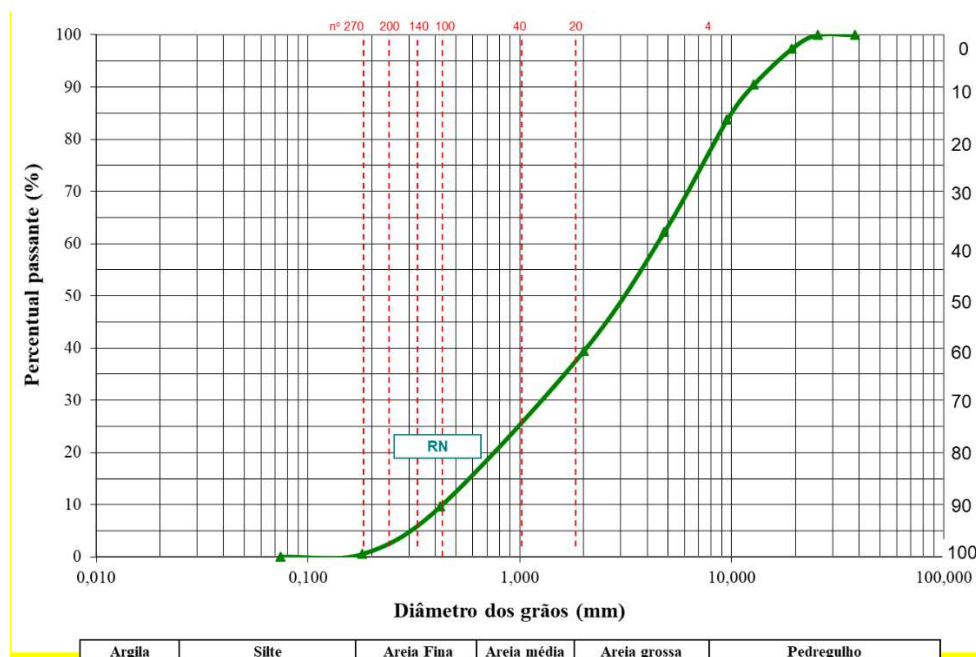
se observar que o resultado de equivalente areia indica uma quantidade de partículas finas ou contaminantes acima do esperado para esse material. Essa alteração pode ser justificada pela condição de armazenamento do RAP antes da coleta, bem como da própria condição de realização de fresagem e da presença de “resíduos contaminantes” no pavimento. A Tabela 8 apresenta o resultado da análise granulométrica, sendo a curva granulométrica apresentada na Figura 21.

Tabela 8 – Análise granulométrica do RAP.

Nº	Peneira	mm	Percentagem passante em massa (%) RAP
1 1/2 “		38,1	100,00
1”		25,4	100,00
3/4 “		19,1	97,27
1/2 “		12,7	90,47
3/8 “		9,5	83,73
Nº 4		4,8	62,24
Nº 10		2	39,45
Nº 40		0,42	9,66
Nº 80		0,18	0,58
Nº 200		0,08	0,06

Fonte: Autor

Figura 21 – Distribuição granulométrica do RAP.



Fonte: Autor

### 3.1.2.2 Caracterização do ligante recuperado

O procedimento de extração de ligante asfáltico seguiu a norma DNIT 053/94, sendo possível determinar o teor de ligante presente no RAP, então foram realizadas 3 extrações de ligante asfáltico presentes no RAP utilizando tricloroetileno. A Tabela 9 apresenta os resultados do teor de ligante do RAP obtido por meio de 3 extrações.

Tabela 9 – Teor de ligante do RAP.

Amostra	Teor de ligante (%)
I	5,47
II	5,49
III	5,55
Média	5,50

Fonte: Autor

Após a extração do ligante asfáltico envelhecido no rotarex, este estava diluído em tricloroetileno, sendo necessário processamento para sua recuperação para análise. A recuperação foi realizada utilizando um evaporador rotativo (rotovap), e seguiu conforme recomendado pelas normas ASTM D5404 / D5404M e AASHTO T 319. Na Figura 22 estão imagens do evaporador rotativo durante a realização da recuperação.

Figura 22 – Evaporador rotativo para recuperação de ligante asfáltico.



Fonte: Autor

Após a recuperação do ligante pelo evaporador rotativo, a amostra foi colocada em estufa a vácuo em três ciclos de extração. O primeiro ciclo foi de 6 horas à 60 °C e 60 mmHg, seguido de mais um período de 2 horas a 85 °C e 60 mmHg e, por fim, mais um período de 2 horas a 100 °C a 60 mmHg. A realização dessa etapa teve por

objetivo retirar os resquícios de tricloroetileno que ainda poderiam estar presentes no ligante recuperado. Na Figura 23 estão expostos a estufa a vácuo e a amostra durante realização da recuperação.

Figura 23 – Recuperação do ligante envelhecido, estufa a vácuo.



Fonte: Autor

Os resultados obtidos da caracterização física e reológica do ligante asfáltico recuperado estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Caracterização reológica do ligante asfáltico recuperado.

Ensaio	Amostra	Normas
Ponto de Amolecimento (° C)	68,0	ABNT NBR 6560
Penetração (mm)	29,2	ABNT NBR 6576
Viscosidade Rotacional		
Temperatura 135 ° C (cP)	2750	ABNT NBR 15184
Temperatura 150 ° C (cP)	1061	
Temperatura 177 ° C (cP)	453	
PG (° C)	82	AASHTO M 320
MSCR		
R <sub>0,1</sub> (%)	7,03	AASHTO TP 70
R <sub>3,2</sub> (%)	2,50	
R <sub>diff</sub> (%)	64,40	
J <sub>nr 0,1</sub> (kPa <sup>-1</sup> )	1,82	
J <sub>nr 3,2</sub> (kPa <sup>-1</sup> )	2,30	
J <sub>nr diff</sub> (%)	26,57	

Fonte: Autor

Não existe uma definição estabelecida sobre esses parâmetros para o ligante recuperado presente no RAP, entretanto, ao analisar os resultados obtidos nessa pesquisa é possível verificar que eles se encontram próximos a valores encontrados em outras pesquisas (Gennesseaux, 2015; Unger Filho, 2019; Wang et al., 2020; Arruda, 2021; entre outros).

### 3.1.2.3 Caracterização dos agregados recuperados

*A caracterização dos agregados recuperados está apresentada na*

Tabela 11.

*Tabela 11 – Caracterização dos agregados recuperados.*

Ensaio	Amostra		
	Agregado recuperado	Limites	Norma
Massa específica real (g/cm <sup>3</sup> )	2,466	-	
Massa específica aparente (g/cm <sup>3</sup> )	2,379	-	DNIT – ME 081/98
Absorção (%)	0,89	-	
Angularidade de Agregado Miúdo (%)	45,43	Min, 40	AASHTO T 304
Equivalente Areia (%)	68,58	Min, 55	DNIT – ME 054/97
Partícula alongada e achatada (%)	9,34	Max, 10	ASTM D 4791

Fonte: Autor

Após extração do ligante os agregados recuperados tiveram resultados de massa específica e angularidade similares aos obtidos com amostras de pó de pedra utilizados nessa pesquisa, indicando uma presença elevada de finos em sua composição. Outra característica a ser observado é o baixo valor obtido no ensaio de equivalente areia, que embora ainda estejam dentro dos parâmetros normativos, o valor confirma a presença eleva de finos ou de “material contaminante”, tal como observado em amostra do RAP. A Tabela 12 apresenta os resultados das análises granulométricas dos agregados recuperados, as curvas granulométricas são apresentadas na Figura 24.

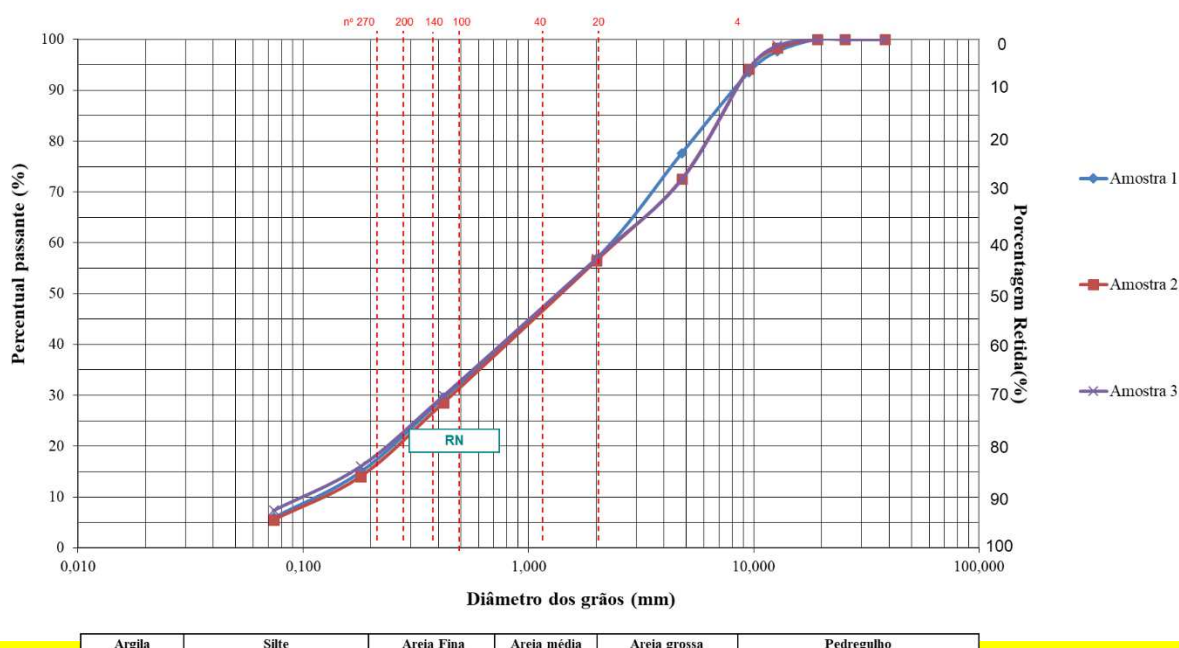


Tabela 12 – Análise granulométrica dos agregados recuperados.

Peneira	Percentagem passante em massa (%)				
	Nº	mm	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
1 1/2 “	38,1		100,00	100,00	100,00
1”	25,4		100,00	100,00	100,00
3/4 “	19,1		100,00	100,00	100,00
1/2 “	12,7		98,78	98,27	97,60
3/8 “	9,5		94,19	94,22	93,49
Nº 4	4,8		72,49	72,59	77,65
Nº 10	2		56,89	56,48	56,82
Nº 40	0,42		29,92	28,54	29,53
Nº 80	0,18		16,03	14,03	14,99
Nº 200	0,08		7,35	5,51	5,98

Fonte: Autor

Figura 24 – Distribuição granulométrica dos agregados.



Fonte: Autor

### 3.2 Dosagem das misturas asfálticas

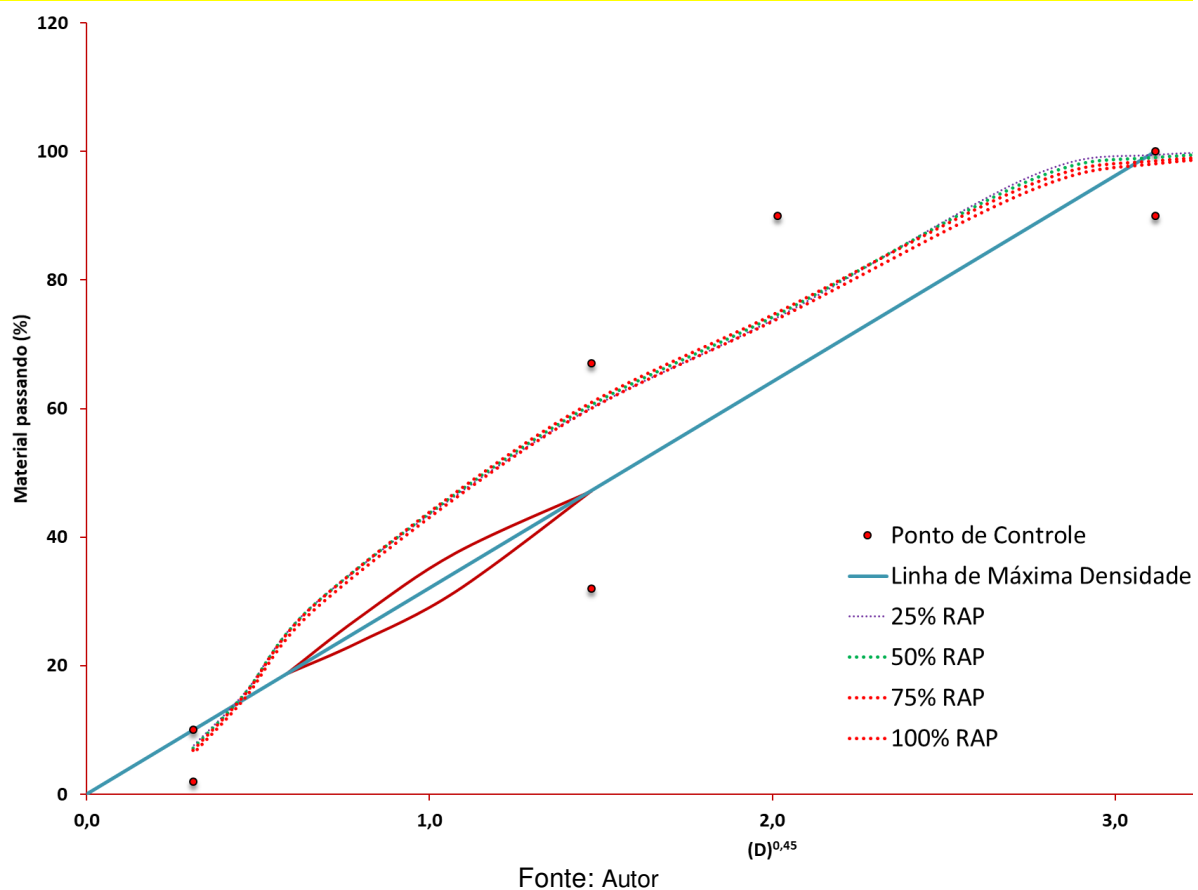
A dosagem das misturas asfálticas foi realizada seguindo o método de compactação por amassamento. Para a realização da pesquisa foram selecionadas quatro faixas granulométricas utilizando a curva Fuller, sendo utilizada a curva granulométrica média dos agregados recuperados como curva base para determinação das demais. As faixas desenvolvidas foram determinadas a partir do teor de RAP, onde foram obtidas curvas granulométricas com os teores de 25, 50, 75 e 100% de RAP em relação a massa total da mistura asfáltica. Todas as faixas granulométricas desenvolvidas se encontraram nos limites normativos da faixa E do Superpave. As composições granulométricas das misturas estão apresentadas na Tabela 13 e demonstrada graficamente na Figura 25.

*Tabela 13 – Composições granulométricas.*

Peneira		Composição granulométrica (% passante)			
Nº	mm	25% RAP	50% RAP	75% RAP	100% RAP
1 1 / 2 “	38,1	100,00	100,00	100,00	100,00
1”	25,4	100,00	100,00	100,00	100,00
3 / 4 “	19,1	100,00	100,00	100,00	100,00
1 / 2 “	12,7	99,55	99,11	98,66	98,22
3 / 8 “	9,5	96,16	95,54	94,91	93,97
4	4,8	74,49	74,88	75,27	74,24
10	2,0	56,82	57,22	57,63	56,73
40	0,42	30,13	30,10	30,06	29,33
80	0,18	15,82	15,68	15,53	15,02
200	0,075	7,42	7,10	6,78	6,28

Fonte: Autor

Figura 25 – Composições granulométricas.



A densidade máxima medida (Gmm) foi determinada por meio do ensaio RICE TEST segundo a norma ASTM D 2041. A estimativa inicial do teor de ligante se baseou no teor apresentado na amostra com 100% de RAP, onde essa apresentou teor de ligante de aproximadamente  $5,5 \pm 0,1\%$ , sendo escolhido o valor base de 5,5% de ligante asfáltico. Em seguida, foram realizados ensaios de RICE TEST e caracterização volumétrica para análise das curvas granulométricas utilizadas nessa pesquisa. A Tabela 14 apresenta as características volumétricas no teor ótimo de projeto das misturas estudadas.

Tabela 14 – Características volumétricas.

Composição Granulométrica	25% RAP	50% RAP	75% RAP	100% RAP	Limites
Teor de Projeto (%)	5,50	5,50	5,50	5,50	-
Gmm (g/cm <sup>3</sup> )	2,434	2,449	2,459	2,465	-
Vv (%)	4,09	3,96	4,16	4,66	4
VAM (%)	13,88	12,91	14,73	14,36	> 11
RBV (%)	67,07	67,77	69,79	70,66	65 a 75

Fonte: Autor

Os teores analisados atendem as especificações técnicas para utilização em mistura asfáltica. Embora, o teor de 100% de RAP apresente um volume de vazios considerado elevado para a metodologia da dosagem Superpave, optou-se por manter essa composição com essas características. Nos demais teores ocorreu uma leve variação nos valores de volume de vazios, porém, essas variações apresentaram-se próximas do limite permitido, sendo possível então, definir um teor constante de 5,5% de ligante para todas as composições granulométricas.

Nessa pesquisa foi observada uma perda considerável de qualidade em corpos de prova com 100% de RAP, sem adição de agentes rejuvenescedores, como ilustrado nas Figura 26 (a) e (b), entretanto cerca de 75% apresentaram uma qualidade mínima aceitável.

Essa degradação foi significativamente diminuída com a adição dos agentes rejuvenescedores, tal qual apresentadas nas Figura 27 (a) e (b) imagens de corpos de provas aditivados com ADCAP WM, e nas Figura 28 (a) e (b) imagens de corpos de provas aditivados com óleo residual de motor.

Figura 26 – Corpo de prova com 100% RAP, vista frontal (a) e vista superior (b).



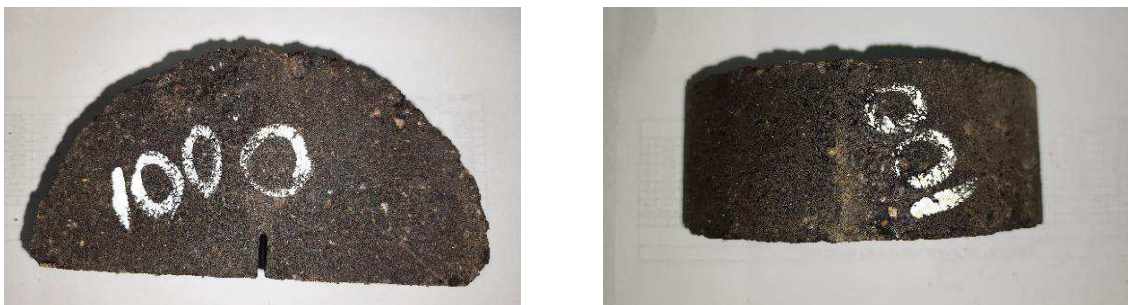
Fonte: Autor

Figura 27 – Corpo de prova com 100% RAP com ADCAP WM, vista frontal (a) e vista superior (b).



Fonte: Autor

Figura 28 – Corpo de prova com 100% RAP com óleo residual, vista frontal (a) e vista superior (b).

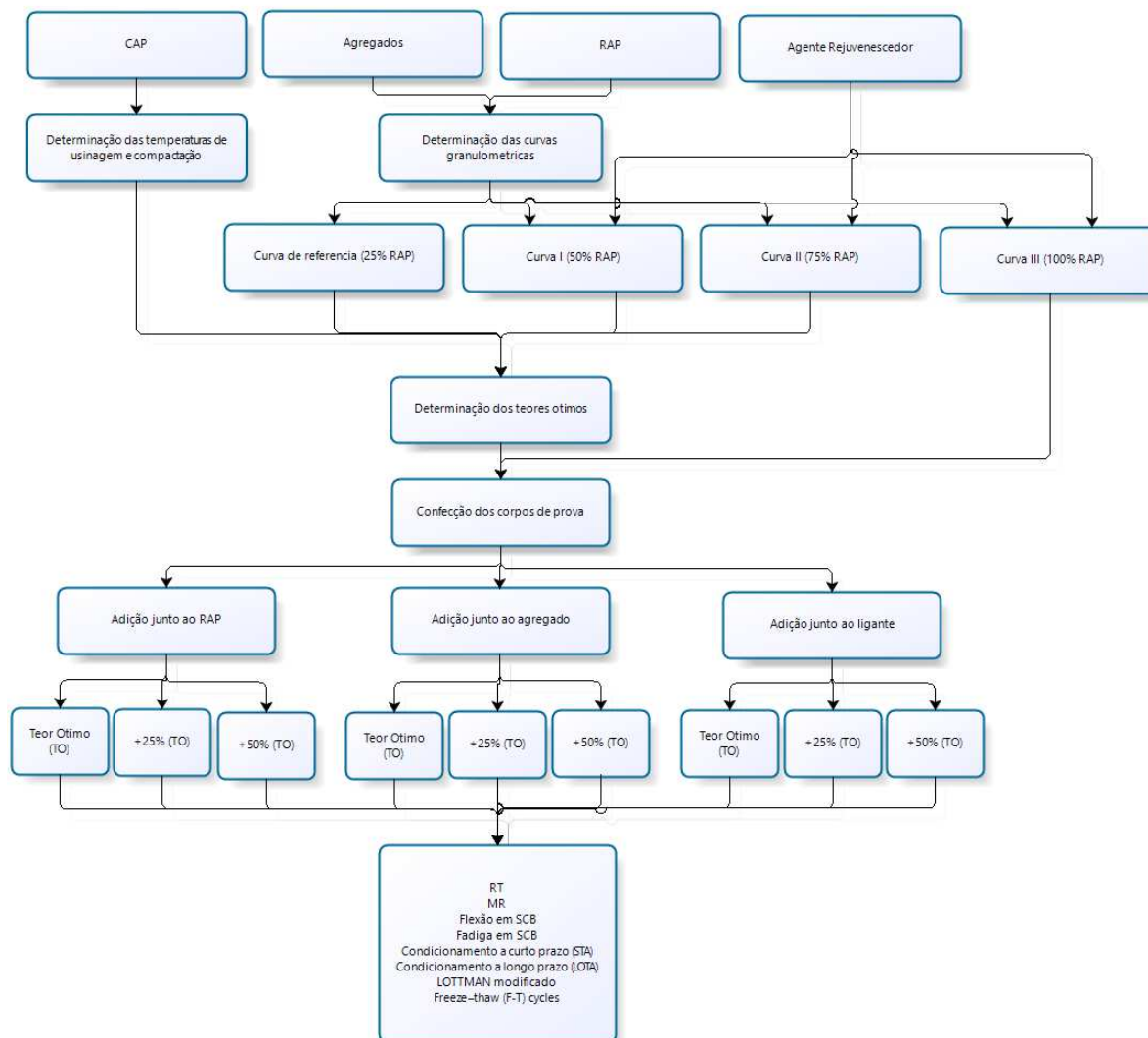


Fonte: Autor

### 3.3 Procedimentos experimentais

Os procedimentos experimentais seguiram o fluxograma demonstrado na Figura 29.

Figura 29 – Fluxograma dos ensaios mecânicos das misturas ensaiadas



As composições desenvolvidas nessa pesquisa foram produzidas adotando os teores de adição de RAP de 25%, 50%, 75% e 100%. A escolha do teor de 25% ocorre por representar um teor convencional de utilização de RAP, sendo muito usada em usinas nos Estados Unidos. Além disso, funcionará como ponto de referência, por fixar a variação que será encontrada com resultados observados na prática comercial. Os outros teores foram determinados por representar altos teores de adição de RAP e

que carecem de fundamentação teórica para verificação de sua viabilidade prática. Após determinadas as curvas granulométricas com as proporções desejadas foram moldados corpos de prova nos teores ótimos obtidos pelo método de dosagem Superpave, para a análise das propriedades mecânicas.

Outro ponto foco dessa tese é a análise da adição do agente de reciclagem em momentos distintos da fase da mistura. Foram realizadas adições diretamente no RAP, segundo recomendação comercial dos fornecedores de agentes de reciclagem; adições junto ao acréscimo de agregado; e adições junto ao ligante asfáltico. Tal análise se torna necessária pela falta de consenso na fase de adição do agente de reciclagem a mistura asfáltica, e que pode determinar a melhor configuração da usina, influenciando diretamente nos custos de execução de uma mistura asfáltica.

Além disso, deve-se ter atenção ao desgaste excessivo produzido durante a usinagem, tanto no RAP, como nos novos componentes adicionados na mistura reciclada. Pois, a mistura adicionada com RAP estará sujeita a temperaturas elevadas (devido a necessidade de ativação do ligante envelhecido) e essa exposição será prolongada (devido ao próprio processo de confecção de misturas recicladas).

Essa exposição prolongada a uma temperatura elevada pode resultar em um desgaste excessivo, comprometendo ainda mais o comportamento já fragilizado do ligante envelhecido. Além disso, pode comprometer o agente de reciclagem ou o novo ligante utilizado, afetando a integridade da mistura produzida. Para compreender o efeito dessa exposição prolongada nos agentes de reciclagem, foram produzidas misturas com teores de +25% e +50% de agente de reciclagem (em acréscimo ao teor ótimo do agente de reciclagem). Esse acréscimo tem o intuito de analisar se ocorre ou não perda ou volatilização nesses componentes na confecção da mistura asfáltica reciclada. As composições desenvolvidas nesse estudo serão nomeadas pelas abreviações descritas no Quadro 5.

Quadro 5 – Nomenclatura das amostras.

Abreviatura	Teor de RAP (%)	Agente de reciclagem (AR)	Teor do AR	Momento de adição do AR
100 P	100	-	-	-
75 P	75	-	-	-
50 P	50	-	-	-
25P	25	-	-	-
100 R O	100	ÓLEO RESIDUAL	TO*	RAP
100 R O+	100	ÓLEO RESIDUAL	TO* + 25%	RAP
100 R O++	100	ÓLEO RESIDUAL	TO* + 50%	RAP
75 L O	75	ÓLEO RESIDUAL	TO*	LIGANTE
75 L O+	75	ÓLEO RESIDUAL	TO* + 25%	LIGANTE
75 L O++	75	ÓLEO RESIDUAL	TO* + 50%	LIGANTE
75 R O	75	ÓLEO RESIDUAL	TO*	RAP
75 R O+	75	ÓLEO RESIDUAL	TO* + 25%	RAP
75 R O++	75	ÓLEO RESIDUAL	TO* + 50%	RAP
75 A O	75	ÓLEO RESIDUAL	TO*	AGREGADO
75 A O+	75	ÓLEO RESIDUAL	TO* + 25%	AGREGADO
75 A O++	75	ÓLEO RESIDUAL	TO* + 50%	AGREGADO
50 L O	50	ÓLEO RESIDUAL	TO*	LIGANTE
50 L O+	50	ÓLEO RESIDUAL	TO* + 25%	LIGANTE
50 L O++	50	ÓLEO RESIDUAL	TO* + 50%	LIGANTE
50 R O	50	ÓLEO RESIDUAL	TO*	RAP
50 R O+	50	ÓLEO RESIDUAL	TO* + 25%	RAP
50 R O++	50	ÓLEO RESIDUAL	TO* + 50%	RAP
50 A O	50	ÓLEO RESIDUAL	TO*	AGREGADO
50 A O+	50	ÓLEO RESIDUAL	TO* + 25%	AGREGADO
50 A O++	50	ÓLEO RESIDUAL	TO* + 50%	AGREGADO
100 R S	100	ADCAP WM	TO*	RAP
100 R S+	100	ADCAP WM	TO* + 25%	RAP
100 R S++	100	ADCAP WM	TO* + 50%	RAP



75 L S	75	ADCAP WM	TO*	LIGANTE
75 L S+	75	ADCAP WM	TO* + 25%	LIGANTE
75 L S++	75	ADCAP WM	TO* + 50%	LIGANTE
75 R S	75	ADCAP WM	TO*	RAP
75 R S+	75	ADCAP WM	TO* + 25%	RAP
75 R S++	75	ADCAP WM	TO* + 50%	RAP
75 A S	75	ADCAP WM	TO*	AGREGADO
75 A S+	75	ADCAP WM	TO* + 25%	AGREGADO
75 A S++	75	ADCAP WM	TO* + 50%	AGREGADO
50 L S	50	ADCAP WM	TO*	LIGANTE
50 L S+	50	ADCAP WM	TO* + 25%	LIGANTE
50 L S++	50	ADCAP WM	TO* + 50%	LIGANTE
50 R S	50	ADCAP WM	TO*	RAP
50 R S+	50	ADCAP WM	TO* + 25%	RAP
50 R S++	50	ADCAP WM	TO* + 50%	RAP
50 A S	50	ADCAP WM	TO*	AGREGADO
50 A S+	50	ADCAP WM	TO* + 25%	AGREGADO
50 A S++	50	ADCAP WM	TO* + 50%	AGREGADO

\*TO = Teor Ótimo.

Nesta pesquisa foram realizados os ensaios de resistência à tração por compressão diametral, módulo de resiliência, ensaio de fratura por flexão em amostra semicircular (semicircular bending, SCB) e ensaio de fadiga semicircular. Os corpos de prova cilíndricos e semicirculares foram condicionados quanto ao envelhecimento em curto e longo prazo (conditioning for short-term aging, STA, e effects of long term aging, LOTA, respectivamente) para realização de todos os ensaios citados anteriormente. Os corpos de prova cilíndricos foram condicionados em ciclos de gelo e degelo (freeze–thaw cycles, F-T) para realização do ensaio de LOTTMAN, bem como a análise estendida dos efeitos dos ciclos de gelo e degelo produzidos. A rotina de ensaios, apresentados na Figura 17, será repetida para os 2 agentes de reciclagem analisados nessa pesquisa.

### 3.3.1 Resistência à tração por compressão diametral

O ensaio de resistência a tração por compressão diametral, ou RT, determina a tensão máxima suportada pela mistura asfáltica antes da sua ruptura. Os procedimentos para realização desse ensaio seguiram a norma ABNT NBR 15087/12 e DNIT ME 136/10.

Rotineiramente, os CPs destinados ao ensaio apresentam alturas entre 55 a 70 mm e diâmetros de  $100 \pm 2$  mm, sendo ensaiados em um dispositivo centralizador adaptado do suporte tipo Lobo Carneiro e ensaiados na prensa mecânica. Com o valor da carga de ruptura (P) obtido, a RT foi calculada por meio da Equação 11.

$$RT = \frac{2P}{100\pi D H} \quad \text{Equação 11}$$

Onde:

RT = Resistência à tração, em MPa;

P = Carga de ruptura, em N;

D = Diâmetro do corpo de prova, em cm;

H = Altura do corpo de prova, em cm.

### 3.3.2 Módulo de resiliência

O ensaio de MR seguiu as normas ABNT NBR 16018/2011. Os ensaios foram realizados na prensa hidráulica UTM-25 da IPC. O procedimento consistiu na aplicação de uma carga a uma frequência de 60 ciclos por minuto (1Hz), com o tempo de aplicação de 0,10 segundo e, portanto, com 0,90 segundo de repouso ou descarregamento. Deve ser realizado um condicionamento de 50 ciclos, para posteriormente execução de ensaio. O deslocamento diametral recuperável na direção correspondente à tensão gerada foi medido por dois Linear Variable Differential Transformer (LVDT), posicionados no eixo horizontal. A tensão aplicada para a realização do ensaio foi correspondente a 10% da resistência à tração por compressão diametral para cada uma das misturas.

### **3.3.3 Ensaios em corpos de prova semicircular**

#### **3.3.3.1 Ensaio de fadiga semicircular**

O ensaio de fadiga foi realizado com tensão controlada, tendo em vista que é o mais fácil de executar, repetir e possui a menor duração, sendo assim, selecionado para avaliar o desempenho em fadiga de misturas RAP. Os corpos de provas ensaiados apresentaram diâmetros de  $150 \pm 2$  mm e espessura de  $50 \pm 2$  mm. A distância entre os apoios para realização do ensaio estará a uma distância de 127mm entre si, como apresentado na Figura 30. Além disso, no corpo de prova foi produzida uma ranhura de aproximadamente  $15 \pm 1$  mm, para direcionar o plano de ruptura. Os ensaios foram realizados na prensa hidráulica UTM-25 da IPC.

Os ensaios de fadiga foram realizados na temperatura de 25 °C, por se tratar da temperatura ambiente. Antes de iniciar os ensaios os corpos de provas foram condicionados por 4 hora nas temperaturas de ensaio.

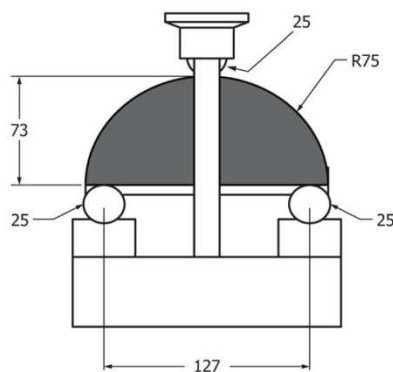
O carregamento foi realizado com a frequência de 10 Hz, que é aproximadamente igual à velocidade do veículo de 60-65 km/h, sem relaxação. Os carregamentos realizados nas amostras foram uma fração do carregamento máximo suportado pela mistura no ensaio de flexão. As taxas usadas de carregamento foram de até 50% da resistência máxima de flexão de corpos de prova semicirculares. O ensaio de fadiga foi considerado concluído quando a amostra ensaiada apresentar ruptura total.

#### **3.3.3.2 Ensaio de fratura por flexão em amostra semicircular**

O ensaio de fratura por flexão em amostra semicircular seguiu as normas AASHTO T 394-21 e BS EN 12697-44. Os corpos de prova ensaiados apresentam diâmetros de  $150 \pm 2$  mm e espessura de  $55 \pm 2$  mm. Assim a distância entre os apoios para realização do ensaio estará a uma distância de 127 mm entre si, como apresentado na Figura 30. Além disso, foi produzida uma ranhura de aproximadamente  $10 \pm 1$  mm, para direcionar o plano de ruptura. Os corpos de prova foram confeccionados de forma a apresentar volume de vazios aproximados de  $7 \pm 1\%$  e antes de iniciar os ensaios foram condicionados por 4 hora na temperatura de

ensaio. Os ensaios foram realizados na prensa hidráulica UTM-25 da IPC. O procedimento consistiu na aplicação de uma carga progressiva, com uma velocidade de deslocamento de  $0,50 \pm 0,01$  mm/segundo, até ruptura do CP.

Figura 30 – Esquema e acessório para o ensaio SCB.



Fonte: ASTM D8044 – 16

### 3.3.4 Condicionamento de misturas asfálticas ao envelhecimento

Nesta etapa foram realizados condicionamentos nos corpos de prova para simular o envelhecimento a curto e longo prazo das misturas asfálticas analisadas. Foi realizado na sequência os ensaios de flexão e fadiga em corpos de provas semicirculares. Os corpos de prova foram condicionados seguindo as instruções presentes na norma ASSHTO R 30-02.

#### 3.3.4.1 Conditioning for Short-Term Aging (STA)

O condicionamento de curto prazo para o procedimento de teste de propriedades mecânicas da mistura se aplica apenas à mistura solta preparada em laboratório e foi realizada da seguinte forma:

1. A mistura foi colocada em uma bandeja e espalhada, até uma espessura uniforme de no máximo 50 mm.
2. O conjunto permaneceu em estufa por  $4 \text{ h} \pm 5$  minutos a uma temperatura de  $135 \pm 3$  ° C.
3. A mistura foi revolvida a cada  $60 \pm 5$  minutos para manter um condicionamento uniforme.

Após essa etapa de condicionamento as misturas foram compactadas normalmente seguindo o método de compactação por amassamento.

#### **3.3.4.2 Conditioning for Long-Term Aging (LOTA)**

O condicionamento de mistura de longo prazo pode ser aplicado a amostras preparadas em laboratório após envelhecimento de curto prazo, para misturas asfálticas produzidas em usinas ou em amostras de pavimentos novos extraídos, quando necessário simular efeitos de envelhecimento de longo prazo. Geralmente, esta etapa de condicionamento é indicada quando as amostras serão testadas quanto às propriedades mecânicas, como fluência ou resistência à tração indireta.

Esse condicionamento consistiu na extensão do período de exposição da mistura asfáltica ao condicionamento de curto prazo. A norma AASHTO R 30-02 não especifica os intervalos de exposição das amostras. Porém a norma ASSHTO P 442, norma precedente da R 30-02, sugere intervalos de análise de 0, 1, 3 e 5 dias. Em decorrência da disponibilidade de equipamentos, nessa pesquisa foi utilizado o intervalo de 0, 3 e 5 dias. As amostras obtidas no intervalo 0, correspondem as amostras sem envelhecimento e com envelhecimento a curto prazo, como descrito anteriormente. As amostras após compactadas, ficaram expostas em estufas a temperatura de  $85 \pm 3$  °C, pelo período predeterminado.

#### **3.3.5 Condicionamento de gelo e degelo**

Foram realizados condicionamentos nos corpos de prova para simular ciclos de gelo e degelo nas misturas asfálticas analisadas, e na sequencia foi realizado o ensaio de resistência à tração por compressão diametral. Os corpos de prova foram condicionados seguindo as instruções presentes na norma ASSHTO T 283/14 e ASTM D4867.

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

O ensaio é normatizado pela AASHTO T 283/14 ou ASTM D 4867, sendo o teste para verificação da suscetibilidade à umidade de misturas asfálticas mais utilizado no Brasil e de uso disseminado internacionalmente. O critério de definição da

suscetibilidade de uma mistura asfáltica preconizado pela AASHTO T283/14 é de RRT  $\geq 70\%$ . Para o método SUPERPAVE o critério é de RRT  $\geq 80\%$ .

### **3.3.5.2 Condicionamento Freeze–thaw (F-T) cycles**

Esse condicionamento seguiu a metodologia indicada pelas normas AASHTO T 283/14 e ASTM D 4867. O procedimento é similar ao realizado no ensaio de LOTTMAN modificado, entretanto existe as realizações de vários ciclos de gelo e degelo. As normas anteriormente citadas não indicam a repetição de ciclos, porém como o intuito das análises é o efeito prolongado desse condicionamento, foram realizados alguns ciclos adicionais, seguindo o mesmo padrão. Foram realizados ensaios de tração por compressão diametral em amostras após 0, 1, 3 e 5 ciclos. As leituras obtidas das amostras de 0 e 1 ciclos correspondem aos resultados obtidos nos ensaios de Lottman modificado.

### **3.3.6 Análise estatística**

Para uma melhor interpretação dos dados coletados nessa pesquisa foram realizadas análises de variância (ANOVA) e teste Tukey

#### **3.3.6.1 Análises de variância (ANOVA)**

Análise da Variância (ANOVA) é um teste estatístico que visa verificar se existe uma diferença significativa entre várias médias provenientes de amostras distintas e se os fatores exercem influência no modelo. O método permite identificar fatores e interações mais significativos em termos do teste estatístico F de Snedecor. Na ANOVA o objetivo do teste é obter o valor de F calculado ( $F_{calc}$ ), dado pela Equação 12, e compara-lo ao F tabelado ( $F_{tab}$ ).

$$F_{cal} = \frac{QM}{QM_{erro}} \quad \text{Equação 12}$$

Onde: QM é quadrados médios, obtido através da equação 13;

QM erro é o erro dos quadrados médios.

$$QM = \frac{SQ}{GL} \quad \text{Equação 13}$$

Onde: SQ é a soma dos quadrados, obtido pela equação 14;

GL é o grau de liberdade.

$$SQ = \sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n} \quad \text{Equação 14}$$

Onde: x é o parâmetro observado;

n é o número de observações.

Se o  $F_{\text{calc}}$  for maior que o  $F_{\text{tab}}$ , para um dado nível de significância p (10% utilizado neste trabalho), então a hipótese é rejeitada, na hipótese inversa os dados apresentam significância para o modelo e, conseqüentemente o modelo é aceito. A probabilidade de se cometer um erro pode ser controlada pela seleção do nível de significância do teste de hipóteses (p), pois o nível de significância do teste é, na realidade, a probabilidade de se rejeitar ou aceitar a hipótese, quando ela é verdadeira, sendo então a probabilidade de se cometer um erro.

### 3.3.6.2 Comparações múltiplas, Teste Tukey

O teste Tukey é utilizado para testar todo e qualquer contraste entre duas médias, sendo uma ferramenta recomendada para comparar dois ou mais grupos. Esse teste também é conhecido como teste da diferença honestamente significativa (honestly significant difference - HSD) e teste da diferença totalmente significativa (wholly significant difference - WSD) (Mari, 2018). O teste de Tukey pode ser descrito como:

$$\Delta = q \frac{\sqrt{QMR}}{\sqrt{J}}$$

Onde: q é amplitude total estudada;

QMR é o desvio padrão residual do ensaio;

J é o número de repetições das médias confrontadas no contraste.

É usual a apresentação dos resultados de análises de comparações múltiplas através de uma exposição quantitativa por meio de matriz, como exemplificado na Tabela 15. Outra demonstração usual e resumida pode ser vista na Tabela 16, onde essa é uma análise visual das comparações, resumindo-se a apontar as variáveis similares ou não.

*Tabela 15 – Modelo de apresentação de resultados do teste Tukey.*

	VAR 1	VAR 2	VAR 3
VAR 1		0,032070	0,034467
VAR 2	0,032070		0,004300
VAR 3	0,005127	0,004197	

Fonte: Autor

*Tabela 16 – Modelo resumido de apresentação de resultados do teste Tukey.*

	1	2	4
VAR 1	****		
VAR 2		****	
VAR 3			****

Fonte: Autor

Ao analisar os exemplos apresentados nas Tabela 15 e Tabela 16 observa-se que, as variáveis que apresentam grau de significância satisfatória, em relação as demais, possuem também comportamento distinto. Dessa forma, a análise pelo modelo resumido torna mais expositivo onde ocorrem distinção entre as variáveis, enquanto que o método usual quantifica essa variação. Nas Tabela 17 e Tabela 18 estão apresentados exemplos de comportamento similares entre variáveis.

*Tabela 17 – Modelo de resultados do teste Tukey, comportamento similares.*

	VAR 1	VAR 2	VAR 3
VAR 1		0,932070	0,934467
VAR 2	0,732070		0,804300
VAR 3	0,805127	0,804197	0,829743

Fonte: Autor

*Tabela 18 – Modelo resumido de resultados do teste Tukey, comportamentos similares.*

	1
VAR 1	****
VAR 2	****
VAR 3	****

Fonte: Autor



## **4 RESULTADOS**

Neste capítulo são apresentados tópicos de análise dos resultados obtidos à partir da realização do quadro experimental dessa pesquisa. Para facilitar as análises os resultados obtidos foram organizados em três tópicos: ensaios padrão, ensaios condicionados de gelo-degelo e ensaios de resistência ao trincamento.

### **4.1 Ensaio padrões**

Nesse tópico são apresentados os resultados obtidos para os ensaios de resistência a tração por compressão diametral e os ensaios de módulo de resiliência. Os corpos de provas ensaiados nesse tópico foram condicionados quanto ao envelhecimento das misturas, apresentando as condições:

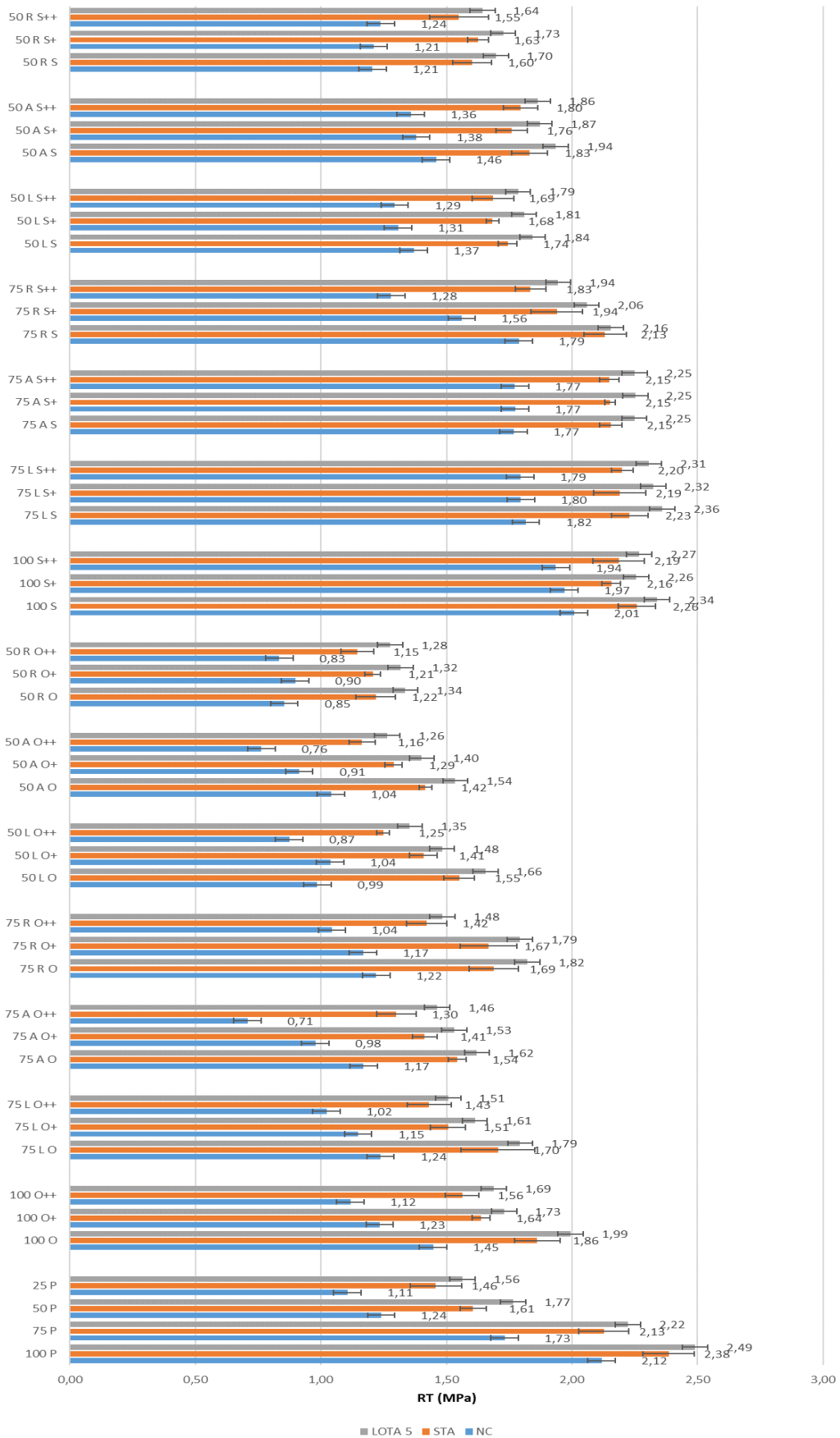
- não condicionado (NC)
- envelhecidos a curto prazo (STA)
- envelhecidos a longo prazo (LOTA)

O envelhecimento a longo prazo foi realizado para a condição de 5 dias a 85°C, que seria equivalente a um desgaste de 12 – 23 meses (Yin et al., 2017) ou 7 – 10 anos (AASHTO R30). Para facilitar as análises serão usadas as abreviações, para o condicionamento a longo prazo será utilizada a abreviação LOTA 5, para padronizar a condição de 5 dias.

#### **4.1.1 Resistência à tração por compressão diametral**

Os resultados gerais obtidos no ensaio de resistência a tração por compressão diametral podem ser visualizados na Figura 31. Os valores observados são referentes a média obtida por meio de 3 (três) corpos de prova ensaiados. Devido à elevada quantidade de resultados a serem discutidos, as análises foram divididas quanto ao agente de reciclagem.

Figura 31 – Ensaio de resistência a tração por compressão diametral.

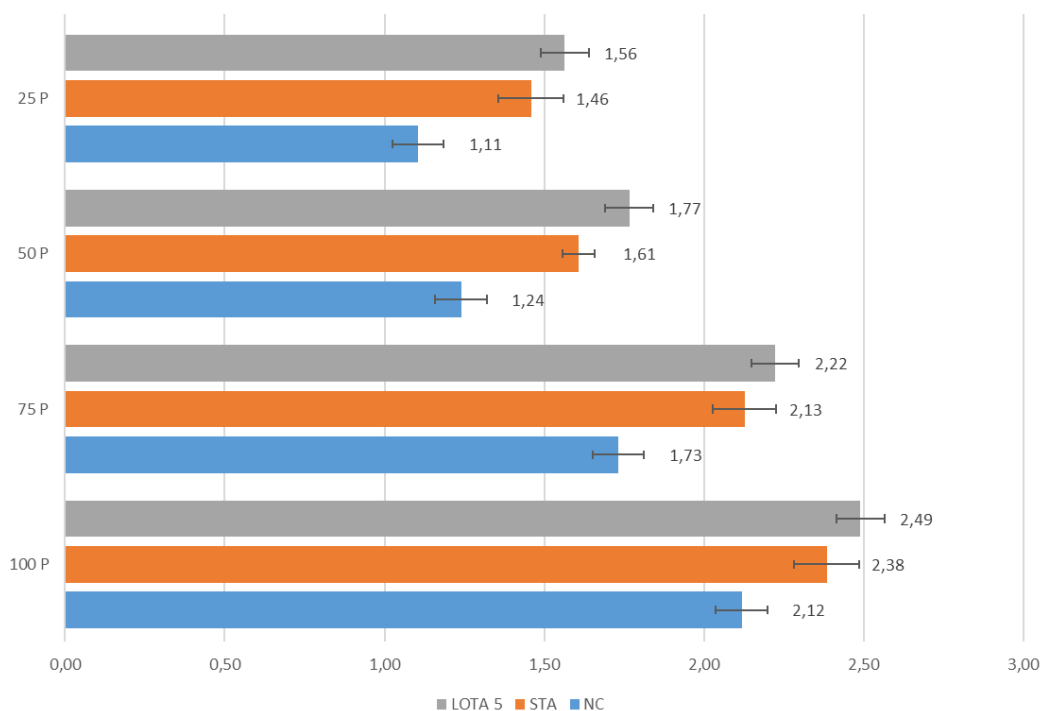


Ao analisar de forma superficial, os resultados presentes na Figura 31, é possível observar uma maior redução da resistência a tração das composições adicionadas com óleo residual de motor, se comparado com as não adicionadas ou as adicionadas com ADCAP WM. É possível observar a existência de tendências de aumento da resistência a tração com a realização do condicionamento de envelhecimento, redução da RT com a diminuição do teor de RAP e perda de RT com o aumento do teor do agente de reciclagem.

#### 4.1.1.1 Sem agente de reciclagem

A Figura 32 apresenta os resultados de resistência à tração por compressão diametral das amostras sem adição do agente de reciclagem, com e sem condicionamento ao envelhecimento. As normas DNIT 031/06 – ES e DNIT 033/21 - ES, que estabelecem as especificações técnicas de serviço para CBUQ para CAP convencional e concreto asfáltico reciclado em usina a quente, respectivamente, determinam que a RT mínima a ser obtida em uma mistura asfáltica deve ser maior que 0,65 MPa.

Figura 32 – Resistência a tração por compressão diametral sem AR.



Todas as misturas ensaiadas apresentaram resultados de resistência a tração por compressão diametral superior ao exigido na norma DNIT 031/06 – ES e DNIT 033/21 - ES, com e sem condicionamento ao envelhecimento. O acréscimo de teor de RAP proporcionou aumento na resistência à tração das misturas, onde o ganho de resistência a tração entre os teores extremos (25 P e 100 P) foi de, aproximadamente, 91%. Este fato evidencia um ganho de rigidez excessiva nas misturas com teores de 100% de RAP, fato muitas vezes indesejado por tornar as misturas quebradiças, ou frágeis. As amostras 50 P e 75 P, por sua vez, apresentaram ganhos de resistência a tração de, aproximadamente, 11,7 e 55,9%, respectivamente. Essa tendência já era esperada, tendo em vista que, diversos estudos com foco em misturas adicionadas com RAP apresentaram a mesma tendência (ZAUMANIS et al., 2013, 2016; KASSER, 2019; ARRUDA, 2021; entre outros).

Outra tendência observada nos resultados foi o aumento da resistência a tração quando as amostras foram condicionadas ao envelhecimento a curto prazo (STA) e longo prazo (LOTA 5). Tal tendência evidencia a efetividade dos processos de condicionamento ao envelhecimento realizados nessa pesquisa. Condição relevante no caso de misturas recicladas, pois muitas delas podem estar em zonas limites de utilização, o que inviabilizaria sua utilização como camadas de revestimento. Por se tratar de uma estimativa de desempenho futuro, a sua aplicação em dosagens de misturas asfálticas será fundamental para a realização de uma dosagem mais realista. Como será visto em análises posteriores, a realização do condicionamento pode ajudar na identificação de falhas prematuras de misturas recicladas.

Ao analisar os resultados apresentados na Figura 32 observa-se que as amostras condicionada STA apresentaram o menor desvio padrão entre as analisadas, no entanto acredita-se que seja uma condição do espaço amostral e não influenciada pelo efeito do condicionamento. As amostras apresentaram aumento de resistência a tração de, aproximadamente, 31,5 e 40,5% (STA e LOTA 5, respectivamente) para as amostras 25 P, e 29,8 e 42,7% (STA e LOTA 5, respectivamente) para as amostras 50 P. Os resultados obtidos das amostras 25 P e 50 P condicionadas ao envelhecimento apresentam valores próximos de resistência a tração de misturas do tipo 75 P sem condicionamento. Esse comportamento pode

indicar que o condicionamento produzido a essas composições são compatíveis a condição de envelhecimento da mistura 75 P.

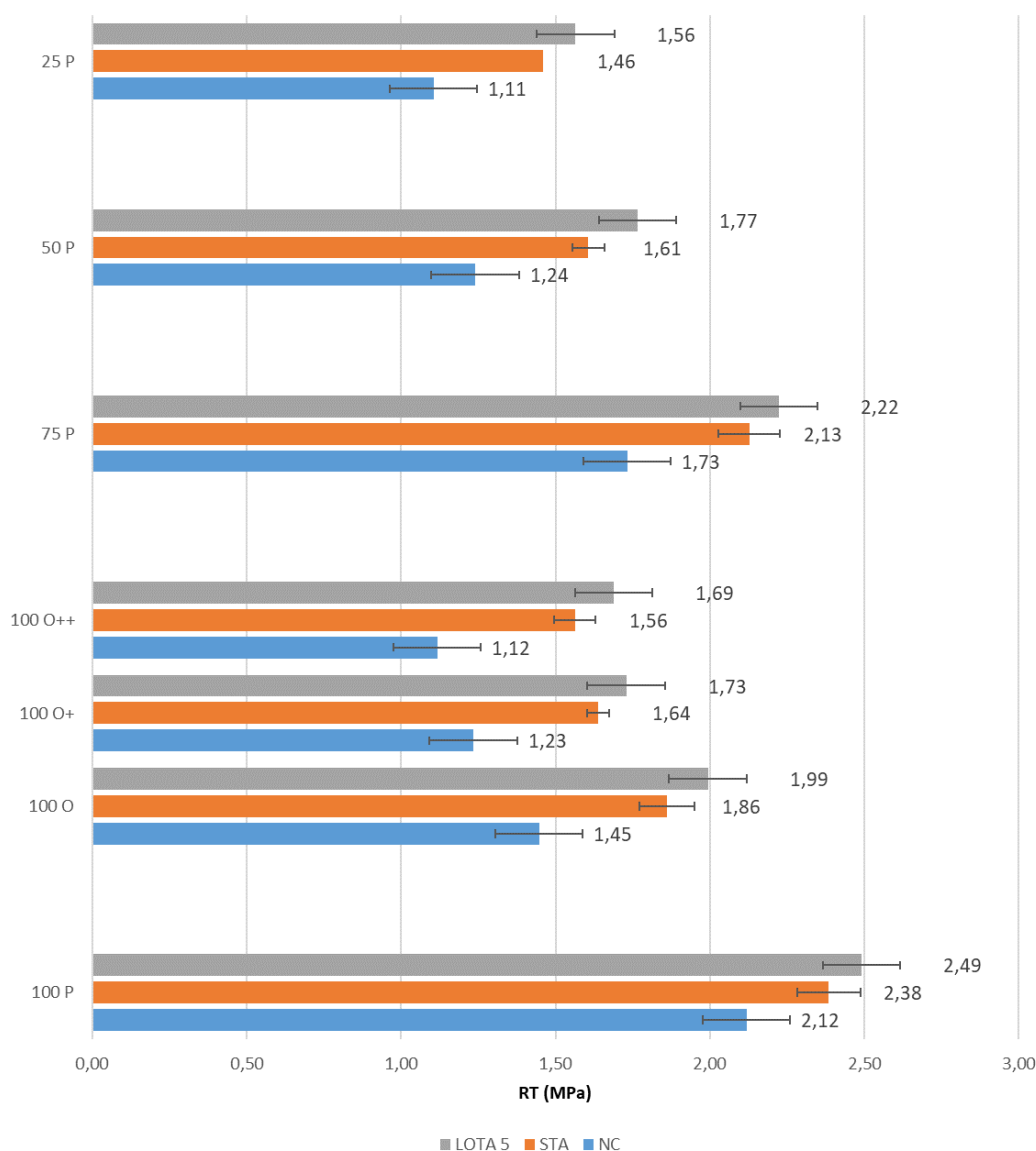
As amostras da mistura 100 P foram as que apresentaram as menores variações quanto ao condicionamento ao envelhecimento, sendo 12,2 e 17,5% (STA e LOTA 5, respectivamente). Já as amostras da mistura 75 P apresentaram ganhos de 23,2 e 28,3 (STA e LOTA 5, respectivamente), a menor diferença percentual entre os ganhos proporcionados pelos condicionamentos. Além disso, as amostras condicionadas da mistura 75 P, apresentaram resultados acima das amostras de mistura 100 P. Embora esse fato indique que as amostras de mistura 100 P não estejam completamente oxidadas, indica uma considerável fragilidade das misturas 75 P, estando estas misturas próximas do limite oxidativo após um período de vida útil de até 23 meses, segundo Yin et al. (2017).

A partir dos resultados obtidos de RT as composições 25 P e 50 P apresentaram desempenhos de resistência a tração próximas a amostras convencionais. Essas composições podem ser aplicáveis em pavimentos asfáltico, mesmo sem adição de agentes de reciclagem. Entretanto, estudos como Moghaddam e Baaj (2016), Lu et al. (2019), entre outros não recomendam misturas recicladas com teores acima de 25% de RAP sem acréscimo de AR. Para garantir de forma segura a viabilidade técnica dessas misturas recicladas, é necessária maior diversificação de ensaios e análises. As amostras 75 P e 100 P, para terem sua utilização recomendada, necessitariam de uma compatibilização de rigidez entre as camadas, do contrário, por apresentarem rigidez elevada elas seriam impróprias para o uso.

#### **4.1.1.2 Óleo residual de motor**

As Figura 33, Figura 34 e Figura 35 contém os resultados de resistência à tração das amostras com adição de óleo residual de motor, com e sem condicionamento ao envelhecimento.

Figura 33 – Resistência a tração (amostras 100% de RAP + óleo residual de motor).



Ao analisar a Figura 33, observa-se o efeito da adição nas amostras com 100% de RAP (100 O, 100 O + e 100 O ++), onde essas composições apresentam uma redução da resistência a tração, em relação a composição 100 P, de 31,6, 42,0 e 47,2%, respectivamente. O acréscimo acima do teor ótimo de óleo residual de motor resultou na diminuição da resistência a tração, onde, quanto maior foi o teor menor foi a resistência. É importante destacar que estas amostras foram as que apresentaram os maiores valores de redução quando comparadas a mistura de referência com a mesma proporção de RAP (para esse caso, 100 P). Observa-se, também, que a

redução produzida pelo acréscimo de óleo residual de motor aproximou os resultados obtidos das amostras com 100% de RAP a amostras com 25 a 50% de RAP.

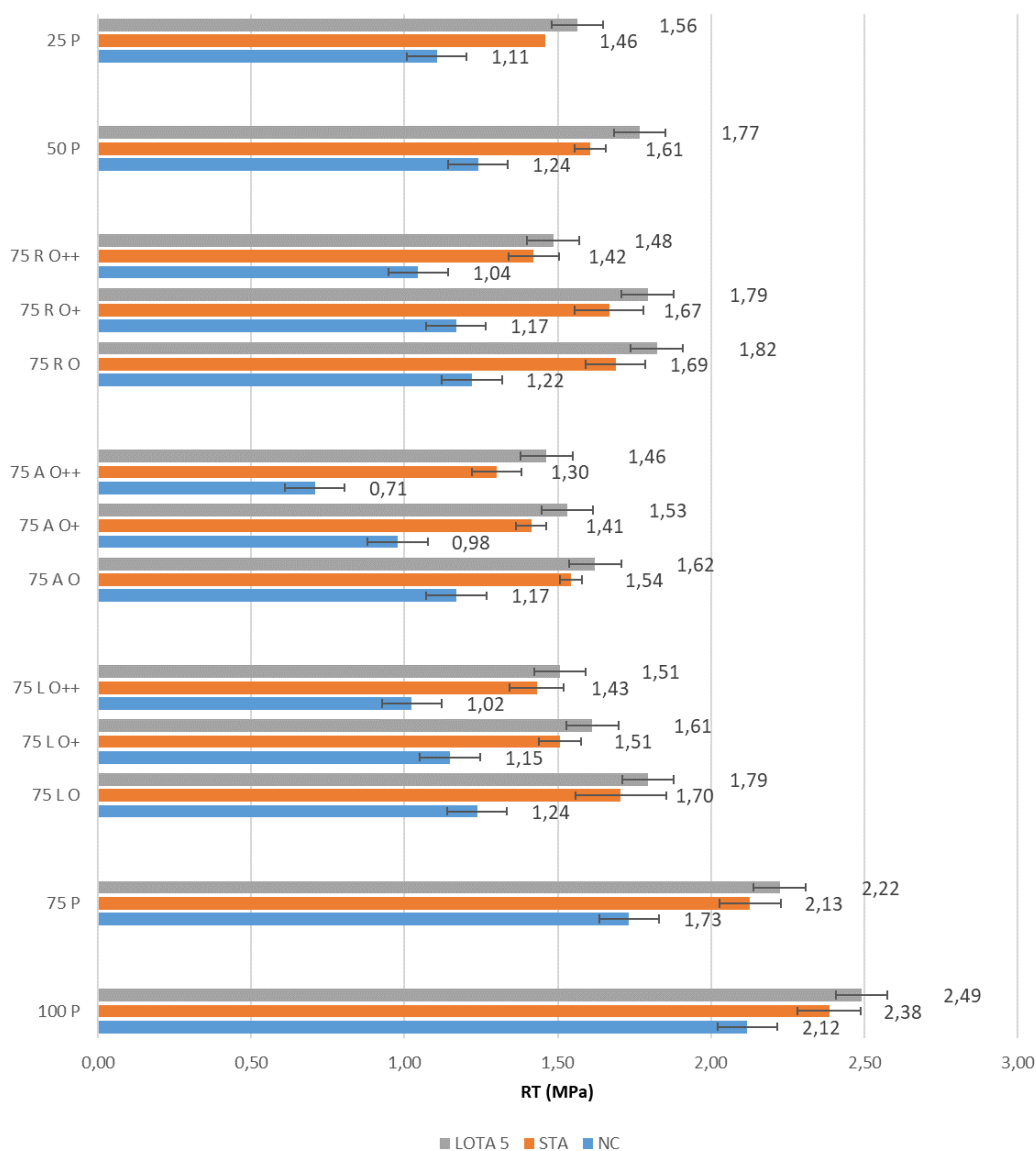
Ao analisar, unicamente, os resultados de resistência a tração é possível inferir que a aplicação do óleo residual de motor restituiu as propriedades das misturas a menores níveis de resistência. No ponto de vista ambiental, este é um comportamento desejável pois tornaria possível a utilização efetiva de todo o material extraído na reconstrução da própria via. Ao utilizar todo material fresado na confecção da nova via, é possível diminuir, significativamente, o gasto de matéria prima virgem e, conseqüentemente, reduzir consideravelmente os custos de execução do pavimento. Entretanto, deve-se expandir o quadro experimental para comprovação dessa hipótese.

Para as amostras com 100 O, 100 O + e 100 O ++, os aumentos de resistência a tração provocados pelo condicionamento ao envelhecimento variaram entre 30 a 40% no STA e 37 a 51% no LOTA 5. Observa-se que a realização do condicionamento ao envelhecimento apresentou uma variação no resultado de resistência à tração elevada. Este fato pode indicar que ocorre uma potencial volatilização do óleo residual de motor ou um desgaste excessivo do mesmo.

Ao analisar os resultados de condicionamento ao envelhecimento (LOTA 5), observa-se que as amostras 100 O apresentam comportamento similar a composição 100 P. Este fato indica que ao final da vida útil do pavimento, 12 – 23 meses (Yin et al., 2017) ou 7 – 10 anos (AASHTO R30), a mistura apresentará desempenho similar ao da mistura antes da intervenção. Já as amostras 100 O + e 100 O ++, apresentam comportamento próximo a composição 75 P. Para essas composições o pavimento poderá ter uma vida útil um pouco mais estendida. Entretanto, novamente é importante reafirmar a necessidade de maior quadro de análises para efetivar as hipóteses analisadas.

A Figura 34 contém os resultados de resistência à tração das amostras com adição de óleo residual de motor, com e sem condicionamento ao envelhecimento, para as composições com 75% de RAP. Para comparações e análises na Figura 34, também estarão apresentados os resultados das composições sem a adição do óleo residual de motor.

Figura 34 – Resistência a tração (amostras 75% de RAP + óleo residual de motor).



Os valores apresentados na Figura 34, referentes a resistência a tração das amostras com 75% de RAP, variaram de 0,71 a 1,24 MPa, portanto todos os resultados atendem ao exigido pela norma DNIT 031/06 – ES e DNIT 033/21 - ES, com e sem condicionamento ao envelhecimento. Embora com valores levemente diferentes, a amplitude dos intervalos foram relativamente próximos, 0,24 MPa para as amostras com 75% de RAP. Para as amostras com teores de 75% de RAP, a tendência observada de diminuição dos resultados de resistência a tração com o aumento da adição do óleo residual de motor, também foi observada. Além desta



tendência, é possível observar que o momento de adição não inferiu grandes benefícios na propriedade analisada, estando os resultados referentes a teores semelhantes de RAP próximos entre si, com a exceção das composições 75 A O + e 75 A O ++, que apresentaram os menores valores de resistência à tração.

Ao analisar os momentos de adição, observa-se que as composições com adição junto ao ligante (L) e junto ao RAP (R) apresentaram resultados similares com variação máxima de, aproximadamente, 2%. No caso da composição com adição junto ao agregado (A), observa-se que estas composições apresentaram as maiores reduções de RT. Ao avaliar os resultados obtidos e utilizando o momento de adição junto ao agregado como referência, observa-se as seguintes reduções de RT:

- para as composições com TO, ocorre variações de RT de aproximadamente 4,1% e 5,7%, quando comparadas para os momentos de adição R e L, respectivamente;
- para as composições com TO + 25%, as reduções de RT foram de 14,8% e 16,2%, quando comparadas para o momento de adição R e L, respectivamente;
- no caso das composições com TO + 50% as reduções de RT foram de 30,4% e 31,7%, quando comparadas para o momento de adição R e L, respectivamente.

As variações observadas podem corresponder a uma maior efetividade de ação de mistura, indicando uma maior eficácia na absorção do óleo residual de motor pelo ligante envelhecido, e assim uma redução da rigidez da mistura. Entretanto, essa redução pode indicar uma fragilidade da mistura, onde o óleo residual de motor pode comprometer a ligação ligante (envelhecido/novo) com o agregado.

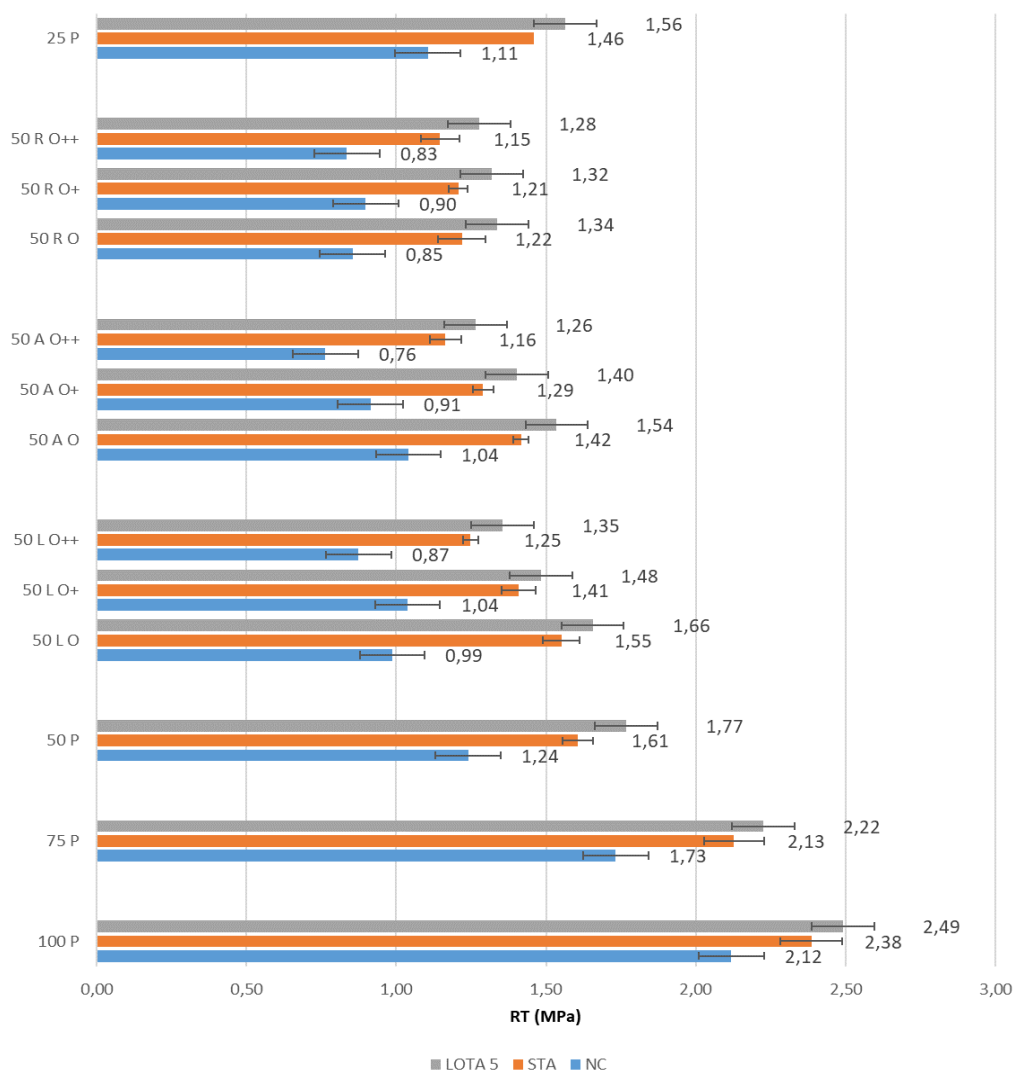
Ao analisar o condicionamento ao envelhecimento, STA e LOTA 5, observa-se uma tendência de aumento de rigidez com a realização do condicionamento. Na Tabela 19 estão apresentadas as variações observadas entre as composições com 75% de RAP não condicionadas e condicionadas ao envelhecimento, STA e LOTA 5.

Tabela 19 – Variação da RT entre amostras de 75% de RAP, em relação a NC.

Amostra	75 RO	75 RO+	75 RO++	75 AO	75 AO+	75 AO++	75 LO	75 LO+	75 LO++
STA	38,4	42,8	36,2	31,9	44,5	83,9	37,8	31,2	39,9
LOTA 5	49,5	53,5	42,2	38,7	56,7	106,8	44,9	40,4	47,2

As amostras apresentaram resultados em um intervalo de variações de 30 a 45% (STA) e 40 a 57% (LOTA 5), com as exceções da composição 75 A O++, retratando o dobro da variação observada nas demais amostras. Essa elevada variação indica que, possivelmente, exista uma volatilização excessiva do óleo residual de motor.

Figura 35 – Resistência a tração (amostras 50% de RAP + óleo residual de motor).



Para os resultados das amostras com teores de 50% de RAP (Figura 35), a tendência observada de diminuição dos resultados de resistência a tração com o aumento da adição do óleo residual de motor, também foi observada. Com apenas duas exceções, as amostras 50 L O + e 50 R O +, porém ambas as amostras possuem um desvio padrão elevado, e muito provavelmente deve ser um erro pontual, passível de reanálise. Além da tendência anteriormente mencionada, é possível observar que o momento de adição não resultou em benefícios na propriedade analisada, estando os resultados referentes a teores semelhantes de AR próximos entre si. Essa análise pode ser estendida as amostras condicionadas ao envelhecimento, STA e LOTA 5.

Os valores apresentados de resistência a tração das amostras com 50% de RAP apresentaram valores variando de 0,75 a 1,04 MPa. Embora com valores levemente diferentes, a amplitude dos intervalos foram relativamente próximos, de aproximadamente 0,29 MPa. Na Tabela 20 estão apresentadas as variações observadas entre amostras não condicionadas e condicionadas ao envelhecimento, STA e LOTA 5.

*Tabela 20 – Variação da RT entre amostras de 50% de RAP, em relação a NC.*

Amostra									
Varição (%)	50 RO	50 RO+	50 RO++	50 AO	50 AO+	50 AO++	50 LO	50 LO+	50 LO++
STA	42,7	34,4	37,3	36,1	41,1	50,4	57,2	35,7	42,9
LOTA 5	56,4	46,8	53,0	47,6	53,4	60,6	67,8	42,9	55,0

As amostras apresentaram resultados em um intervalo de variações de 34 a 50% (STA) e 40 a 60% (LOTA 5), com as exceções das amostras 50 L O. Como observado anteriormente, a amostra 50 L O +, destoava da tendência observada, entretanto ao observar a variação da RT quanto ao condicionamento da amostra a mesma se encontra dentro do intervalo médio das demais amostras. Entretanto, a amostra imediatamente abaixo dela (50 L O) apresentou uma variação elevada, o que, possivelmente, demonstra que o resultado da amostra 50 L O+ está correto. Portanto, o valor observado para a amostra 50 L O deverá ser reanalisado, bem como os resultados da amostra 75 A O ++.

Assim como no tópico anterior, todas as misturas ensaiadas apresentaram resultados de resistência a tração por compressão diametral acima do exigido na norma DNIT 031/06 – ES e DNIT 033/21 - ES, com e sem condicionamento ao envelhecimento. A adição de óleo residual de motor resultou em uma diminuição considerável da resistência a tração das amostras ensaiadas, conseqüentemente da rigidez das amostras. Observa-se, também, uma tendência de diminuição da resistência a tração com o aumento do teor de óleo residual de motor adicionado. As amostras com adições de AR com 50% a mais do teor ótimo apresentaram os menores resultados, se comparadas as demais composições.

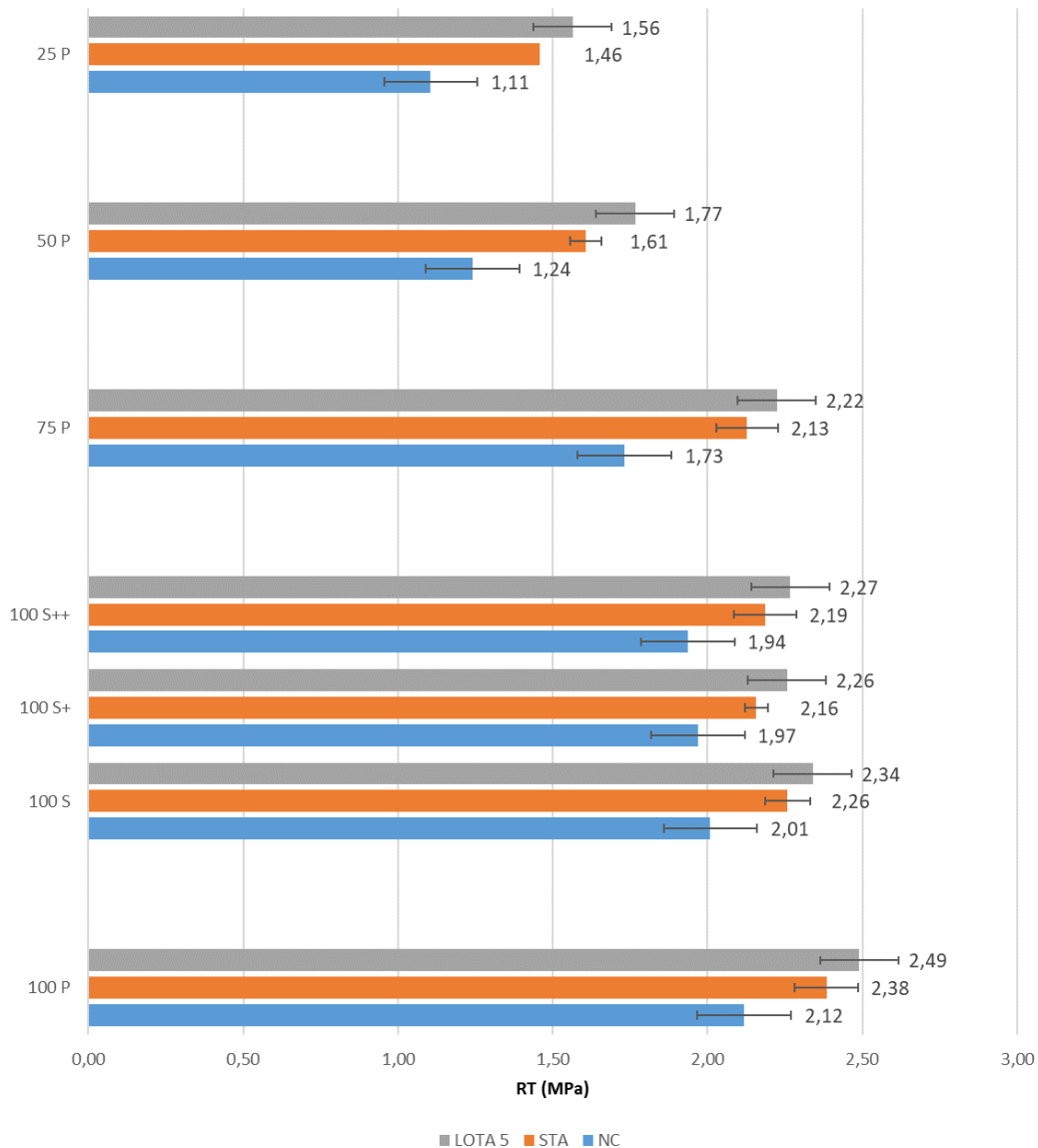
Esse comportamento também foi observado nos estudos de Mamun e Al-Abdul Wahhab (2018). Eles analisaram misturas com até 50% de RAP adicionadas com óleo residual de motor nos teores de 7, 13 e 20%. Em seus estudos, os autores encontraram resultados de resistência a tração, para as misturas modificadas com óleo residual de motor, entre 0,6 a 0,8 MPa, resultados próximos aos encontrados nessa pesquisa. Outros estudos, porém, com outros aditivos, mas classificados com AR orgânicos também, apresentaram a mesma tendência de comportamento (Patrick e Umesh, 2015; Nabizadeh et al., 2017; Leng et al., 2018; entre outros).

A partir dos resultados obtidos de RT para as amostras modificadas com óleo residual de motor, é possível supor que, todas as composições analisadas são aplicáveis em pavimentos asfálticos. As misturas que contem 100% de RAP tiveram sua resistência significativamente reduzida pela ação do óleo residual de motor. Embora os valores obtidos de resistência a tração estejam acima do mínimo exigido em norma, essa redução de rigidez pode ser proveniente de um comprometimento da interação e aderência do RAP. Entretanto, pode ser uma característica obtida pelo rejuvenescimento do ligante envelhecido do RAP pelo óleo residual de motor. Assim, recomenda-se uma maior diversificação de ensaios e análises, para garantir que as características observadas realmente correspondam ao rejuvenescimento do ligante envelhecido.

### 4.1.1.3 ADCAP WM

As Figura 36, Figura 37 e Figura 38 contém os resultados de resistência à tração por compressão diametral das amostras com adição de ADCAP WM, com e sem condicionamento ao envelhecimento.

Figura 36 – Resistência a tração (amostras 100% de RAP + ADCAP WM).

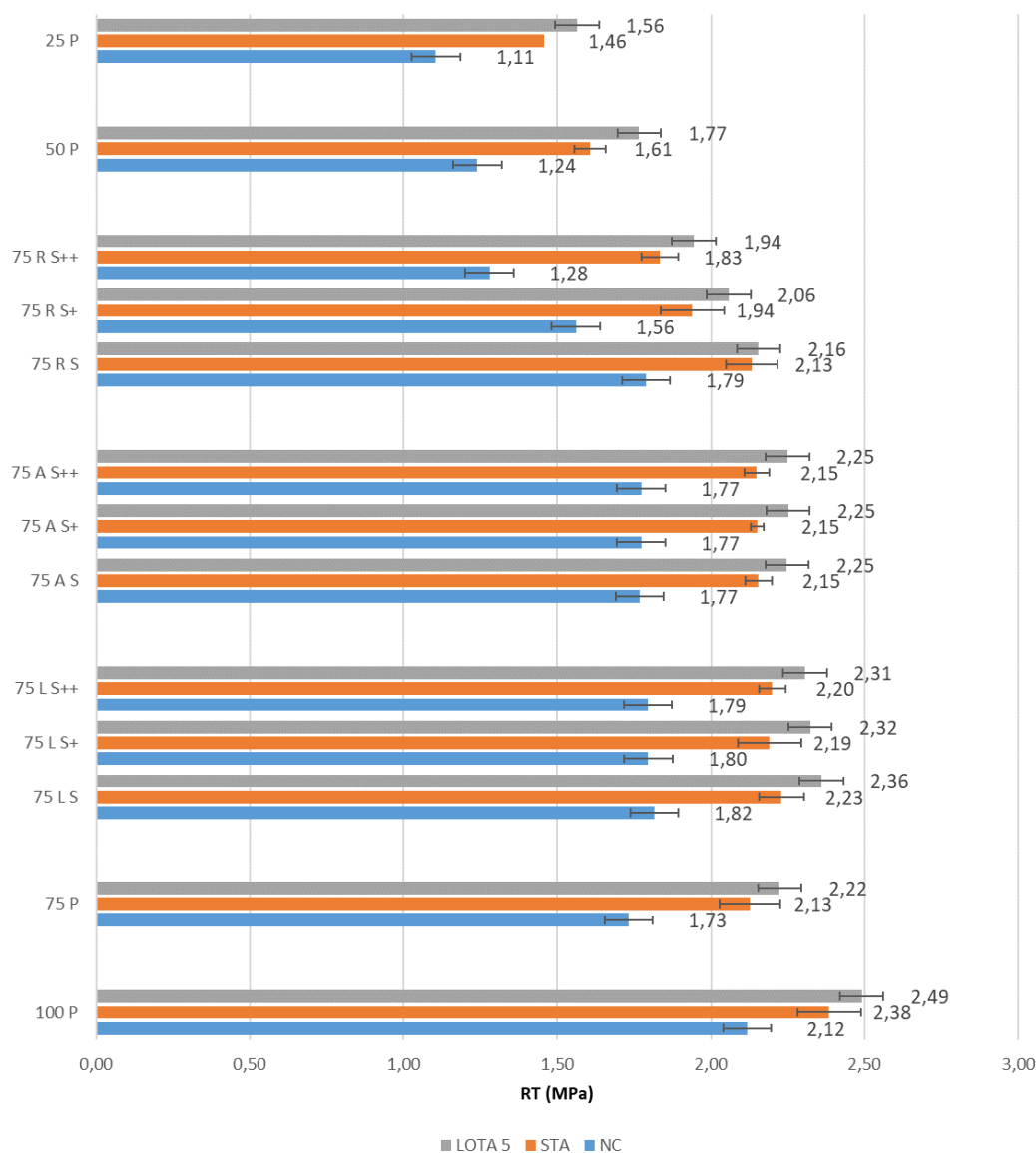


Ao analisar a Figura 36 observa-se o efeito da adição nas amostras com 100% de RAP (100 S, 100 S+ e 100 S++), onde essas composições apresentam uma redução de resistência a tração de 5,5, 7,6 e 10,9%, respectivamente. Estas amostras

foram as únicas que apresentaram reduções de valores de resistência a tração quando comparadas a mistura de referência com a mesma proporção de RAP (para esse caso, 100 P). Entretanto, essas reduções apresentadas, pelas amostras em questão, não foram significativas e ficam dentro dos limites do desvio padrão das amostras de referência.

Para as amostras com 100 S, 100 S+ e 100 S++, os aumentos de resistência a tração provocados pelo condicionamento ao envelhecimento foram de 11% no STA e variaram de 14 a 17% no LOTA 5. Com esses resultados, é possível verificar que, os procedimentos de envelhecimento causaram menos abatimento que se comparado as amostras modificadas com óleo residual de motor. Essa baixa variação pode ser devido a composição de 100% de RAP já apresentar um desgaste significativo e a adição do ADCAP WM, não apresentar eficiência no rejuvenescimento da amostra. Assim como, essas composições apresentarem uma pequena resistência ao envelhecimento. É importante ressaltar que as composições condicionadas ao envelhecimento (LOTA 5) apresentaram resultados similares a composição 100 P condicionada ao envelhecimento (STA). Esse fato pode corroborar com a hipótese de resistência ao envelhecimento, anteriormente sugerida, porém, novamente é necessária mais análises para confirmação da hipótese.

Figura 37 – Resistência a tração (amostras 75% de RAP + ADCAP WM).



Para as amostras com teores de 75% de RAP, a tendência observada divergiu do esperado pois ocorreu um leve acréscimo de resistência a tração se comparado ao teor sem ADCAP WM. Com apenas duas exceções, as amostras 75 R S+ e 75 R S ++, que apresentaram resultados abaixo da amostra 75 R S, destoando da tendência observada. Entretanto, esse comportamento pode ser decorrente de erros de execução nas etapas de mistura ou compactação dos CPs e, sendo assim, é importante observar se a mesma tendência se repete em outros ensaios.

A variação quanto ao momento de adição do AR não resultou em variação significativa nos resultados de resistência a tração, bem como, não houve alterações nesse parâmetro quanto ao acréscimo do teor de AR. Essa análise pode ser estendida as amostras condicionadas ao envelhecimento, tanto STA como LOTA 5.

Os valores apresentados de resistência a tração das amostras com 75% de RAP variaram de 1,77 a 1,82 MPa, estando de 0,04 a 0,19 MPa acima da amostra de referência pontual (75 P), diferenças relativamente baixas. Foram observadas como exceções as amostras 75 R S + e 75 R S ++, já mencionadas e bem abaixo da média geral. A amplitude dos intervalos foram relativamente próximos, 0,05 MPa para as amostras com 75% de RAP. Na Tabela 21 estão apresentadas as variações observadas entre amostras não condicionadas e condicionadas ao envelhecimento, STA e LOTA 5.

*Tabela 21 – Variação da RT entre amostras de 75% de RAP, em relação a NC.*

Amostra									
Varição (%)	75 RS	75 RS+	75 RS++	75 AS	75 AS+	75 AS++	75 LS	75 LS+	75 LS++
STA	19,2	24,3	43,3	21,9	21,3	21,2	22,8	22,0	22,6
LOTA 5	20,5	31,9	51,9	27,1	27,0	26,9	30,0	29,4	28,5

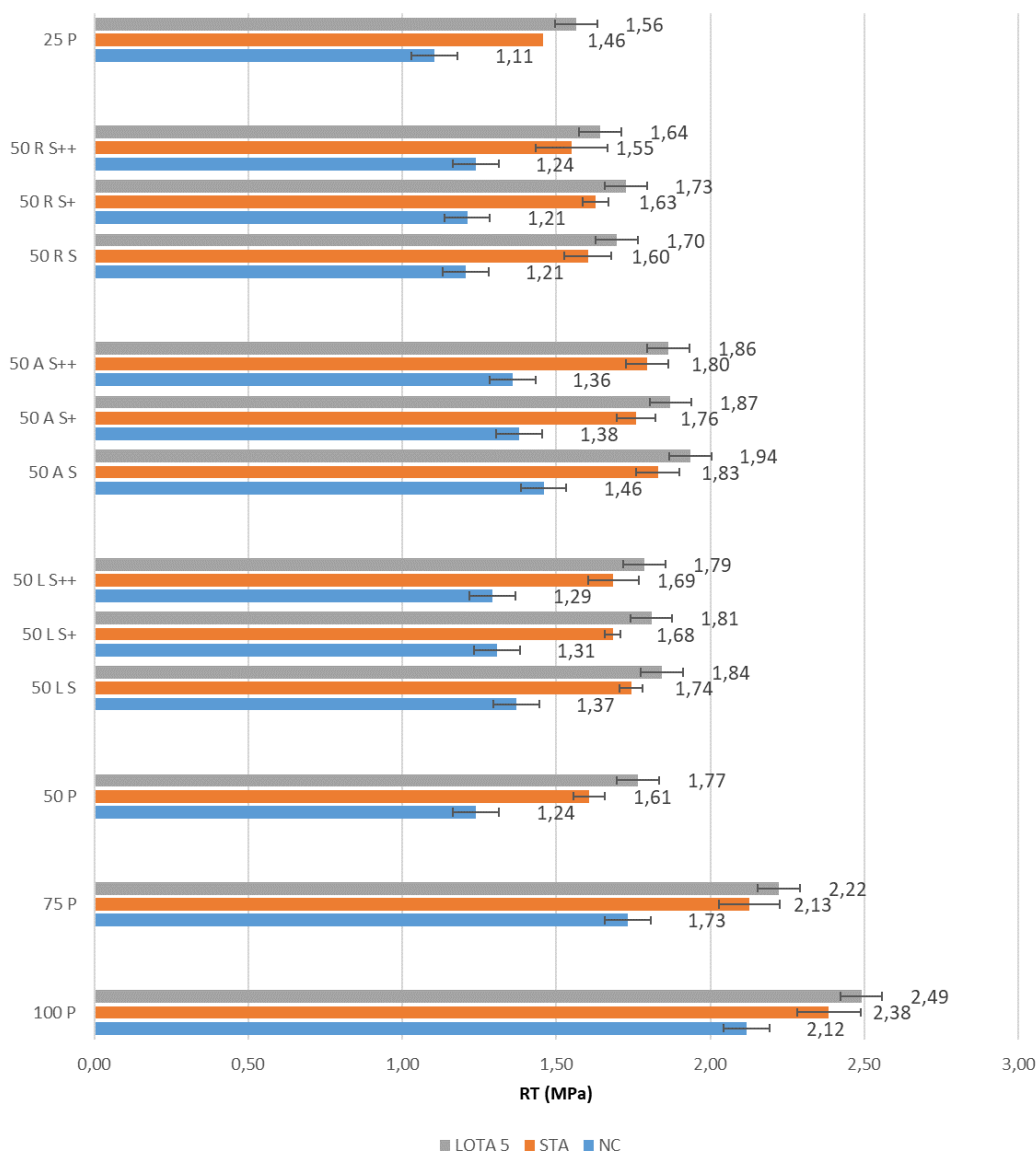
As amostras apresentaram resultados em um intervalo de variações de 19 a 25% (STA) e 20 a 32% (LOTA 5), com as exceções das amostras 75 R S e 75 R S++. Ao comparar com o intervalo das variações obtidas para as composições de 75% de RAP com adição de óleo residual de motor, o intervalo para as composições com ADCAP WM são bem menores, praticamente metade da observada com óleo residual de motor.

Como observado anteriormente, a amostra 75 R S++ destoa da tendência observada, apresentando uma variação significativa de resistência a tração condicionados ao envelhecimento, se quando comparado com os teores com a mesma configuração e menor acréscimo de ADCAP WM. Esse resultado indica a necessidade de reanálise das amostras desta configuração. Já no caso das amostras



75 R S, o condicionamento ao envelhecimento LOTA 5, não foi tão efetivo quanto esperado.

Figura 38 – Resistência a tração (amostras 50% de RAP + ADCAP WM).



Os valores apresentados de resistência a tração das amostras com 50% de RAP, apresentaram valores de resistência a tração variando de 1,21 a 1,46 MPa e máxima diferença observada com relação a amostra de referência (para esse caso, 50 P) é de 0,22 MPa, diferença essa insignificante. Embora com valores levemente diferentes, a amplitude dos intervalos foram relativamente próximos, 0,25 MPa para as amostras com 50% de RAP. De forma similar a observada nas composições com

75% de RAP com ADCAP WM, as amostras com teores de 50% de RAP, apresentaram um leve acréscimo de resistência a tração se comparado ao teor sem ADCAP WM.

Além disso, a variação quanto ao momento de adição do AR não resultou em variação significativa nos resultados de resistência a tração, bem como, não houve alterações significativas nesse parâmetro quanto ao acréscimo do teor de AR. Essa análise pode ser estendida as amostras condicionadas ao envelhecimento, tanto STA como LOTA 5. Nas Tabela 22 estão apresentadas as variações observadas entre amostras não condicionadas e condicionadas ao envelhecimento, STA e LOTA 5.

*Tabela 22 – Variação da RT entre amostras de 50% de RAP, em relação a NC.*

Amostra									
Varição (%)	50 RS	50 RS+	50 RS++	50 AS	50 AS+	50 AS++	50 LS	50 LS+	50 LS++
STA	33,0	34,0	25,2	25,4	27,5	32,3	27,3	28,7	30,3
LOTA 5	40,7	40,6	32,7	32,6	35,6	37,3	34,5	38,3	38,0

As amostras apresentaram resultados em um intervalo de variações de 25 a 34% (STA) e 32 a 40% (LOTA 5). Observa-se por esses resultados que a eficiência do condicionamento foi próxima em todas composições. Assim como foi observado nas composições com 75% de RAP adicionada com ADCAP WM, as composições com 50% de RAP com ADCAP WM apresentaram uma variação significativamente menor que se comparado com as composições com 50% de RAP com óleo residual de motor. Esses valores de variação relativamente baixos podem indicar uma resistência ao envelhecimento produzida pela adição do ADCAP WM.

Assim como nos tópicos anteriores, todas as misturas ensaiadas apresentaram resultados de resistência a tração por compressão diametral acima do exigido na norma DNIT 031/06 – ES e DNIT 033/21 - ES, com e sem condicionamento ao envelhecimento. Entretanto, ao contrário do que ocorreu com as misturas com adição de óleo residual de motor, as amostras modificadas com o agente surfactante (ADCAP WM) não apresentaram redução da resistência a tração.

De uma forma geral, a adição, e consequentes acréscimos, do ADCAP WM nas amostras ensaiadas não resultaram em alterações significativas nas propriedades, mantendo os resultados próximos das amostras com teores de RAP similares com e sem adição do ADCAP WM. Os resultados obtidos de resistência a tração, põe em dúvida a efetividade da utilização da ADCAP WM em misturas recicladas. Pois, as composições modificadas não apresentaram mudanças significativas, entretanto, devem-se realizar mais análises ante da rejeição, ou mesmo aceitação, da utilização do AR em questão.

A maioria dos estudos analisados para desenvolvimento dessa tese demonstram tendências de redução da resistência a tração com o acréscimo de AR surfactantes (Lu e Saleh, 2016; Omranian et al., 2018; Lu et al., 2019; entre outros). Entretanto, alguns outros indicam comportamentos similares ao obtidos nessa pesquisa, como: Yu et al. (2012), que identificaram apenas uma ligeira diminuição dessa propriedade em misturas de asfalto poroso contendo RAP adicionadas com um agente surfactante; Yousefi et al. (2021), que identificaram um ligeiro aumento da resistência a tração em misturas com adição de alguns ARs surfactantes (PAWMA, Kaowax, Sasobite e Zeolite); entre outros.

A partir dos resultados obtidos de RT para as amostras modificadas com ADCAP WM, é possível supor que, as composições com o ADCAP WM e teores de 50% de RAP são aplicáveis em pavimentos asfálticos. Entretanto, as composições com o ADCA WM e teores de 75% de RAP, não devem ser descartadas as suas possibilidades de uso, entretanto, convém uma análise mais aprofundada dessas composições. Embora as composições com 100% de RAP e adicionadas com ADCAP WM tenham a rigidez reduzida, as mesmas ainda se apresentam com rigidez consideravelmente elevada para ter sua utilização recomendada.

Nas Tabela 23, Tabela 24 e Tabela 25 são mostradas as análises de variância (ANOVA) para os ensaios de RT. Nelas estão demonstradas as variáveis:  $R^2$  é o poder de explicação do modelo (%), SS é a soma dos quadrados, GL é o grau de liberdade, MS se refere aos quadrados médios ANOVA, F é a significância global do modelo e o valor de P (100-P) é a confiança do modelo. No ensaio de Resistência à Tração por compressão diametral o nível do coeficiente de determinação é de 10%.

Tabela 23 – ANOVA Resistencia a tração por compressão diametral amostras NC

ANOVA – R <sup>2</sup> = 0,909389					
FATOR	SS	GL	MS	F	p
TEOR	2,032392	3	0,677464	41,2218725	0,000000
AR	3,314439	5	0,662888	40,3349428	0,000000
MOMENTO	0,097643	2	0,048822	2,97066106	0,064708
ERRO	0,558776	34	0,016435		

Tabela 24 – ANOVA Resistencia a tração por compressão diametral amostras STA

ANOVA – R <sup>2</sup> = 0,893731					
FATOR	SS	GL	MS	F	p
TEOR	1,777821	3	0,592607	37,4826284	0,000000
AR	2,559474	5	0,511895	32,3775451	0,000000
MOMENTO	0,208757	2	0,104379	6,60199588	0,003780
ERRO	0,537546	34	0,015810		

Tabela 25 – ANOVA Resistencia a tração por compressão diametral amostras LOTA 5

ANOVA – R <sup>2</sup> = 0,934266					
FATOR	SS	GL	MS	F	p
TEOR	1,936725	3	0,645575	64,2446969	0,000000
AR	2,739916	5	0,547983	54,5328156	0,000000
MOMENTO	0,120421	2	0,060211	5,99188757	0,005900
ERRO	0,341655	34	0,010049		

Ao analisar os resultados de p, presentes nas tabelas, é possível afirmar que as composições apresentaram comportamento significativamente diferentes quanto aos parâmetros observados. Este fato mostra que é possível prever o comportamento desta variável (RT) por meio dos teores de RAP, tipo de AR e momento de adição do AR separadamente, pois a interação desses fatores não é significativa para o modelo. Esse comportamento é observado em todas as etapas de condicionamento, mantendo um R<sup>2</sup> relevante. Observa-se que, pela análise do grau de liberdade, será possível observar a quantidade de grupos, ou variáveis, que apresentam comportamentos distintos entre si.

Para uma análise complementar, a ANOVA, foi realizado por meio da utilização do teste de comparação múltipla, o teste Tukey. Os resultados obtidos nessa nova análise estão expostos nas Tabela 26, Tabela 27 e Tabela 28. Devido ao fato que, as

três condições de condicionamento produzirem resultados no teste Tukey idênticos, as análises para esse teste podem ser estendidas as demais variáveis de condicionamento.

Tabela 26 – Teste Tukey para a componente teor de RAP (RT).

Tukey teste; variável rt			
Grupos homogêneos, alpha = ,05000			
Erro: entre MS = ,01005, df = 34,000			
TEOR	1	2	3
25	****		
50	****		
75		****	
100			****

Ao realizar o teste Tukey é factível identificar como as variáveis ajustaram-se entre si, e ao analisar os resultados expostos na Tabela 26, é possível determinar que as variáveis com teor 25 e 50 apresentam comportamentos similares, enquanto que as demais diferem.

Tabela 27 – Teste Tukey para a componente agente de reciclagem (RT).

Tukey teste; variável rt			
Grupos homogêneos, alpha = ,05000			
Erro: entre MS = ,01005, df = 34,000			
AR	1	2	3
O++			****
O+		****	
O		****	
S++	****		
P*	****		
S+	****		
S	****		

\*Composição sem adições de AR

Ao analisar os resultados da Tabela 27, observa-se a formação de três grupos: o grupo O++ foi o único que apresentou comportamento dessa propriedade de forma isolada; os grupos O+ e O são similares entre si e distintos entre os outros; e os grupos S, S +, S++ e P similares entre si, e distintos anteriormente.

Tabela 28 – Teste Tukey para a componente momento de adição (RT).

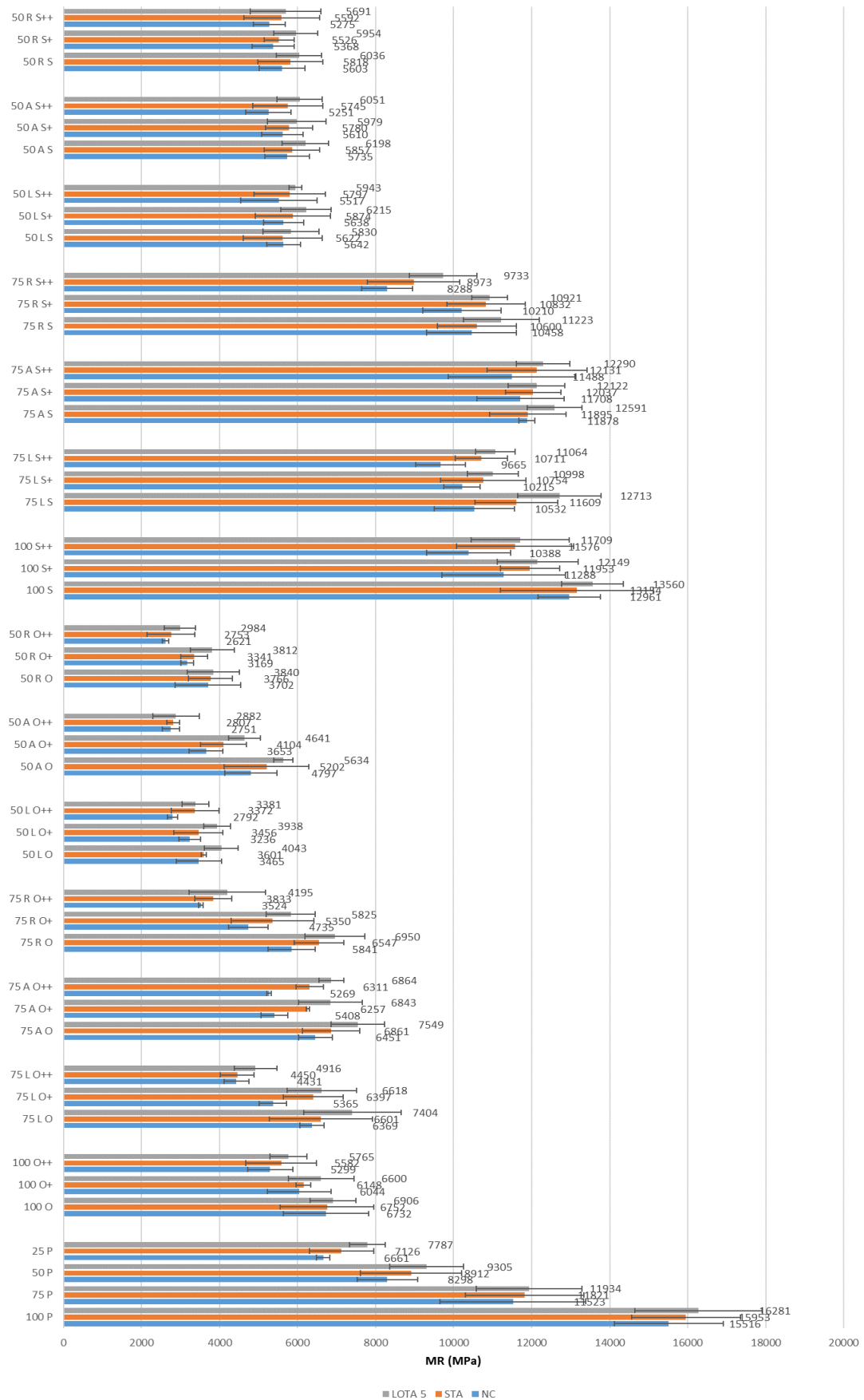
Tukey teste; variável rt		
Grupos homogêneos, alpha = ,05000		
Erro: entre MS = ,01005, df = 34,000		
MOMENTO	1	2
A	****	
L	****	
R	****	
S/AR		****

Para o caso da variável momento de adição, os resultados do ANOVA demonstraram que ao menos 2 constituintes variaram entre si. Ao analisar os resultados exposto na Tabela 28, observa-se a formação de dois grupos, onde as composições sem adição do AR apresentaram comportamento distinto das demais. Esse resultado implica que para o ensaio de resistência a tração por compressão diametral, a variável momento de adição do AR, não provocou influências nos resultados.

#### 4.1.2 Módulo de resiliência

Na Figura 39 estão dispostos a média de 3 (três) CPs ensaiados para o ensaio de módulos de resiliência, em amostras condicionadas e não condicionadas. Devido à grande variedade de resultados a serem analisados e a quantidade de composições, as análises foram divididas quanto ao agente de reciclagem.

Figura 39 – Ensaio de módulo de resiliência.

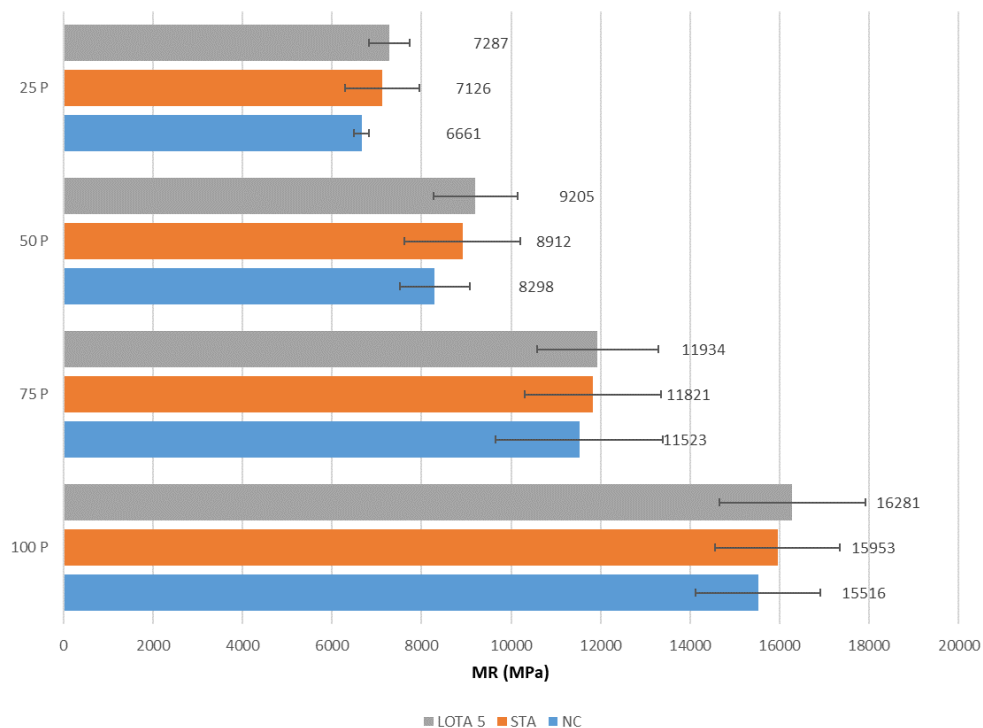


Ao analisar de forma superficial os resultados, presentes na Figura 39, é possível observar menores valores de módulo de resiliência nas composições adicionadas com óleo residual de motor, se comparado com as não adicionadas ou as adicionadas com ADCAP WM. Além disso, observa-se tendências gerais de aumento da módulo de resiliência com a realização do condicionamento de envelhecimento, e diminuição desse parâmetro com a diminuição do teor de RAP e com o aumento do teor do agente de reciclagem. Observa-se também que os desvios padrões encontrados nesse ensaio foram, em muitos casos, elevados.

#### 4.1.2.1 Sem agente de reciclagem

Na Figura 40 estão apresentados os resultados de módulo de resiliência das amostras sem adição do agente de reciclagem, com e sem condicionamento ao envelhecimento.

Figura 40 – Módulo de resiliência em amostras sem AR.



A partir da análise da Figura 40 é possível observar, novamente, a influência do RAP na rigidez das misturas. O módulo de resiliência, tal qual a resistência à tração, aumentou com o acréscimo do teor de RAP nas misturas. A mistura com teor



de 100% de RAP possui módulo de resiliência 133% superior ao da amostra com teor de 25% de RAP, e os teores intermediários (50 e 75%) promoveram um aumento de 25% e 73%, respectivamente.

Estudos como Lima (2003), Centofante (2016) e Suzuki (2019), que analisaram misturas recicladas com teores entre 20 e 50% de RAP, encontraram resultados próximos aos obtidos para esses teores nessa pesquisa (6000 a 7500 MPa para teores de 25% e 8000 a 8900 para teores de 50%).

Outro comportamento similar ao observado no ensaio de RT é o aumento do módulo de resiliência com o condicionamento ao envelhecimento, STA e LOTA 5, evidenciando a efetividade do condicionamento. Entretanto, os acréscimos observados nos ensaios de módulo de resiliência são inferiores aos observados no ensaio de resistência a tração. As amostras apresentaram disparidades de módulo de resiliência entre 2,6 e 7,4%, quando condicionados STA, valores relativamente baixos. As amostras condicionadas LOTA 5 apresentaram diferenças no módulo de resiliência entre 3,6 e 11%, valores um pouco maiores que o do condicionamento STA, mas igualmente baixos.

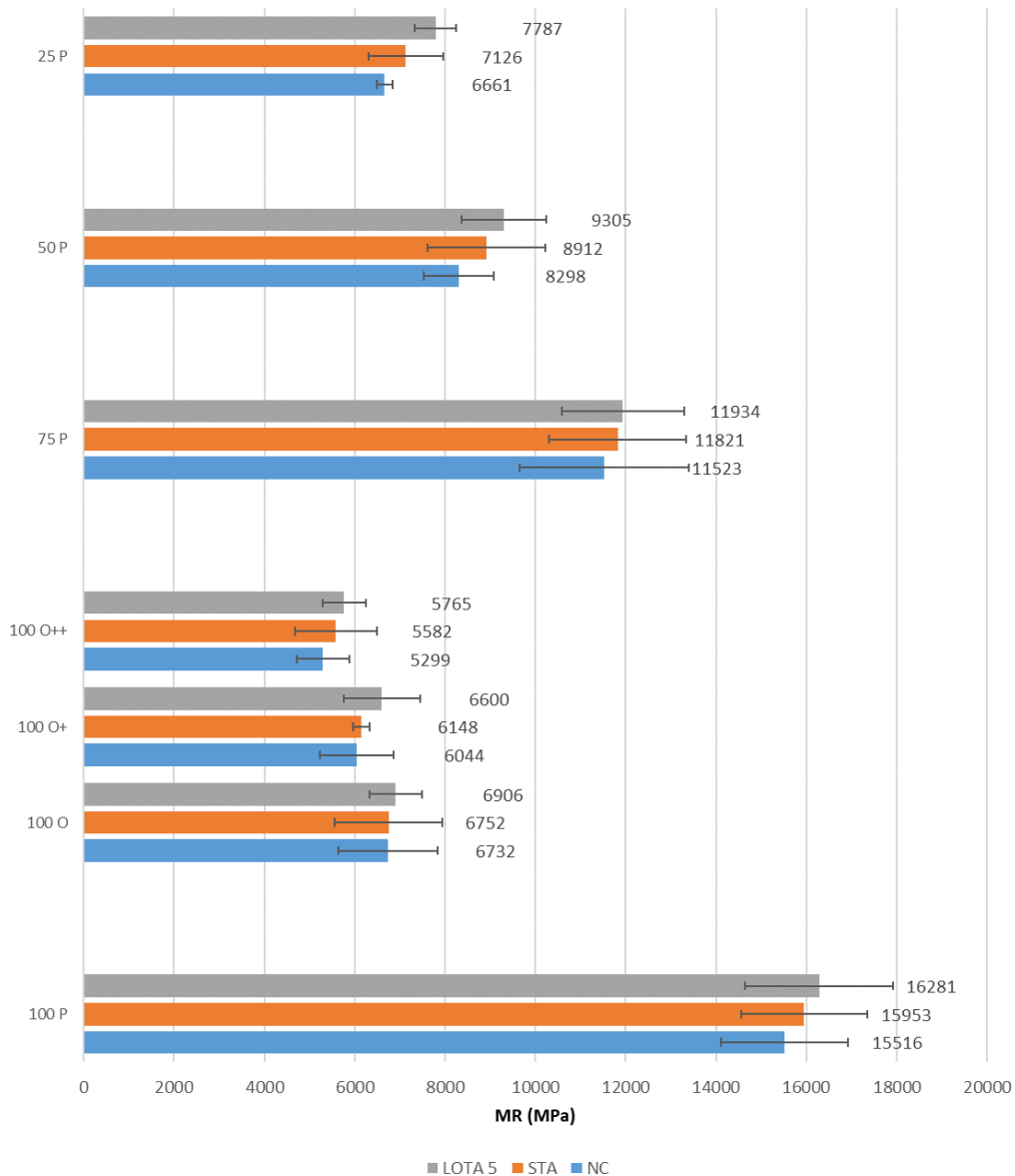
Ressalta-se, entretanto, os elevados desvios padrões observados nessa rotina de ensaios, sendo observados valores de variações de até 15%. Embora essas variações tenham sido significativas, é possível observar que essas variações ocorreram nas composições com maiores teores de RAP. Isso pode indicar uma fragilidade dessas composições, onde para o caso de 75 e 100% de RAP, o alto teor pode ter comprometido a homogeneidade da mistura.

A partir dos resultados obtidos de MR, assim como com os resultados de RT, é possível supor que, entre as composições analisadas, as composições 25 P e 50 P, são aplicáveis em pavimentos asfáltico, mesmo sem adição de agentes de reciclagem. Fato não recomendado por estudos como Moghaddam e Baaj (2016), Lu et al. (2019), entre outros. Porém, recomenda-se maior diversificação de ensaios e análises, para que assim possa se garantir de forma segura a viabilidade técnica das misturas asfálticas.

#### 4.1.2.2 Óleo residual de motor

Nas Figura 41, Figura 42 e Figura 43 estão ilustrados os resultados de módulo de resiliência das amostras com adição de óleo residual de motor, com e sem condicionamento ao envelhecimento.

Figura 41 – Módulo de resiliência (amostras 100% de RAP + óleo residual de motor).

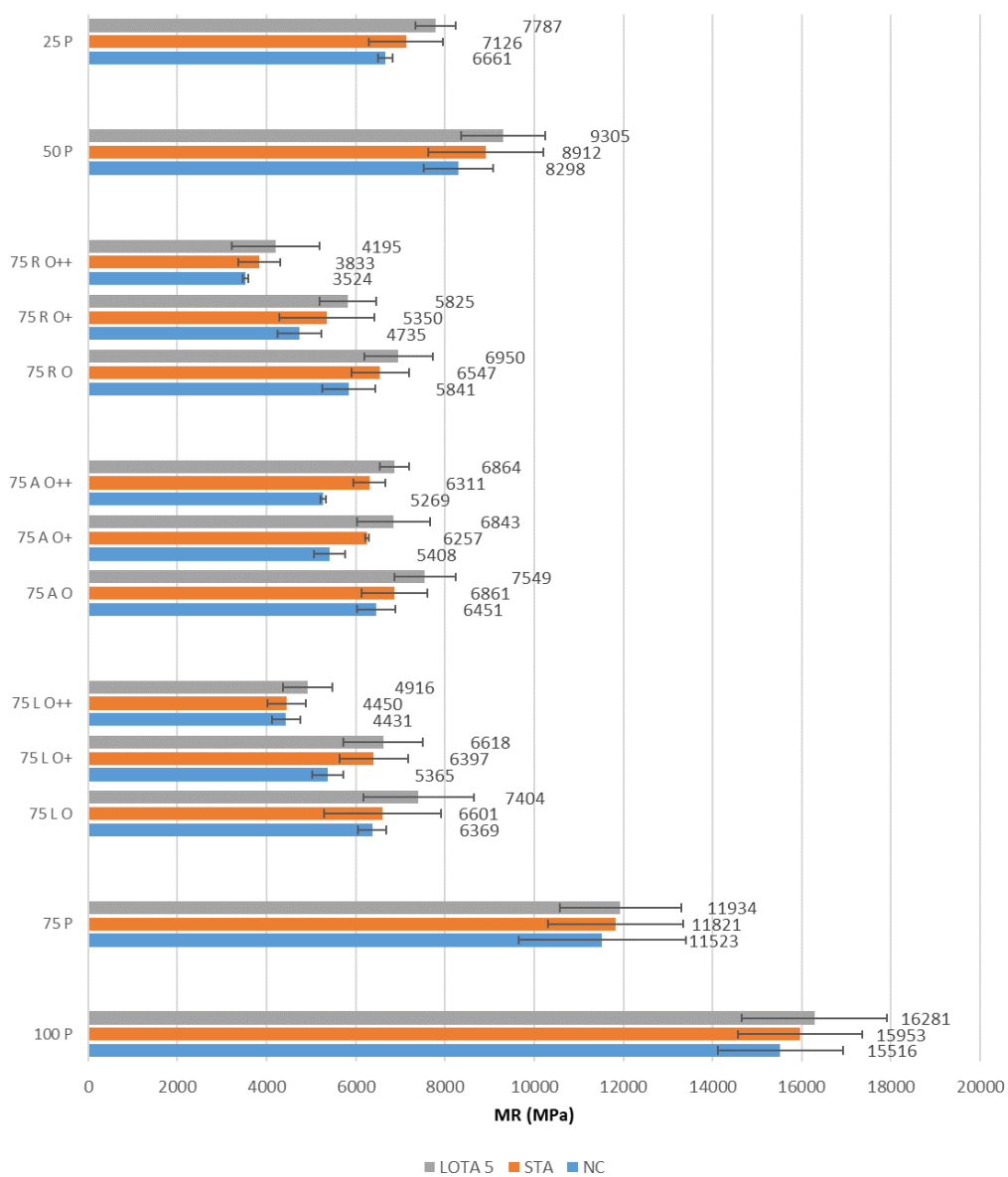


Ao analisar, separadamente, o efeito da adição nas amostras com 100% de RAP (100 O, 100 O+ e 100 O++) é possível observar uma redução no módulo de resiliência de 131, 157 e 193%, respectivamente, quando comparados com a composição 100 P. Essas amostras foram as que apresentaram maiores valores de

redução quando comparadas a mistura de referência com a mesma proporção de RAP (para esse caso, 100 P).

Para as amostras com 100 O, 100 O+ e 100 O++, as diferenças de módulo de resiliência provocados pelo condicionamento ao envelhecimento variaram até 5,4% para STA e 2 a 9% para LOTA 5. Embora, os resultados de módulo de resiliência dessas misturas estejam dentro de limites esperados para misturas convencionais, essas misturas ainda não podem ser consideradas aptas para uso, sendo necessário a realização de mais análises destas.

Figura 42 – Módulo de resiliência (amostras 75% de RAP + óleo residual de motor).



Ao analisar os resultados presentes na Figura 42, observa-se que os valores de módulo de resiliência das amostras com 75% de RAP variaram de 3500 a 6400 MPa. Observa-se também que as amostras que foram modificadas em adição ao RAP (R) apresentaram as maiores reduções entre seus respectivos teores de RAP. Essa modificação proporcionada pelo momento de adição é de interesse para essa pesquisa, tendo em vista que começa a se desenhar o melhor cenário de desenvolvimento de uma mistura reciclada.

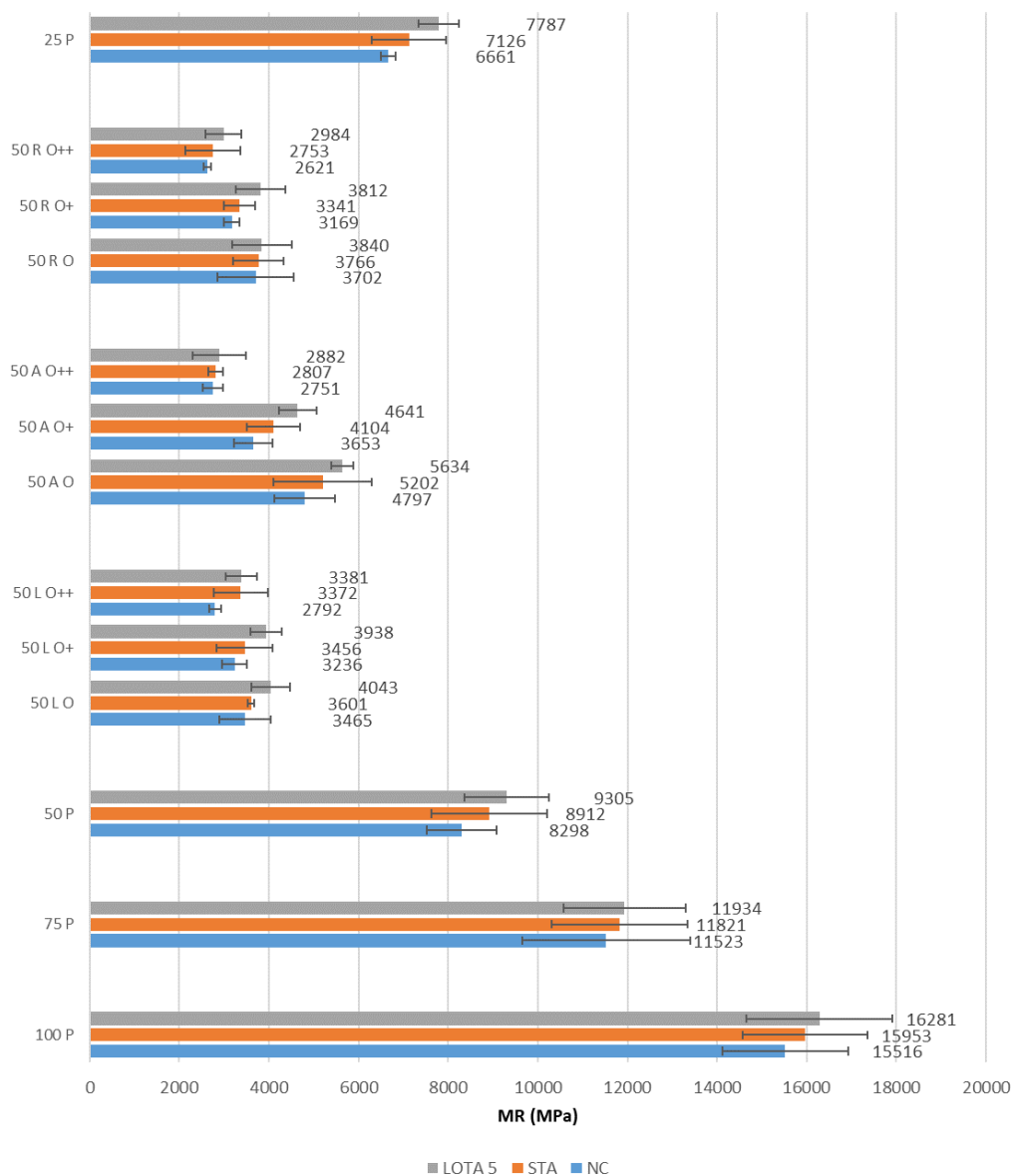
Além disso, as tendências observadas no ensaio de resistência a tração são observadas no ensaio de módulo de resiliência. As composições analisadas apresentaram as tendências de diminuição dos resultados obtidos com o acréscimo de óleo residual de motor e aumento dos resultados com a realização do condicionamento ao envelhecimento, STA e LOTA 5. Embora o teor de AR seja outra variável importante, ainda não está claro se a redução excessiva pode beneficiar as misturas desenvolvidas. O aumento de rigidez com o condicionamento de envelhecimento é um comportamento já esperado e que não inviabiliza a composição, apenas a restringe quanto ao seu uso pois depende da compatibilização com as camadas subjacentes. Na Tabela 29 estão apresentadas as variações observadas entre amostras não condicionadas e condicionadas ao envelhecimento, STA e LOTA 5.

*Tabela 29 – Variação do MR entre amostras de 75% de RAP, em relação a NC.*

Amostra	75 RO	75 RO+	75 RO++	75 AO	75 AO+	75 AO++	75 LO	75 LO+	75 LO++
Variação (%)									
STA	12,1	13,0	8,8	6,4	15,7	19,8	3,6	19,2	0,4
LOTA 5	19,0	23,0	19,0	17,0	26,5	30,3	16,3	23,4	16,3

As amostras apresentaram resultados em um intervalo de variações de 0 a 30% (STA e LOTA 5), intervalo relativamente pequeno para esse ensaio, tendo em vista a sua variabilidade. Observa-se também que a adição do óleo residual de motor reduziu a variabilidade dos resultados obtidos comparados ao outro aditivo e, conseqüentemente, ocorrendo a diminuição dos desvios padrões observados.

Figura 43 – Módulo de resiliência (amostras 50% de RAP + óleo residual de motor).



Ao analisar os resultados presentes na Figura 43, os valores de módulo de resiliência das amostras com 50% de RAP foram os menores resultados obtidos para o ensaio de MR, variando de 3600 a 4800 MPa. As tendências observadas nas composições com 75% de RAP, também foram observadas nas amostras com teores de 50% de RAP. Observa-se também que, as amostras que foram modificadas com adição ao ligante (L) e em adição ao RAP (R), apresentaram as maiores reduções. Entretanto, é importante frisar que, não está claro se esta redução excessiva pode beneficiar as misturas desenvolvidas. Na Tabela 30 estão apresentadas as variações

observadas entre amostras não condicionadas e condicionadas ao envelhecimento, STA e LOTA 5.

*Tabela 30 – Variação do MR entre amostras de 50% de RAP, em relação a NC.*

Amostra	50 RO	50 RO+	50 RO++	50 AO	50 AO+	50 AO++	50 LO	50 LO+	50 LO++
Variação (%)									
STA	1,8	5,4	5,0	8,4	12,3	2,1	3,9	6,8	20,8
LOTA 5	3,7	20,3	13,8	17,4	27,0	4,8	16,7	21,7	21,1

Assim como nas amostras com 75% de RAP, as amostras com 50% de RAP apresentaram uma variação de módulo de resiliência quando condicionadas ao envelhecimento em um intervalo relativamente pequeno para esse ensaio, 0 a 30% (STA e LOTA 5). Além disso, com a realização do condicionamento ao envelhecimento houve a redução dos desvios padrões obtidos nesse ensaio.

A adição de óleo residual de motor resultou em uma diminuição de mais de 50% das propriedades mecânicas das misturas analisadas, ou seja, diminuição da rigidez das amostras. Essa mesma tendência é observada com o aumento do teor de óleo residual de motor adicionado. Todas as amostras modificadas com óleo residual de motor apresentaram resultados compatíveis ou inferiores quando comparadas com as amostras da mistura 25 P. Esse comportamento também foi observado nos estudos de Mamun e Al-Abdul Wahhab (2018), porém, as reduções apresentadas pelos autores não foram tão elevadas. Outros estudos, com aditivos classificados como AR orgânicos, também apresentaram a mesma tendência de comportamento (Nabizadeh et al., 2017; Leng et al., 2018; entre outros).

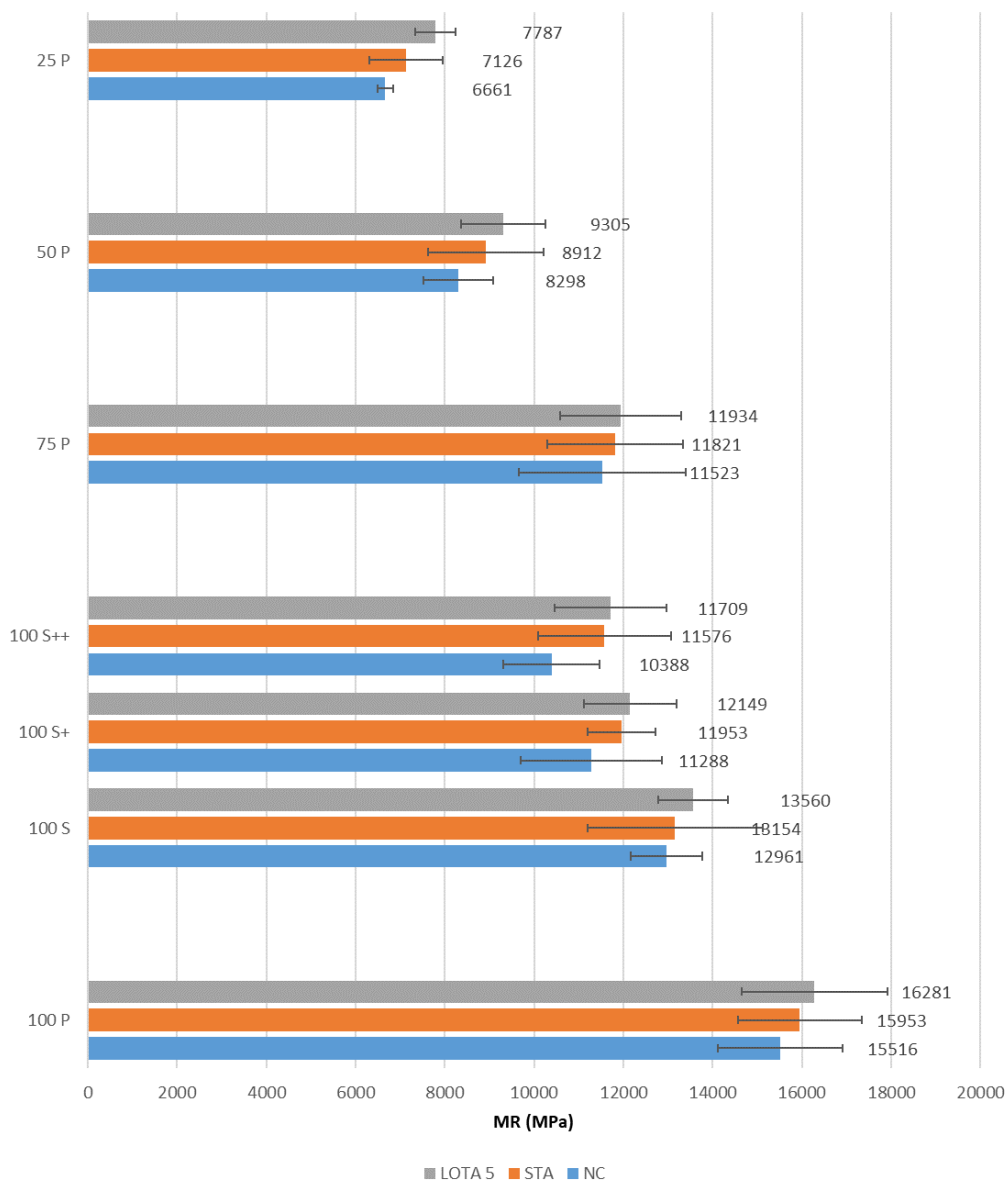
Os resultados obtidos de MR, para as amostras modificadas com óleo residual de motor, indicam que todas as composições analisadas são aplicáveis em pavimentos asfálticos. Entretanto, as misturas que contem 100% de RAP devem ser melhor analisadas, pois, a diminuição de rigidez apresentada pode ser devida: ao rejuvenescimento do ligante envelhecido pela ação do AR ou a degradação da mistura provocada pelo óleo residual de motor. Em ambas as hipóteses é necessário um quadro amostral maior e mais representativo, visto que podem representar elevados benefícios ou o comprometimento total das amostras. As composições 75 RO e 75 LO

foram as configurações com maior teor de RAP que apresentam melhor desempenho, até o momento, sendo assim, convém manter uma atenção especial nessas composições.

#### 4.1.2.3 ADCAP WM

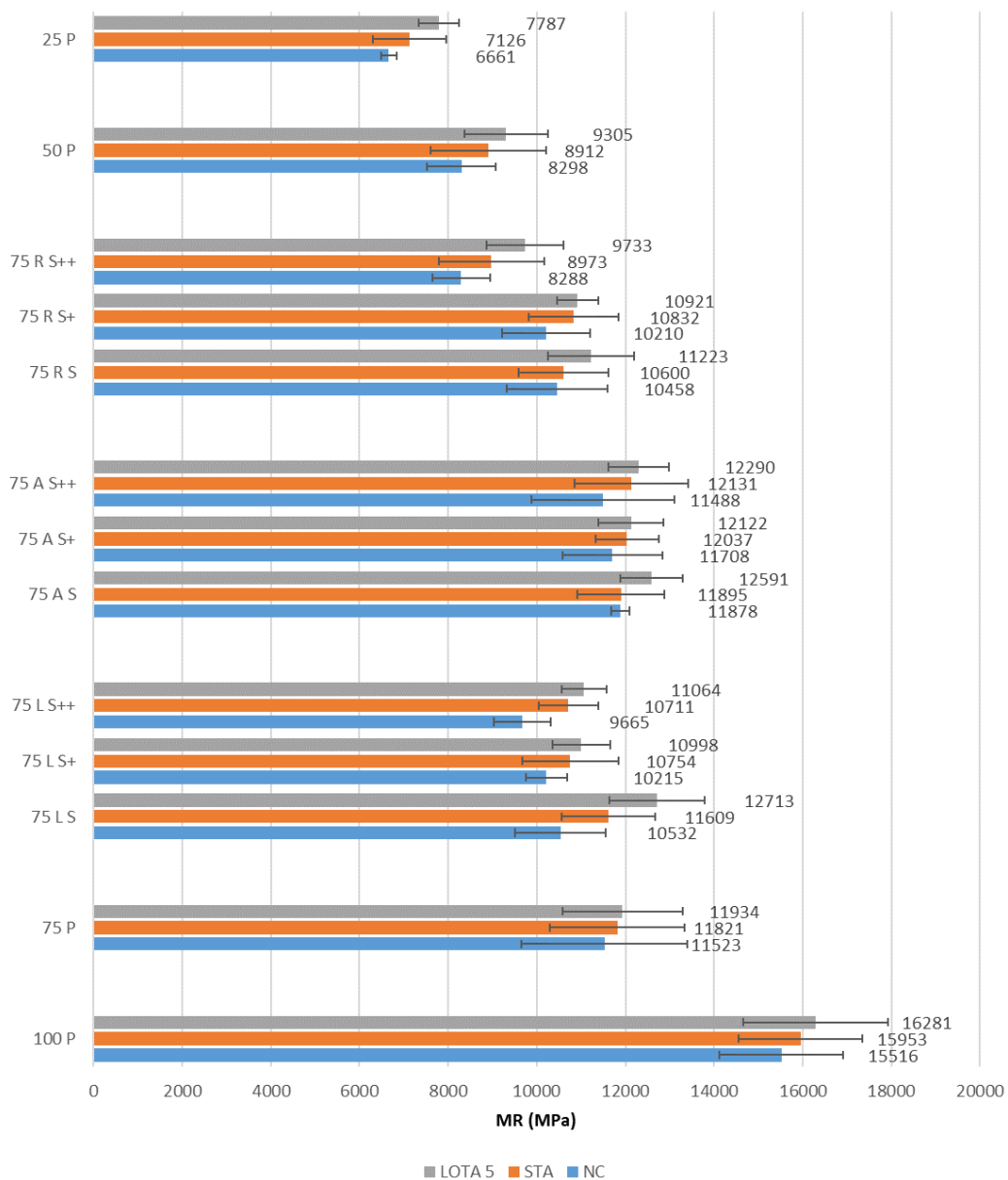
As Figura 44, Figura 45 e Figura 46 apresentam os resultados de resistência à tração por compressão diametral das amostras com adição de ADCAP WM, com e sem condicionamento ao envelhecimento.

Figura 44 – Módulo de resiliência (amostras 100% de RAP + ADCAP WM).



Ao analisar o efeito da adição no módulo de resiliência das amostras com 100% de RAP (100 S, 100 S+ e 100 S++) é possível observar uma redução de 19,8, 37,5 e 49,4%, respectivamente, comparado a composição 100 P. As variações de módulo de resiliência provocados pelo condicionamento ao envelhecimento foram de 1 a 12% no STA e de 4 a 13% no LOTA 5. Mesmo com essa baixa variação é possível verificar que os procedimentos de envelhecimento foram eficientes e causaram desgastes no mesmo patamar que se comparado as amostras modificadas com óleo residual de motor.

Figura 45 – Módulo de resiliência (amostras 75% de RAP + ADCAP WM).





Ao analisar os resultados da Figura 45 observa-se que, embora em menor magnitude, as composições modificadas no momento L e R, apresentaram as maiores reduções de módulo de resiliência. Essa redução de rigidez é importante pois diminui as intervenções necessárias para compatibilizar as camadas do pavimento. Embora a rigidez não seja um parâmetro de desaprovação de uma mistura asfáltica, uma rigidez excessiva na camada de revestimento pode fazer com que seja necessário elevar a qualidade das camadas inferiores do pavimento, tornando o pavimento oneroso e inviável.

Ao avaliar o teor de AR adicionado observa-se a tendência de diminuição do módulo de resiliência com o aumento de teor de AR. Observa-se ainda que, as adições 25% acima do TO apresentaram menores variações de módulo de resiliência, até 5%, enquanto que as amostras com adições 50% acima do TO tiveram reduções de até 20%.

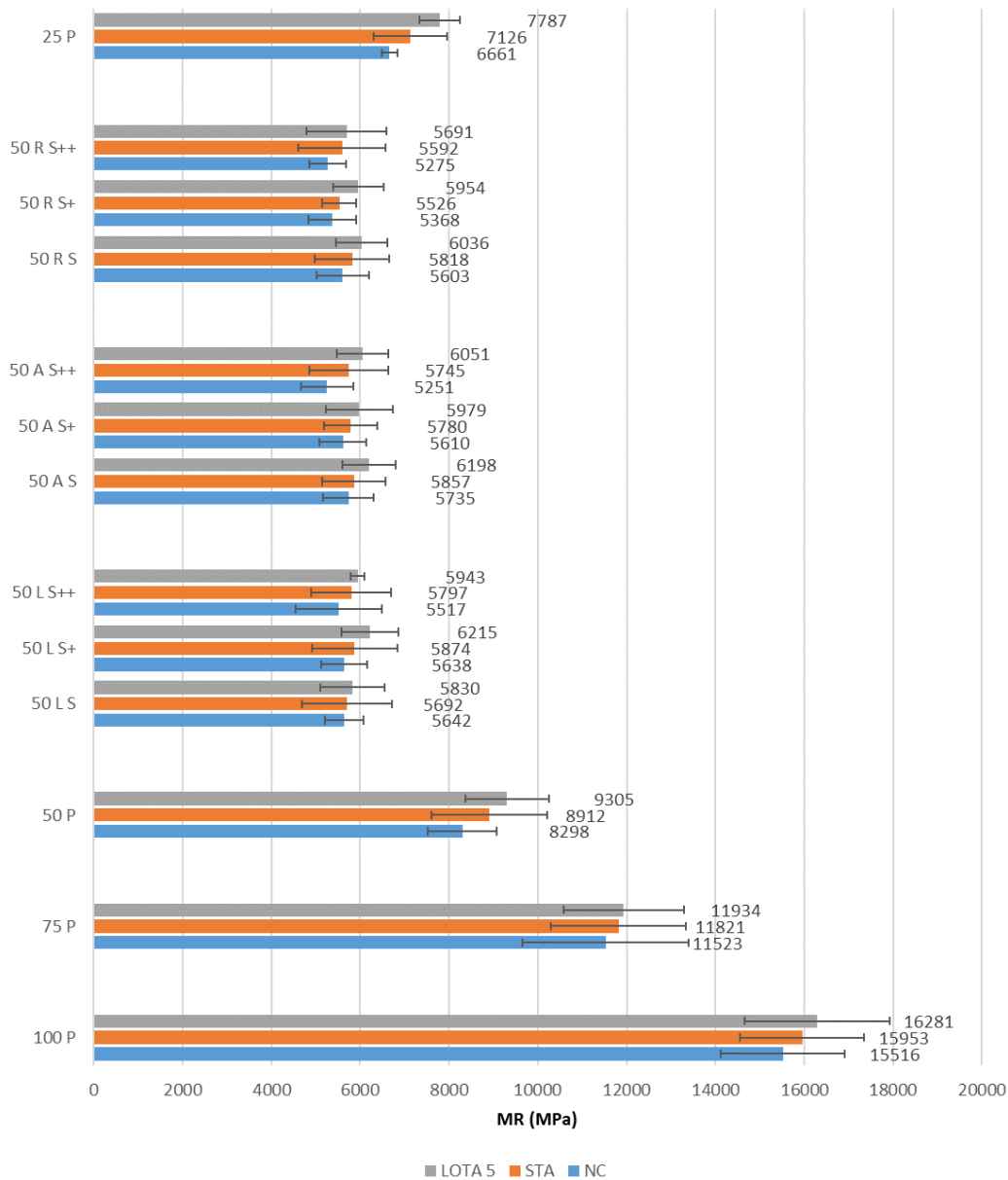
Os resultados de módulo de resiliência das amostras com 75% de RAP, apresentaram valores variando de 8200 a 12900 MPa, valores relativamente elevados. Valores de MR acima de 10000 MPa, por indicar rigidez excessiva, podem inviabilizar a utilização das misturas asfálticas com essas configurações. Dentro dessa expectativa, apenas as amostras 75 R S ++ e 75 L S ++ apresentam resultados de módulo de resiliência abaixo de 10000 MPa. Embora um elevado valor de módulo de resiliência não seja determinante na rejeição de uma mistura asfáltica, indica que a rigidez excessiva pode comprometer o pavimento, sendo necessárias análises complementares para validação da composição e compatibilização entre as camadas. Na Tabela 31 estão apresentadas as variações observadas entre amostras não condicionadas e condicionadas ao envelhecimento, STA e LOTA 5.

*Tabela 31 – Variação da MR entre amostras de 75% de RAP, em relação a NC.*

Amostra									
Varição (%)	75 RS	75 RS+	75 RS++	75 AS	75 AS+	75 AS++	75 LS	75 LS+	75 LS++
STA	12,1	13,0	8,8	6,4	15,7	19,8	3,6	19,2	0,4
LOTA 5	19,0	23,0	19,0	17,0	26,5	30,3	16,3	23,4	10,9

As amostras apresentaram resultados em um intervalo de variações de 0 a 20% (STA) e 10 a 30% (LOTA 5). Esse aumento já era esperado e confirma a efetividade do condicionamento ao envelhecimento, onde os valores de módulo de resiliência aumentaram para as amostras LOTA 5 > STA > NC.

Figura 46 – Módulo de resiliência (amostras 50% de RAP + ADCAP WM).



Ao analisar os resultados da Figura 46 observa-se uma quebra na sequência das tendências até o momento encontradas, não existindo diferenças significativas entre os resultados obtidos. Embora seja visível a redução do módulo de resiliência proporcionada pela adição do ADCAP WM, não existe variação significativa quanto

ao teor do AR e nem quanto ao momento de adição do AR. Os valores apresentados de módulo de resiliência das amostras com 50% de RAP variaram de 5200 a 5600 MPa. Na Tabela 32 estão apresentadas as variações observadas entre amostras não condicionadas e condicionadas ao envelhecimento, STA e LOTA 5.

*Tabela 32 – Variação da MR entre amostras de 50% de RAP, em relação a NC.*

Amostra									
Variação (%)	50 RS	50 RS+	50 RS++	50 AS	50 AS+	50 AS++	50 LS	50 LS+	50 LS++
STA	1,7	5,4	5,0	8,4	12,3	2,1	3,9	6,8	20,8
LOTA 5	3,7	20,3	13,8	17,4	27,0	4,8	16,7	21,7	21,1

As amostras apresentaram resultados em um intervalo de variações de 0 a 20% (STA) e 3 a 27% (LOTA 5). As variações encontradas são relativamente baixas para esse ensaio em amostras condicionadas LOTA 5. Na literatura é possível encontrar estudos onde essa variação é bem mais significativa, a exemplo de Arruda (2021) que encontrou variações de até 50% em amostras de misturas recicladas com 50% de RAP e condicionadas LOTA 5.

Assim como nos tópicos anteriores, as mesmas tendências de aumento do MR com o condicionamento foram observadas. Entretanto, ao contrário do que ocorreu com as misturas com adição de óleo residual de motor, as amostras modificadas com ADCAP WM não apresentaram reduções do módulo de resiliência tão elevadas. Não existe um consenso quanto aos possíveis resultados de MR em misturas recicladas. Alguns autores indicam que o acréscimo de RAP aumenta módulo de resiliência, enquanto que a adição de AR surfactante irá reduzir (Centofante, 2016; Lu et al., 2019; Yousefi et al. (2021); entre outros).

Os resultados obtidos de MR para as amostras modificadas com ADCAP WM indicam que as composições analisadas com 50% de RAP são aplicáveis em pavimentos asfálticos. Entretanto, ressalta-se a necessidade de realizações de simulações de compatibilidade entre as camadas para real validação de sua utilização. Nos casos das composições com 75% de RAP ainda se faz necessário uma análise mais aprofundada e ampliação do quadro experimental para sua recomendação. Entretanto, as amostras 75 R S ++ e 75 L S ++, apresentam indícios de possuírem viabilidade de uso. As misturas que contem 100% de RAP não se

apresentam viáveis para aplicação em camadas de rolamento, o que não impede a utilização em outros serviços, como: pátios de estacionamento, base de pavimentos, entre outros.

Nas Tabela 33, Tabela 34 e Tabela 35 são mostradas as análises de variância (ANOVA) para o ensaio de modulo de resiliência. Para o ensaio de MR, assim como no ensaio de RT, o nível do coeficiente de determinação é de 10%.

*Tabela 33 – ANOVA Módulo de resiliência amostras NC*

ANOVA – R <sup>2</sup> = 0,918502					
FATOR	SS	GL	MS	F	P
TEOR	186112258	3	62037419	56,18579	0,000000
AR	175902331	5	35180466	31,86210	0,000000
MOMENTO	6869534	2	3434767	3,11079	0,057456
ERRO	37541026	34	1104148		

*Tabela 34 – ANOVA Módulo de resiliência amostras STA*

ANOVA – R <sup>2</sup> = 0,915773					
FATOR	SS	GL	MS	F	P
TEOR	208525184	3	69508395	57,29917	0,000000
AR	178076673	5	35615335	29,35946	0,000000
MOMENTO	7741119	2	3870560	3,19069	0,053711
ERRO	41244670	34	1213079		

*Tabela 35 – ANOVA Módulo de resiliência amostras LOTA 5*

ANOVA – R <sup>2</sup> = 0,915278					
FATOR	SS	GL	MS	F	P
TEOR	216176312	3	72058771	58,15017	0,000000
AR	177348105	5	35469621	28,62337	0,000000
MOMENTO	8374300	2	4187150	3,37896	0,045871
ERRO	42132260	34	1239184		

Ao analisar os resultados de p, presentes nas tabelas, é possível afirmar que as composições apresentaram comportamento significativamente diferentes quanto aos parâmetros observados. Comportamento similar aos já observados para o ensaio de resistência a tração por compressão diametral e, portanto, é possível prever o comportamento da variável MR por meio das variáveis analisadas. Esse

comportamento, bem como no ensaio RT, também é observado em todas as etapas de condicionamento e mantem um R<sup>2</sup> relevante.

Da mesma forma que no tópico anterior foi realizado o teste de comparação múltipla, pelo teste de Tukey. Os resultados obtidos nessa análise estão expostos nas Tabela 36, Tabela 37 e Tabela 38. Devido ao fato que, as três condições de condicionamento produzirem resultados no teste Tukey idênticos, as análises podem ser estendidas as demais variáveis de condicionamento.

*Tabela 36 – Teste Tukey para a componente teor de RAP (MR).*

Tukey teste; variável MR			
Grupos homogêneos, alpha = ,05000			
Erro: entre MS = ,01104, df = 34,000			
TEOR	1	2	3
50	****		
25	****	****	
75		****	
100			****

Como observado nos resultados do ANOVA, a variável teor de RAP demonstraram que ao menos 3 constituintes variaram entre si. Ao realizar o teste Tukey é possível identificar como elas se ajustaram entre si, onde, é possível determinar que as variáveis com teor 25 e 50 apresentam comportamentos similares, bem como, os teores 25 e 75, enquanto que o teor 100 difere dos demais.

*Tabela 37 – Teste Tukey para a componente agente de reciclagem (MR).*

Tukey teste; variável MR				
Grupos homogêneos, alpha = ,05000				
Erro: entre MS = ,01104, df = 34,000				
AR	1	2	3	4
O++		****		
O+		****	****	
O			****	
S++	****			
S+	****			
S	****			
P				****

Para o caso da variável agente de reciclagem, os resultados expostos na Tabela 37, é possível afirmar que o grupo P foi o único que apresentou comportamento de forma isolada. Para os demais casos: Os grupos O+ e O são similares entre si e

distintos dos demais; os grupos O++ e O+ são similares entre si e distintos dos demais; e os grupos S, S + e S++ são similares entre si e distintos dos demais.

*Tabela 38 – Teste Tukey para a componente momento de adição (MR).*

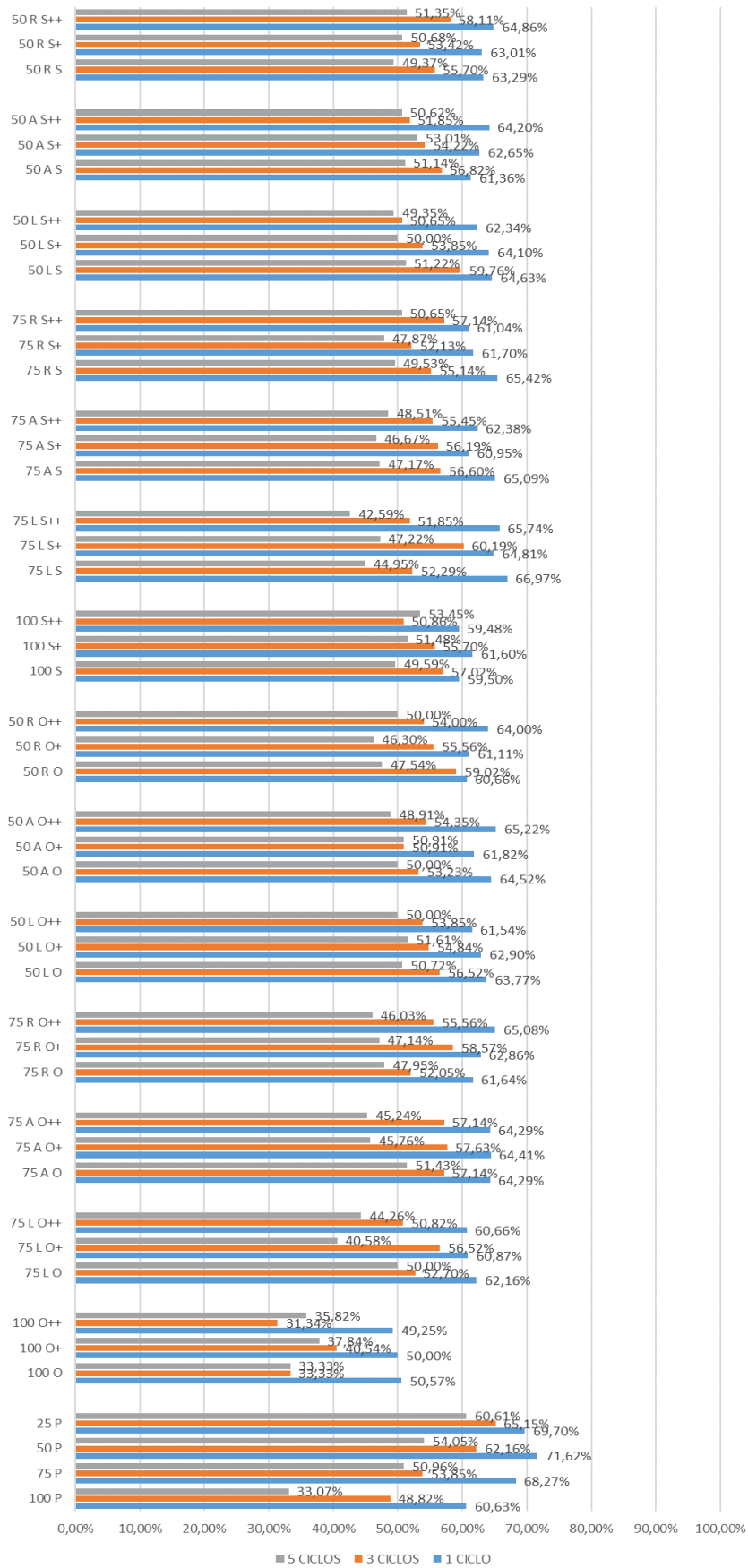
Tukey teste; variável MR		
Grupos homogêneos, alpha = ,05000		
Erro: entre MS = ,01104, df = 34,000		
MOMENTO	1	2
A	****	
L	****	
R	****	
S/AR		****

Para o caso da variável momento de adição, os resultados do ANOVA apresentaram ao menos 2 constituintes variantes entre si. Ao analisar os resultados exposto na Tabela 38, observa-se a formação de dois grupos, onde as composições sem adição do AR apresentaram comportamento distinto das demais. Esse resultado implica que para o ensaio de módulo de resiliência, a variável momento de adição do AR, não provocou influências nos resultados.

## 4.2 Lottman condicionado pelo método Freeze-thaw (F-T) cycles

Nesse tópico estão apresentados os resultados os ensaios de resistência ao dano por umidade induzida, condicionados pelo método Freeze-thaw (F-T) cycles para 1, 3 e 5 ciclos. Os resultados gerais obtidos no ensaio de condicionamento de gelo-degelo podem ser consultados na Figura 31. Os valores observados são referentes a média obtida por meio de 3 (três) corpos de prova ensaiados condicionados e não condicionados.

Figura 47 – Ensaio de dano por umidade induzida condicionadas.

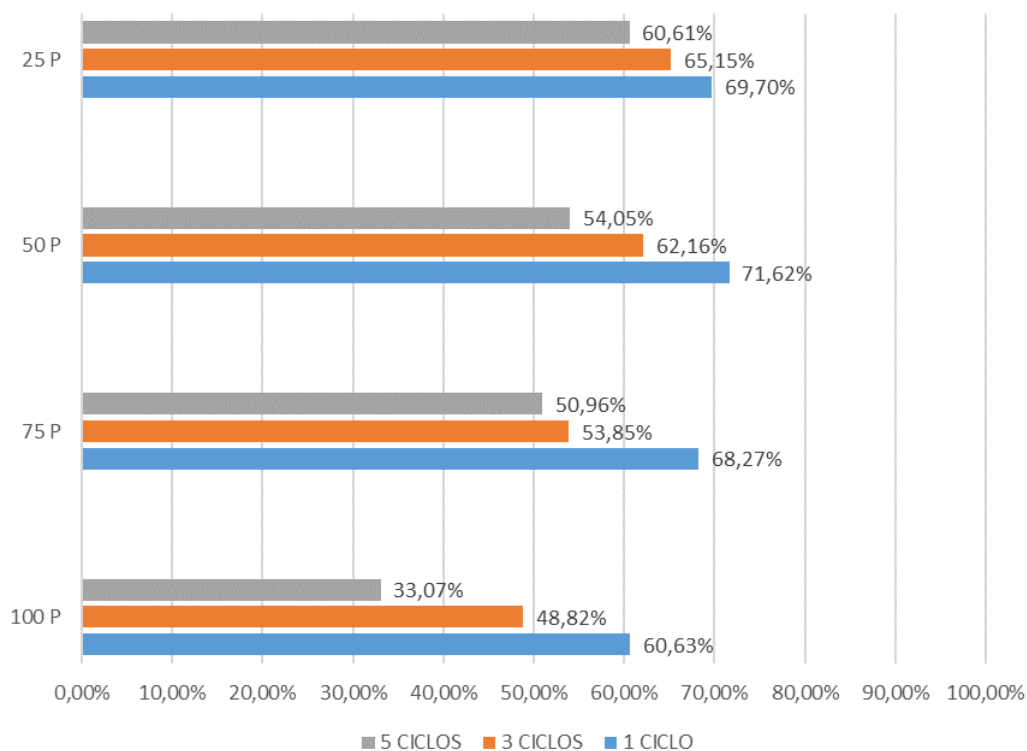


Analisando, de forma superficial, os resultados presentes na Figura 47 é possível observar que a adição de RAP não influenciou na perda de resistência por dano causado por umidade induzida, o que pode ser positivamente avaliado. Também é possível observar tendências de redução da resistência com o aumento dos ciclos de condicionamento de gelo e degelo.

#### 4.2.1.1 Sem agente de reciclagem

A Figura 48 apresenta os resultados de resistência ao dano por umidade induzida das composições sem adição do agente de reciclagem. As composições ensaiadas foram condicionadas pelo método Freeze-thaw (F-T) cycles para 1, 3 e 5 ciclos.

Figura 48 – Lottman condicionado F-T sem AR.



Ao analisar a Figura 48 observa-se que o acréscimo de RAP até o máximo de 75% de RAP não influenciou na perda de resistência por dano causado por umidade induzida, o que pode ser positivamente avaliado. Entretanto, a amostra com 100% de



RAP apresenta uma perda considerável dessa propriedade, indicando que essa composição apresenta falha no deslocamento de filme das partículas após aquecimento e nova compactação. Observa-se também que apenas a composição 50 P atendeu ao critério de valor mínimo definido pela especificação técnica de serviço, representado pela norma DNIT - ME 031/2006, que é de 70%. Pode-se inferir também que a composição de 25 P atende ao limite mínimo, tendo em vista que o valor obtido está próximo do normatizado.

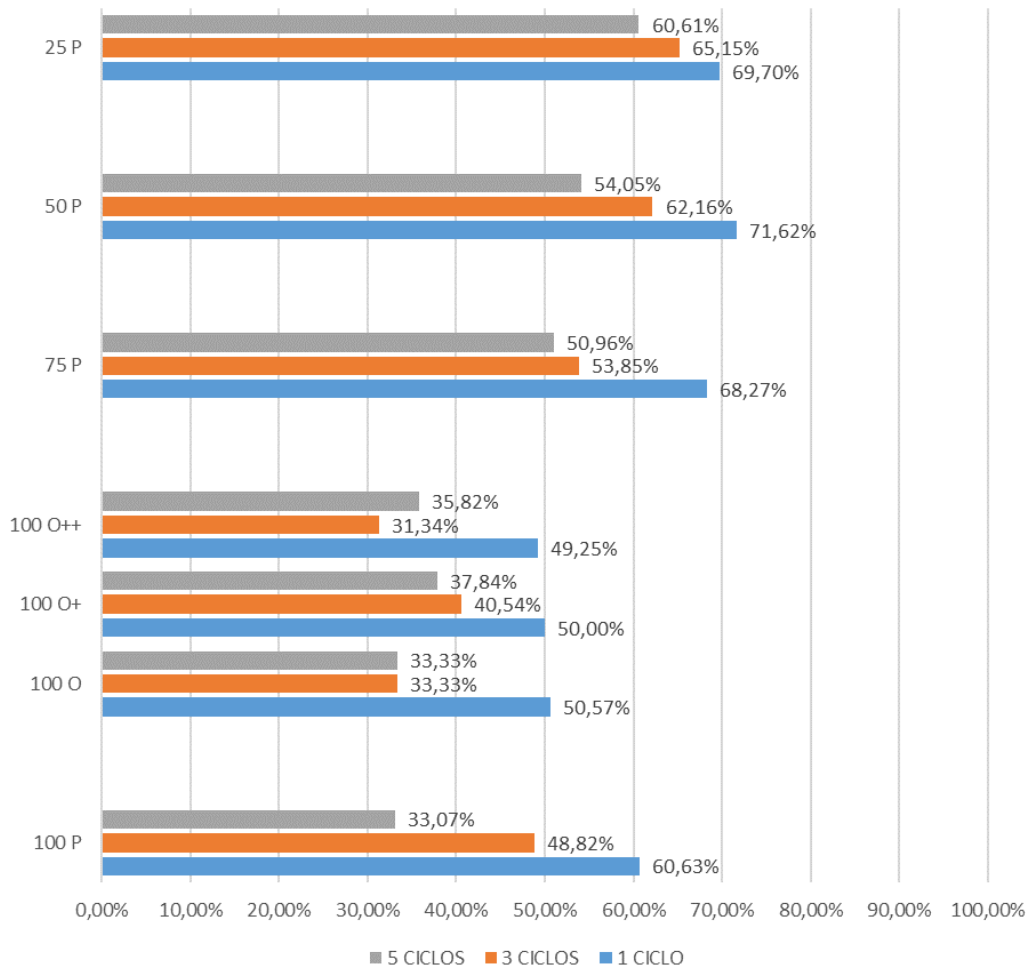
A repetição dos ciclos de gelo e degelo promove a diminuição da resistência ao dano por umidade induzida das amostras ensaiadas. Observa-se que as composições 25 P, 50 P e 75 P apresentaram reduções de 6,5, 13,2 e 21,1% no resultado de lottman após 3 ciclos, respectivamente, enquanto que para 5 ciclos a redução é de 13,0, 24,5 e 25,4%. No caso da composição 100 P, essa amostra apresentou o maior desgaste entre as amostras sem adição de AR, tendo reduções de 19,5% para 3 ciclos e 45,6% para 5 ciclos. O comportamento observado na composição 100 P indica uma considerável fragilidade quanto a perda de resistência ao dano por umidade induzida.

A redução da resistência ao dano por umidade induzida já era esperada, tendo em vista que após o primeiro ciclo de gelo e degelo, as fraturas produzidas não tiveram tempo para recuperação. Assim, o novo ciclo de congelamento irá expandir a fratura e fragilizar a mistura asfáltica. Comportamentos similares foram observados em estudos de Islam e Tarefder (2015), Badeli et al. (2018) e Cong et al. (2020).

#### **4.2.1.2 Óleo residual de motor**

As Figura 49, Figura 50 e Figura 51 apresentam os resultados de resistência ao dano por umidade induzida das composições com adição de óleo residual de motor. As composições ensaiadas foram condicionadas pelo método Freeze-thaw (F-T) cycles para 1, 3 e 5 ciclos.

Figura 49 – Lottman condicionado F-T (amostras 100% de RAP + óleo residual de motor).

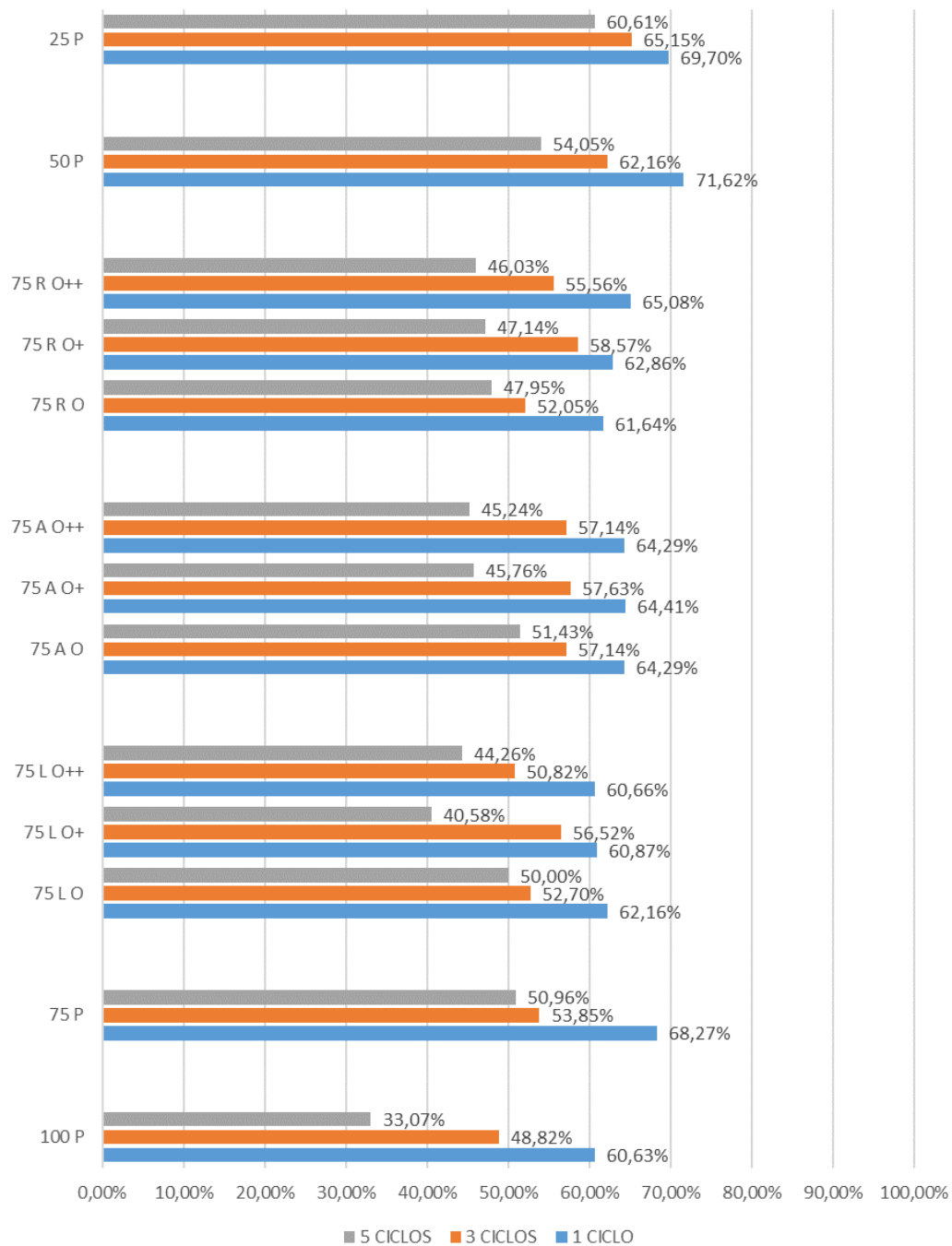


As composições com 100% de RAP adicionadas com óleo residual de motor apresentaram os menores resultados, indicando que a adição possa ter resultado em uma fragilização da adesividade do ligante envelhecido. Esse fato, associado aos resultados de resistência a tração e módulo de resiliência, que apresentaram perdas significativas para essas composições, parecem corroborar com a hipótese.

Com a realização do condicionamento é possível observar as reduções de resistência ocorridas nas amostras, essas reduções foram as maiores observadas entre todas as amostras ensaiadas. Para o condicionamento com 3 ciclos foram observadas reduções de 34,1, 18,9 e 36,4% para as amostras 100 O, 100 O + e 100 O ++, respectivamente. Enquanto que para o condicionamento de 5 ciclos foram obtidos 34,1, 24,3 e 27,3% para as amostras 100 O, 100 O + e 100 O ++, respectivamente. Essas reduções são elevadas e corroboram com a hipótese de

fragilização da mistura asfáltica com o acréscimo do óleo residual de motor. Assim, os resultados obtidos indicam que, as composições com 100% de RAP adicionadas com óleo residual de motor não apresenta viabilidade técnica para sua utilização.

Figura 50 – Lottman condicionado F-T (amostras 75% de RAP + óleo residual de motor).



De acordo com os dados da Figura 50, as composições com 75% de RAP adicionadas com óleo residual de motor mantiveram a tendência de redução da

resistência ao dano por umidade induzida. Estas apresentaram resultados inferiores as amostras sem a adição do AR, porém essa redução foi menor que a observada nas composições com 100% de RAP. O momento de adição não apresentou influência significativa nesse comportamento.

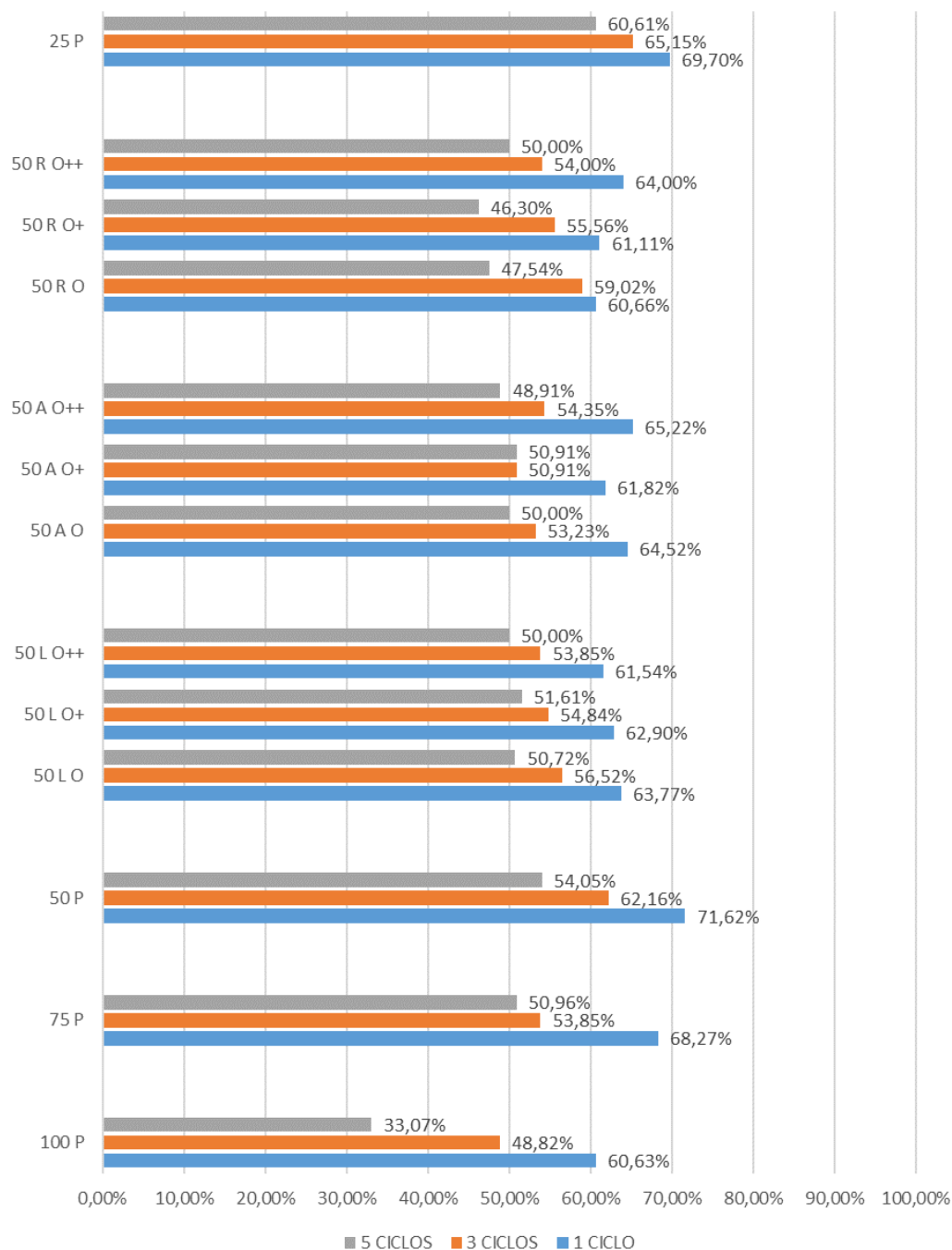
Com a repetição do condicionamento é possível observar o aumento da repetição do condicionamento reduz a resistência ao dano por umidade induzida, comportamento já esperado. Na Tabela 39 estão apresentadas as variações observadas entre amostras condicionadas pelo método Freeze-thaw (F-T) cycles para 1, 3 e 5 ciclos.

*Tabela 39 – Variação do Iottman (amostras 75% de RAP + óleo residual, em relação a 1 ciclo).*

Amostra	75 RO	75 RO+	75 RO++	75 AO	75 AO+	75 AO++	75 LO	75 LO+	75 LO++
Variação (%)									
3 ciclos	-15,6	-6,8	-14,6	-11,1	-10,5	-11,1	-15,2	-7,1	-16,2
5 ciclos	-22,2	-25,0	-29,3	-20,0	-29,0	-29,6	-19,6	-30,0	-27,0

As amostras apresentaram resultados em um intervalo de variações de 6 a 16% (3 ciclos) e 20 a 30% (5 ciclos). As variações encontradas são similares as encontradas na amostra 75 P, indicando que a redução desse parâmetro não só se deu pela adição do AR, como também, pelo alto teor de RAP. Tais condições indicam um acréscimo na fragilidade de misturas recicladas com composições de 75% de RAP, acréscimo esse produzido pela adição de óleo residual de motor.

Figura 51 – Lottman condicionado F-T (amostras 50% de RAP + óleo residual de motor).



A Figura 51 ilustra que as composições com 50% de RAP adicionadas com óleo residual de motor também apresentaram a tendência de redução da resistência ao dano por umidade induzida. As reduções observadas variaram de 6 a 10% se comparada a amostra 50 P, essas variações são menores que as observadas nas

composições com 100% de RAP. Ao avaliar o momento de adição observa-se que não houve influência significativa, pois, os resultados foram próximos entre si, não apresentando tendência de aumento ou redução das propriedades. A adição a diferentes teores de óleo residual de motor teve comportamento análogo ao observado anteriormente, ou seja, os acréscimos acima do teor ótimo não alteraram significativamente o comportamento das composições.

Com a repetição dos ciclos de gelo e degelo é possível observar que as composições com 50% de RAP apresentaram o mesmo comportamento que as composições com 75% de RAP, onde o aumento da repetição reduziu a resistência ao dano por umidade induzida. Na Tabela 40 estão apresentadas as variações observadas entre amostras condicionadas pelo método Freeze-thaw (F-T) cycles para 1, 3 e 5 ciclos.

*Tabela 40 – Variação do lottman (amostras 50% de RAP + óleo residual, em relação a 1 ciclo).*

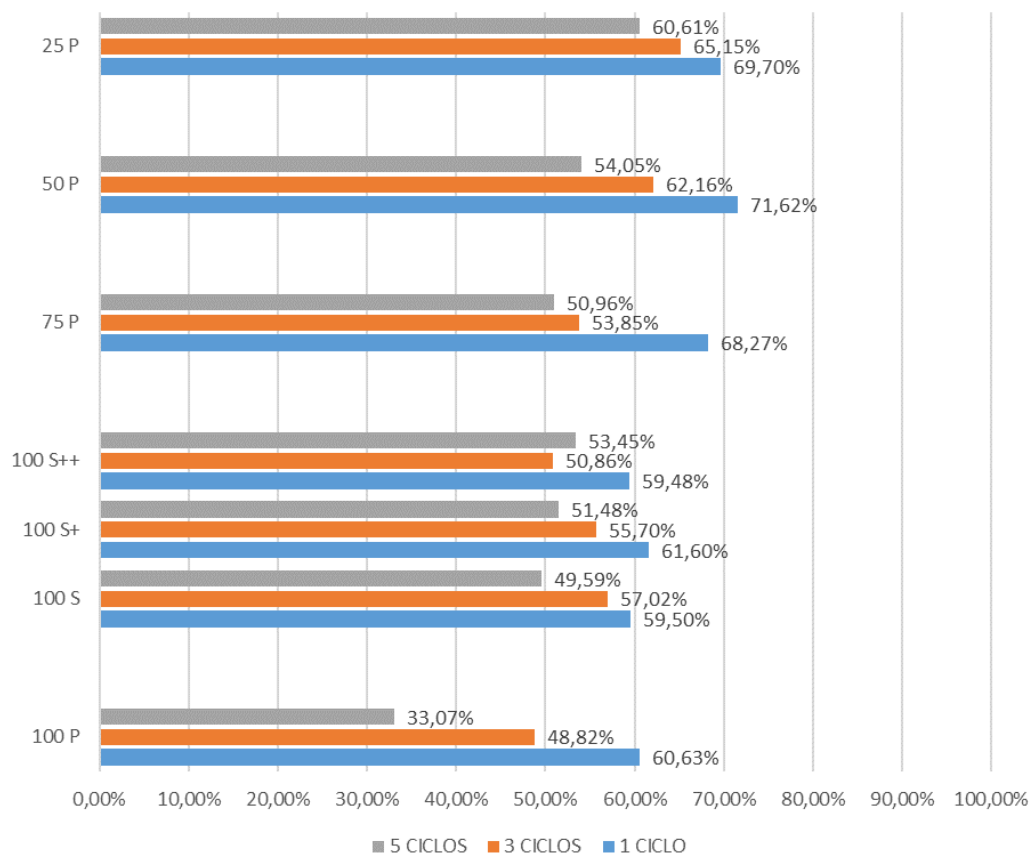
Amostra									
Varição (%)	50 RO	50 RO+	50 RO++	50 AO	50 AO+	50 AO++	50 LO	50 LO+	50 LO++
3 ciclos	-2,7	-9,1	-15,6	-17,5	-17,7	-16,7	-11,4	-12,8	-12,5
5 ciclos	-21,6	-24,2	-21,9	-22,5	-17,7	-25,0	-20,5	-18,0	-18,8

As amostras apresentaram resultados em um intervalo de variações de 2 a 18% (3 ciclos) e 17 a 25% (5 ciclos). As variações encontradas são similares as encontradas as composições com 50% e 75% de RAP. Entretanto, as composições com 50% apresentam resultados inferiores de resistência ao dano por umidade induzida, que indica, novamente, que a redução desse parâmetro não só se deu pela adição do AR, como também, pelo alto teor de RAP. Tais condições indicam que o acréscimo do óleo residual de motor fragiliza as misturas recicladas quanto ao dano por umidade induzida. Entretanto, somente através da análise química será possível estabelecer os níveis de influência e graus de interação que essas composições apresentem, sendo assim, imprescindível sua realização e análise. Condição essa recomendada incisivamente para realização de estudos futuros com esse tipo de agente de reciclagem.

### 4.2.1.3 ADCAP WM

As Figura 52, Figura 53 e Figura 54 contém os resultados de resistência ao dano por umidade induzida das composições com adição de ADCAP WM. As composições ensaiadas foram condicionadas pelo método Freeze-thaw (F-T) cycles para 1, 3 e 5 ciclos.

Figura 52 – Lottman condicionado F-T (amostras 100% de RAP + ADCAP WM).



Ao analisar a Figura 52 observa-se que as composições com 100% de RAP adicionadas com ADCAP WM apresentaram resultados similares aos obtidos com a amostra 100 P, com exceção dos resultados com 5 ciclos. Isso demonstra que a adição do ADCAP WM não compromete o comportamento de resistência ao dano por umidade induzida das misturas modificadas com ele. Observa-se também que os acréscimos acima do teor ótimo não alteraram as propriedades das misturas ensaiadas.

Ao avaliar as reduções provocadas pelo condicionamento com 3 e 5 ciclos são observadas as seguintes variações:

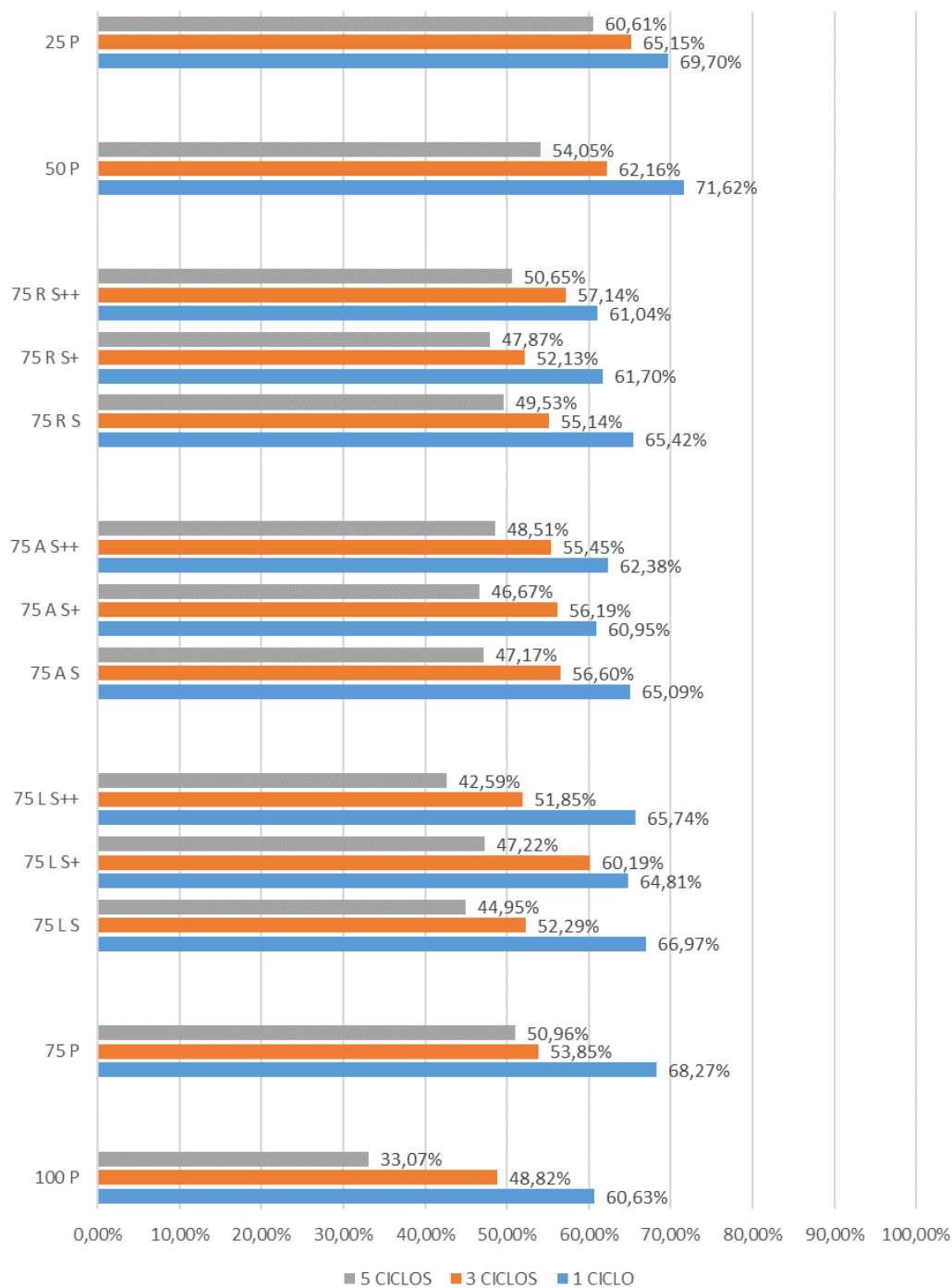
- 4,2% e 16,7% para as amostras 100 S, respectivamente;
- 9,6% e 16,4% para as amostras 100 S +, respectivamente; e
- 14,5% e 10,1% para as amostras 100 S ++, respectivamente.

Ao analisar as composições, após as repetições de condicionamento, é possível observar que a adição de ADCAP WM reduziu a degradação proporcionada pelas repetições de condicionamento nas amostras com teor de 100% de RAP. É perceptível também, a existência de uma tendência de perda de resistência ao dano por umidade induzida com a extensão do condicionamento.

Ao observar as variações apresentadas constata-se que a composição 100 S apresenta a menor redução para o condicionamento de 3 ciclos, enquanto que a composição 100 S ++ é a que possui menor perda quando condicionada a 5 ciclos. Esse ganho de resistência, se comparado com as amostras condicionadas sem adição, sugere que o aumento do teor de ADCAP WM é benéfico as propriedades de resistência ao dano por umidade induzida.



Figura 53 – Lottman condicionado F-T (amostras 75% de RAP + ADCAP WM).



As composições com 75% de RAP adicionadas com ADCAP WM apresentaram resultados equivalentes de resistência ao dano por umidade induzida. Embora os resultados estejam até 3% abaixo da composição 75 P, essa variação não é significativa. Ao analisar as adições acima do teor ótimo, observa-se que o acréscimo

acima do TO de ADCAP WM reduziu levemente os resultados das composições. Entretanto, essa variação também foi muito pequena, estando entre o mínimo de 1% menor e no máximo de 5% menor de resistência ao dano por umidade induzida, fazendo com que essa variação possa ser considerada insignificante. Ao analisar o momento de adição do AR, observa-se que o momento de adição não apresentou grande influência nesse comportamento, tendo as composições analisadas resultados praticamente equivalentes.

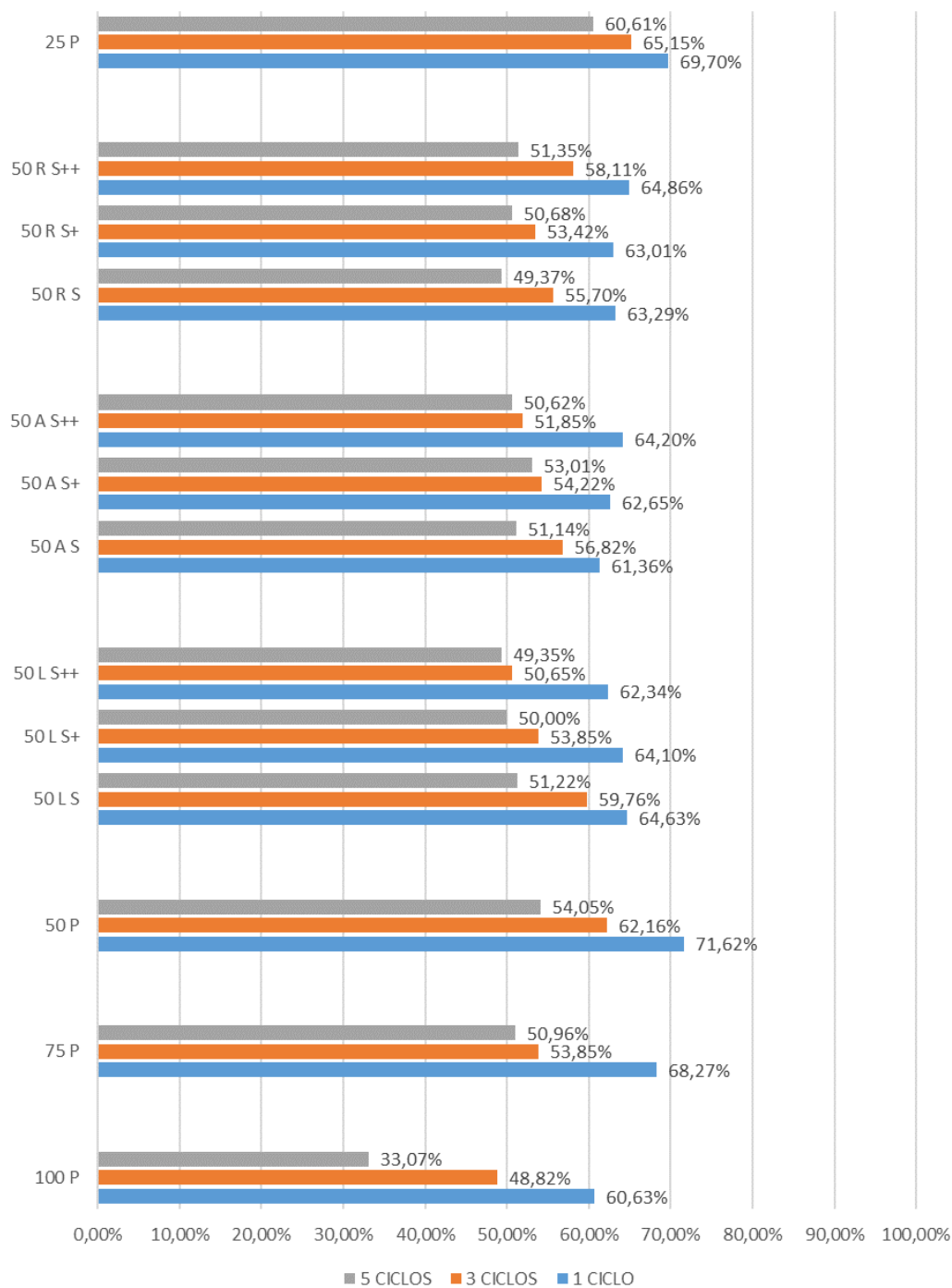
Com a repetição do condicionamento a tendência de redução da resistência ao dano por umidade induzida se manteve, demonstrando ser um comportamento padrão em misturas condicionadas. Na Tabela 41 estão apresentadas as variações observadas entre amostras condicionadas pelo método Freeze-thaw (F-T) cycles para 1, 3 e 5 ciclos.

*Tabela 41 – Variação do Iottman (amostras 75% de RAP + ADCAP WM, em relação a 1 ciclo).*

Amostra	75 RS	75 RS+	75 RS++	75 AS	75 AS+	75 AS++	75 LS	75 LS+	75 LS++
Variação (%)									
3 ciclos	-15,7	-15,5	-6,4	-13,0	-7,8	-11,1	-21,9	-7,1	-21,1
5 ciclos	-24,3	-22,4	-17,0	-27,5	-23,4	-22,2	-32,9	-27,1	-35,0

As amostras apresentaram resultados em um intervalo de variações de 6 a 22% (3 ciclos) e 17 a 35% (5 ciclos). As variações encontradas são similares as encontradas nas composições com óleo residual de motor, entretanto, inexistente a redução de resistência observada nas composições com óleo residual de motor. Esses resultados indicam que o ADCAP WM não interfere nas propriedades de resistência ao dano por umidade induzida nas composições analisadas. Tal característica é de grande importância, pois indica que com a correção das misturas recicladas utilizando doping, essas composições estarão dentro das expectativas de uso em misturas asfálticas.

Figura 54 – Lottman condicionado F-T (amostras 50% de RAP + ADCAP WM).



Ao analisar a Figura 55 observa-se que as amostras com 50% de RAP apresentaram uma redução de resistência de 5 a 10%, quando comparada com a composição 50 P. Essa redução, foi similar à ocorrida com nas composições com 50% de RAP com adição de óleo residual de motor, indicando um possível

comprometimento da composição. Esse resultado diverge dos resultados observados nas composições com 75% de RAP com adição de ADCAP WM, onde estas apresentaram resistência ao efeito do condicionamento gelo e degelo. Entretanto, ao avaliar os resultados entre as composições com 50 e 75% de RAP, os resultados são equivalentes, tendo uma variação de no máximo 3%.

Ao analisar as adições acima do teor ótimo, observa-se que o acréscimo acima do TO de ADCAP WM aumentou levemente os resultados das composições. Entretanto, essa variação foi muito pequena, apresentaram-se no máximo 1% maior, fazendo com que os resultados possam ser considerados constantes. Essa variação pode ser considerada insignificante. Ao analisar o momento de adição do AR, observa-se que o momento de adição não apresentou influência significativa nesse comportamento pois as composições analisadas apresentaram resultados praticamente equivalentes.

Novamente, foi possível observar a redução da resistência ao dano por umidade induzida com a aplicação das repetições de condicionamento. Na Tabela 42 estão apresentadas as variações observadas entre amostras condicionadas pelo método Freeze-thaw (F-T) cycles para 1, 3 e 5 ciclos.

*Tabela 42 – Variação do Iottman (amostras 50% de RAP + ADCAP WM, em relação a 1 ciclo).*

Amostra	50 RS	50 RS+	50 RS++	50 AS	50 AS+	50 AS++	50 LS	50 LS+	50 LS++
Variação (%)									
3 ciclos	-12,0	-15,2	-10,4	-7,4	-13,5	-19,0	-7,6	-16,0	-18,8
5 ciclos	-22,0	-19,6	-20,8	-16,7	-15,4	-21,2	-20,8	-22,0	-20,8

As amostras apresentaram resultados em um intervalo de variações de 7 a 19% (3 ciclos) e 15 a 22% (5 ciclos). As variações encontradas são similares as demais encontradas nessa pesquisa, entretanto para as amostras condicionadas a 5 ciclos a variação máxima foram as menores obtidas. Esse comportamento pode indicar a existência de uma resistência ao acréscimo das repetições de condicionamento de gelo e degelo em composições com 50% de RAP. Entretanto, pela variação pequena

e pela inconstância do padrão observado nas composições de 75% de RAP, é necessária maior quantidade de ensaios e análises para confirmar essa hipótese.

Não existe um consenso quanto ao benefício/malefício no ensaio de resistência ao dano por umidade induzida proporcionado pela adição do RAP em misturas asfálticas. Alguns autores (Luzzi, 2019; Oliveira, 2020; Yousefi et al., 2021; entre outros) identificaram ganhos significativos de resistência ao dano por umidade induzida, obtendo valores entre 90 e 100% desse parâmetro. Entretanto, tais resultados não são absolutos. Outros autores (Suzuki, 2019; Arruda, 2021; entre outros) identificaram perdas da resistência ao dano por umidade induzida. Porém, vale salientar que, em todos os estudos as variações foram pequenas, variando de 1% a 8%.

Ao analisar os resultados de resistência ao dano por umidade induzida encontrados nessa pesquisa, observa-se que variaram entre 60,63 a 71,62%. Yousefi et al. (2021) e Arruda (2021) obtiveram resultados similares, porém nos estudos elaborados pelos autores, os teores máximos de incorporação do RAP foi de 50% da massa total da mistura. Ao avaliar as formas de aplicação e os teores do AR nota-se que não houve influência dessas condições nos resultados obtidos.

Quanto ao condicionamento pelo método Freeze-thaw (F-T) cycles, embora a tendência de diminuição do parâmetro com a sua realização seja perceptível, não é possível encontrar um padrão bem definido para esses resultados. Tal comportamento já era esperado, sendo observado em estudos como: Teltayev et al., 2018; Cong et al., 2020; entre outros.

Ao analisar os efeitos produzidos pelo condicionamento ao envelhecimento, é inquestionável a redução da resistência ao dano por umidade induzida proporcionada pelos ciclos de 3 e 5 dias. As misturas que mais se danificaram com a realização desse condicionamento foram as 100 P, 100 O, 100 O + e 100 O ++. Para os casos das amostras de 100% de RAP com adição de óleo residual de motor, esses resultados confirmam as análises anteriores que indicam uma fragilidade na absorção do AR ao ligante envelhecido. Esse fato, possivelmente, resulta em uma diminuição da adesividade do ligante envelhecido e sua interação com os agregados.

Nas Tabela 43, Tabela 44 e Tabela 45 são mostradas as análises de variância (ANOVA) para o ensaio de lottman condicionado ao F-T. Para esse ensaio, assim como no ensaio de RT, o nível do coeficiente de determinação é de 10%.

*Tabela 43 – ANOVA Lottman condicionado a F-T amostras 1 ciclo.*

ANOVA – R <sup>2</sup> = 0,726380					
FATOR	SS	GL	MS	F	p
TEOR	0,030734	3	0,010245	16,22620	0,000001
AR	0,005239	5	0,001048	1,65964	0,171081
MOMENTO	0,000163	2	0,000081	0,12905	0,879355
ERROR	0,021466	34	0,000631		

*Tabela 44 – ANOVA Lottman condicionado a F-T amostras 3 ciclos.*

ANOVA – R <sup>2</sup> = 0,528016					
FATOR	SS	GL	MS	F	p
TEOR	0,059382	3	0,019794	8,718993	0,000199
AR	0,012776	5	0,002555	1,125568	0,365585
MOMENTO	0,000598	2	0,000299	0,131765	0,876992
ERROR	0,077187	34	0,002270		

*Tabela 45 – ANOVA Lottman condicionado a F-T amostras 5 ciclos.*

ANOVA – R <sup>2</sup> = 0,542702					
FATOR	SS	GL	MS	F	p
TEOR	0,050082	3	0,016694	10,21879	0,000061
AR	0,011314	5	0,002263	1,38514	0,254403
MOMENTO	0,001962	2	0,000981	0,60057	0,554215
ERROR	0,055545	34	0,001634		

Ao contrário dos tópicos anteriores, os resultados de p indicam que apenas a variável teor de RAP apresenta comportamento significativamente diferente, enquanto que, as demais variáveis não atingiram o nível de significância do modelo. Entretanto, é importante observar que os modelos ANOVA desenvolvidos para esse ensaio apresentaram R<sup>2</sup> relativamente baixo, se comparado aos anteriores. Este fato mostra que somente pela variável teor de RAP é possível prever o comportamento da variável lottman condicionada a F-T. Esse comportamento é observado em todas as etapas de condicionamento, mantendo um R<sup>2</sup> relevante.

De forma análoga as realizadas nos tópicos anteriores foram realizados testes de Tukey. Os resultados obtidos nessa nova análise estão expostos nas Tabela 46, Tabela 47, Tabela 48, Tabela 49, Tabela 50 e Tabela 51. Diferente dos resultados obtidos nos tópicos anteriores, as amostras condicionadas LOTA 5 produziram resultados no teste Tukey variáveis, sendo necessária a separação de suas análises. Logo, as análises das tabelas de resultados do teste Tukey podem ter sua análise estendida as demais variáveis de condicionamento.

*Tabela 46 – Teste Tukey para a componente teor de RAP (Lottman NC e STA).*

Tukey teste; variável Lottman			
Grupos homogêneos, alpha = ,05000			
Erro: entre MS = ,00063, df = 34,000			
TEOR	1	2	3
25		****	
50	****		
75	****		
100			****

Ao analisar os resultados expostos na Tabela 46 é possível determinar que as variáveis com teor 50 e 75 apresentam comportamentos similares, enquanto que as demais variáveis diferem entre si. Portanto, as componentes 25 e 100 podem ter seu comportamento determinado pelo ensaio de lottman condicionado F-T, nas condições NC e STA. Para os casos das componentes 50 e 75, também é possível determinar seu comportamento pelo ensaio, no entanto, a diferenciação entre as duas componentes não é possível.

*Tabela 47 – Teste Tukey para a componente agente de reciclagem (Lottman NC e STA).*

Tukey teste; variável Lottman			
Grupos homogêneos, alpha = ,05000			
Erro: entre MS = ,00063, df = 34,000			
AR	1	2	3
O+	****		
O	****	****	
O++	****	****	
S+	****	****	
S++	****	****	
S		****	
P			****

Ao analisar os resultados exposto na Tabela 47, observa-se a formação de três grupos, onde, é possível afirmar que o grupo P foi o único que apresentou comportamento dessa propriedade de forma isolada. As demais componentes apresentaram comportamentos similares, onde: Os grupos O, O +, O ++, S + e S ++ são similares entre si; e os grupos S +, S ++, S, O e O ++ também são similares entre si. Portanto, somente a componente P pode ter seu comportamento determinado pelo ensaio de lottman condicionado F-T, nas condições NC e STA.

*Tabela 48 – Teste Tukey para a componente momento de adição (Lottman NC e STA).*

Tukey teste; variável Lottman Grupos homogêneos, alpha = ,05000 Erro: entre MS = ,00063, df = 34,000		
MOMENTO	1	2
R	****	
L	****	****
A	****	****
S/AR		****

Ao analisar os resultados exposto na Tabela 48, observa-se a formação de dois grupos, onde: as composições A, L e R apresentaram comportamento similares entre si; e as composições L, A e S/AR também são consideradas idênticas. Esse resultado implica que para o ensaio de lottman condicionado F-T, nas condições NC e STA só é possível determinar seu comportamento, quando avaliados os teores distintos entre si (R e S/AR).

*Tabela 49 – Teste Tukey para a componente teor de RAP (Lottman LOTA 5).*

Tukey teste; variável Lottman Grupos homogêneos, alpha = ,05000 Erro: entre MS = ,01005, df = 34,000				
TEOR	1	2	3	4
25	****			
50		****		
75			****	
100				****

Ao analisar os resultados expostos na Tabela 49 é possível determinar que todas as variáveis apresentam comportamentos distintos, sendo possível afirmar que seus comportamentos podem ser determinados separadamente pelo ensaio de lottman condicionado F-T, na condição LOTA 5.



Tabela 50 – Teste Tukey para a componente agente de reciclagem (Lottman LOTA 5).

Tukey teste; variável Lottman Grupos homogêneos, alpha = ,05000 Erro: entre MS = ,01005, df = 34,000	
AR	1
O++	****
O+	****
O	****
S++	****
P	****
S+	****
S	****

Tabela 51 – Teste Tukey para a componente momento de adição (Lottman LOTA 5).

Tukey teste; variável Lottman Grupos homogêneos, alpha = ,05000 Erro: entre MS = ,01005, df = 34,000	
MOMENTO	1
A	****
L	****
R	****
S/AR	****

Para o caso das variáveis agente de reciclagem e momento de adição, os resultados do teste Tukey apresentaram-se similares, onde ao analisar os resultados exposto nas Tabela 50 e Tabela 51, observa-se a formação de um único grupo. Esses resultados implicam que para o ensaio de lottman condicionado F-T, nas condições LOTA 5, essas variáveis não provocam influências nos resultados.

### 4.3 Ensaios de resistência ao trincamento

Nesse tópico estão apresentados os resultados obtidos para os ensaios de fratura por flexão em amostra semicircular e os ensaios de fadiga em corpos de provas semicirculares. Os corpos de provas ensaiados nesse tópico foram condicionados quanto ao envelhecimento das misturas, apresentando as condições: Não condicionado (NC), envelhecidos a curto prazo (STA) e envelhecidos a longo prazo (LOTA). O envelhecimento a longo prazo foi realizado para a condição de 3 e 5 dias a 85°C, que seria equivalente a um desgaste de 7 – 12 e 12 – 23 meses, respectivamente (Yin et al., 2017). Para facilitar as análises serão usadas as

abreviações, para o condicionamento a longo prazo serão utilizadas as abreviações: LOTA 3, para a condição de 3 dias, e LOTA 5, para a condição de 5 dias.

As amostras com teores de acréscimo +25% de agente de reciclagem não foram realizadas para esses ensaios. A opção por não realizar os ensaios de trincamento em amostras com teores de acréscimo de +25% de AR se deu devido as tendências observadas em análises dos ensaios de RT e MR. Para esses ensaios, as composições ensaiadas apresentaram perdas de resultados de RT e MR com o acréscimo do AR. Como o teor de acréscimo de +25% de AR é um ponto médio de adição, supõe-se que ao realizar ensaios em amostras correspondentes de extremidade de adição, os valores referentes ao teor +25% de AR se encontrará no intervalo desses resultados.

#### **4.3.1 Fadiga em corpos de prova semicirculares**

Para os ensaios fadiga em corpos de prova semicirculares foram obtidos os números de ciclos totais até a ruptura do corpo de prova e montadas as curvas de vida de fadiga (Nº de ciclos x tensão). Logo, para o estabelecimento das curvas utilizou-se, nesta pesquisa, os modelos de regressão do tipo  $Nf = K\sigma^n$ , sendo possível estimar a sua precisão por meio do  $R^2$ . As *Tabela 52*, *Tabela 53*, *Tabela 54* e *Tabela 55* foram elaboradas utilizando os parâmetros de regressão e as deformações na ruptura.

Tabela 52 – Coeficientes de regressão para as amostras não condicionadas.

Condicionamento FAIXA / Variáveis	Não condicionadas (NC)			
	K	n	R <sup>2</sup>	Deformação na ruptura
100 P	63,59	-14,900	0,9113	0,20
75 P	847,46	-6,565	0,9556	0,9±0,1
50 P	103,35	-10,120	0,8916	1,5±0,2
25 P	140,75	-6,468	0,9787	3,0±0,3
100 O	74,10	-7,402	0,7802	0,3±0,1
100 O++	39,71	-6,656	0,9230	0,5±0,2
75 L O	4,16	-7,361	0,8874	2,0±0,4
75 L O++	26,56	-2,706	0,8289	2,2±0,1
75 A O	137,37	-4,292	0,9435	2,2±0,2
75 A O++	34,24	-4,008	0,9705	2,4±0,2
75 R O	14,87	-4,978	0,8925	2,0±0,4
75 R O++	0,06	-7,975	0,9808	2,1±0,2
50 L O	2,29	-6,522	0,9583	1,9±0,3
50 L O++	43,04	-3,715	0,9779	2,0±0,4
50 A O	1,59	-6,870	0,9520	2,8±0,2
50 A O++	14,71	-3,411	0,9783	2,8±0,4
50 R O	67,93	-4,849	0,9649	2,0±0,2
50 R O++	1,70	-7,993	0,9649	2,5±0,1
100 S	1647,50	-7,503	0,9543	0,30
100 S++	211,74	-5,663	0,9458	0,6±0,2
75 L S	485,52	-8,925	0,8919	1,3±0,2
75 L S++	907,35	-8,675	0,9295	1,3±0,3
75 A S	3508,50	-6,604	0,9232	1,6±0,3
75 A S++	187,82	-7,433	0,8976	1,7±0,1
75 R S	1138,00	-5,675	0,9363	1,8±0,3
75 R S++	886,69	-4,211	0,8300	1,6±0,4
50 L S	278,64	-6,024	0,9224	1,7±0,1
50 L S++	1031,80	-5,544	0,9977	1,2±0,2
50 A S	207,11	-6,173	0,9504	2,30
50 A S++	79,90	-5,002	0,9971	2,4±0,1
50 R S	516,34	-3,624	0,9966	2,1±0,3
50 R S++	318,54	-4,545	0,9100	2,1±0,1

Tabela 53 – Coeficientes de regressão para as amostras condicionadas a curto prazo (STA).

Condicionamento FAIXA / Variáveis	STA			
	k	n	r <sup>2</sup>	Deformação na ruptura
100 P	21247,00	-10,510	0,9660	0,3 ±0,2
75 P	3817,70	-8,918	0,8742	0,7±0,2
50 P	3369,60	-15,270	0,9937	1,2±0,3
25 P	359,85	-6,967	0,9363	2,4±0,4
100 O	135,49	-6,410	0,9743	0,7±0,1
100 O++	222,03	-3,656	0,9036	1,0±0,1
75 L O	132,09	-7,498	0,9617	1,3±0,2
75 L O++	214,68	-2,845	0,8370	2,0±0,1
75 A O	1553,60	-9,022	0,9535	0,8±0,1
75 A O++	194,61	-8,978	0,9775	1,0±0,1
75 R O	145,39	-7,471	0,9797	0,50
75 R O++	127,80	-5,687	0,9646	0,9±0,1
50 L O	216,05	-7,979	0,9424	1,7±0,2
50 L O++	173,25	-4,495	0,9842	1,6±0,5
50 A O	269,88	-9,382	0,9896	1,3±0,1
50 A O++	127,80	-5,687	0,9646	1,6±0,1
50 R O	1222,40	-7,160	0,9866	1,6±0,3
50 R O++	733,44	-6,081	0,9528	1,20
100 S	2677,70	-6,575	0,9181	0,40
100 S++	739,12	-4,837	0,9147	0,30
75 L S	2091,30	-16,410	0,9691	1,6±0,1
75 L S++	2097,80	-5,903	0,9614	1,60
75 A S	24627,00	-15,080	0,9835	1,8±0,2
75 A S++	1000,20	-7,771	0,9624	1,1±0,1
75 R S	2181,40	-7,113	0,9845	0,5±0,1
75 R S++	1669,60	-6,744	0,9588	0,60
50 L S	4747,80	-6,428	0,9630	1,8±0,3
50 L S++	2103,80	-4,535	0,9988	1,6±0,2
50 A S	9955,20	-7,700	0,9200	1,8±0,2
50 A S++	4156,60	-4,683	0,9846	1,80
50 R S	4466,30	-9,064	0,9944	1,5±0,2
50 R S++	1516,10	-4,497	0,9600	1,60

Tabela 54 – Coeficientes de regressão das amostras condicionadas a longo prazo, 3 dias (LOTA 3).

Condicionamento FAIXA / Variáveis	LOTA 3			
	k	n	r <sup>2</sup>	Deformação na ruptura
100 P	27535,00	-11,220	0,9817	0,3±0,1
75 P	13820,00	-10,630	0,9902	0,50
50 P	31053,00	-11,570	0,9981	1,00
25 P	997,41	-11,990	0,9875	1,40
100 O	71,73	-10,050	0,9714	0,6
100 O++	104,33	-8,798	0,9969	0,7±0,2
75 L O	573,17	-6,642	0,9771	0,50
75 L O++	344,14	-6,744	0,9595	0,70
75 A O	4824,60	-6,048	0,9676	0,5±0,2
75 A O++	1419,10	-5,644	0,9660	0,90
75 R O	418,92	-7,994	0,9748	0,6±0,3
75 R O++	185,02	-4,998	0,9788	1,00
50 L O	426,94	-6,454	0,9944	1,5±0,2
50 L O++	45,39	-6,909	0,9968	1,8±0,1
50 A O	1887,10	-6,150	0,9806	1,5±0,2
50 A O++	1476,20	-6,166	0,9830	1,80
50 R O	3576,20	-7,327	0,9998	0,40
50 R O++	746,67	-7,033	0,9855	0,70
100 S	5424,20	-7,740	0,9367	0,3±0,1
100 S++	1194,20	-4,953	0,9484	0,4±0,1
75 L S	8377,40	-9,215	0,9669	0,80
75 L S++	2259,70	-5,499	0,9620	0,90
75 A S	5317,10	-7,798	0,9865	0,80
75 A S++	2518,80	-7,609	0,9076	1,00
75 R S	8829,10	-9,292	0,9888	0,4±0,1
75 R S++	1593,60	-5,042	0,9789	0,5±0,1
50 L S	5434,10	-5,921	0,8967	1,2±0,1
50 L S++	2450,80	-9,181	0,8973	1,1±0,1
50 A S	13010,00	-8,681	0,9678	0,8±0,2
50 A S++	87129,00	-12,620	0,9868	0,9±0,1
50 R S	4302,60	-8,911	0,9615	0,5±0,1
50 R S++	1669,60	-6,744	0,9588	0,5±0,1

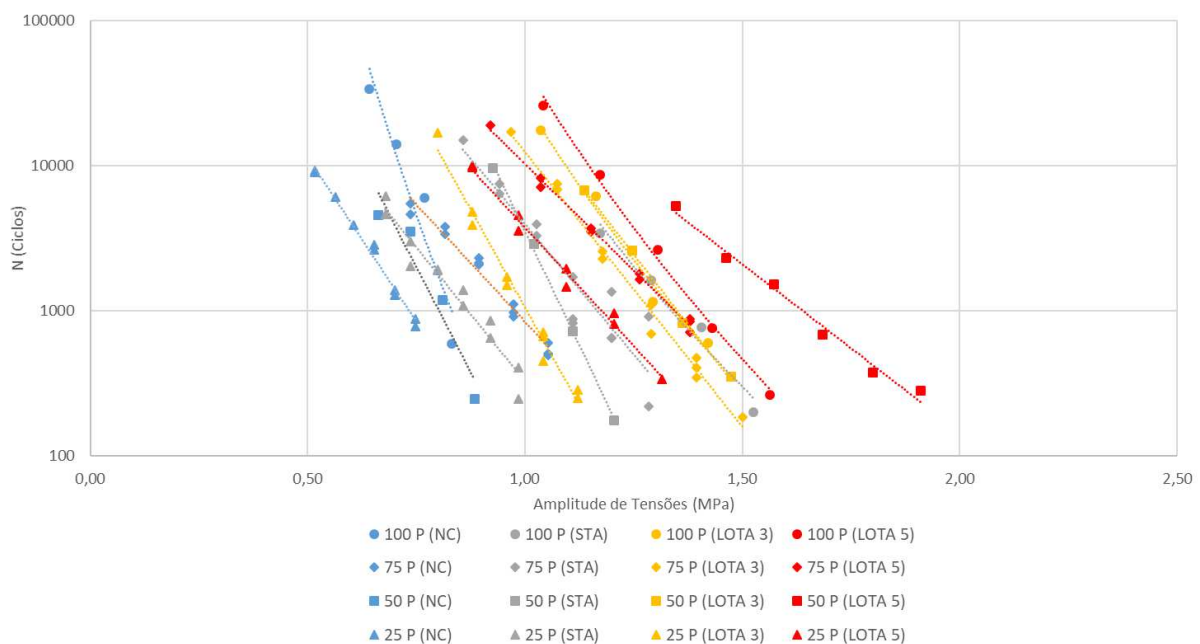
Tabela 55 – Coeficientes de regressão das amostras condicionadas a longo prazo, 5 dias (LOTA 5).

Condicionamento FAIXA / Variáveis	LOTA 5			
	k	n	r <sup>2</sup>	Deformação na ruptura
100 P	48242,00	-11,450	0,9951	0,20
75 P	10422,00	-7,839	0,9947	0,6±0,1
50 P	66823,00	-8,622	0,9915	0,90
25 P	3561,50	-8,026	0,9880	1,2±0,3
100 O	121,68	-11,780	0,9608	0,4±0,1
100 O++	195,66	-6,825	0,9872	0,40
75 L O	714,16	-9,091	0,9724	0,5±0,3
75 L O++	1470,60	-7,587	0,9822	0,70
75 A O	41463,00	-10,560	0,9682	0,5±0,1
75 A O++	8427,20	-5,974	0,9170	0,30
75 R O	553,16	-6,921	0,9553	0,4±0,3
75 R O++	440,71	-4,092	0,9687	0,50
50 L O	1406,90	-12,840	0,9877	0,9±0,1
50 L O++	661,90	-10,200	0,9636	0,80
50 A O	1773,70	-7,133	0,9964	0,80
50 A O++	2140,20	-5,570	0,8624	1,10
50 R O	6488,50	-8,879	0,8636	0,9±0,1
50 R O++	2032,30	-7,009	1,0000	0,80
100 S	4523,30	-6,262	0,9299	0,4±0,1
100 S++	2417,10	-6,046	0,9341	0,4±0,1
75 L S	55355,00	-12,390	0,9663	0,9±0,1
75 L S++	9034,80	-5,818	0,9567	0,9±0,1
75 A S	22420,00	-7,793	0,9444	1,3±0,1
75 A S++	10925,00	-7,439	0,9626	1,2±0,2
75 R S	16333,00	-8,663	0,9451	0,30
75 R S++	5636,30	-7,299	0,9700	0,50
50 L S	10155,00	-6,778	0,9604	0,8±0,1
50 L S++	7317,70	-9,102	0,9527	0,70
50 A S	97192,00	-13,500	0,9865	0,6±0,1
50 A S++	55239,00	-7,552	0,9799	0,8±0,1
50 R S	5456,40	-7,411	0,9708	0,3±0,2
50 R S++	2490,80	-5,999	0,9479	0,40

#### 4.3.1.1 Sem agente de reciclagem

Os gráficos de Wöhler apresentados nas Figura 55, Figura 56, Figura 57, Figura 58, Figura 59, Figura 60 e Figura 61 foram elaboradas com os dados das Tabela 52, Tabela 53, Tabela 54 e Tabela 55. Os gráficos de Wöhler consistem em retas para os resultados de número de ciclos (Nf) versus diferenças de tensões ( $\Delta\sigma$ ) e números de ciclos (Nf) versus deformação específica resiliente ( $\Delta\varepsilon$ ). Entretanto, para essa pesquisa só será abordado o primeiro caso, devido à baixa precisão dos parâmetros de deformação captados pelo software usado. Na Figura 55 estão representadas as curvas de fadiga para as composições sem adição do agente de reciclagem.

Figura 55 – Curvas de fadiga amostras sem AR.



Ao analisar a Figura 55 observa-se que os acréscimos de RAP nas composições ensaiadas aumentaram o desempenho de vida de fadiga das misturas asfálticas. Entretanto, as composições apresentam menores deformações até a ruptura com o acréscimo do RAP, indicando um comportamento mais frágil das composições com altos teores de RAP.

As composições com altos teores de RAP apresentam vida de fadiga maior que as composições com menos (25 P < 50 P < 75 P < 100 P). Porém, por ter baixa capacidade de deformação, essas composições ao serem sujeitas a um carregamento

elevado irão romper mais rápido devido à redução na tenacidade após a falha. Neste cenário de baixa capacidade de deformação, ocorre a inversão da qualidade das composições na vida de fadiga (25 P > 50 P > 75 P > 100 P). O alto carregamento suportado por misturas com altos teores de RAP, se torna um ponto positivo para essas composições, porém, a baixa capacidade de deformação torna-se um limitante muito importante. Esse fato, por si só, não inviabiliza a utilização da mistura asfáltica com essas composições, entretanto restringe a sua utilização e aumenta a rigurosidade quanto a sua aplicação e vida útil. Esse comportamento foi similar aos observados por Godoi (2017), Luzzi (2019), Suzuki (2019), Arruda (2021), entre outros.

Ao analisar o efeito do condicionamento ao envelhecimento das composições, observa-se que com o prolongamento do condicionamento as amostras aumentam o número de ciclos suportados, porém, diminuem a capacidade de deformação. Esse comportamento deixa claro a efetividade desses procedimentos. De uma forma geral, todas as composições apresentaram as mesmas tendências das composições não condicionadas, aumentando a vida de fadiga com o aumento do RAP.

É importante pontuar que, as amostras 100 P condicionadas apresentaram comportamentos semelhantes, estando elas próximas entre si e alocadas mais a direita no gráfico. Por apresentarem-se com comportamentos similares, é possível que as amostras tenham chegado ao limite de desgaste oxidativo, estando no fim de sua vida útil. Outros pontos que podem ser observados, são:

- A curva 25 P (STA) apresentam comportamento similar a curva 50 P (NC);
- A curva 25 P (LOTA 3) apresentam comportamento similar a curva 75 P (NC);
- A curva 25 P (LOTA 5) apresentam comportamento similar a curva 75 P (STA);
- A curva 50 P (LOTA 5) apresentou a maior vida de fadiga mantendo uma deformação “aceitável”, em torno de 0,9 mm.

O comportamento visto na curva 25 P deixa claro a evolução do envelhecimento dessa mistura, podendo ser um ponto de análise futura. Num quadro geral, é possível atribuir que a melhor curva quanto ao envelhecimento é a 50 P, por

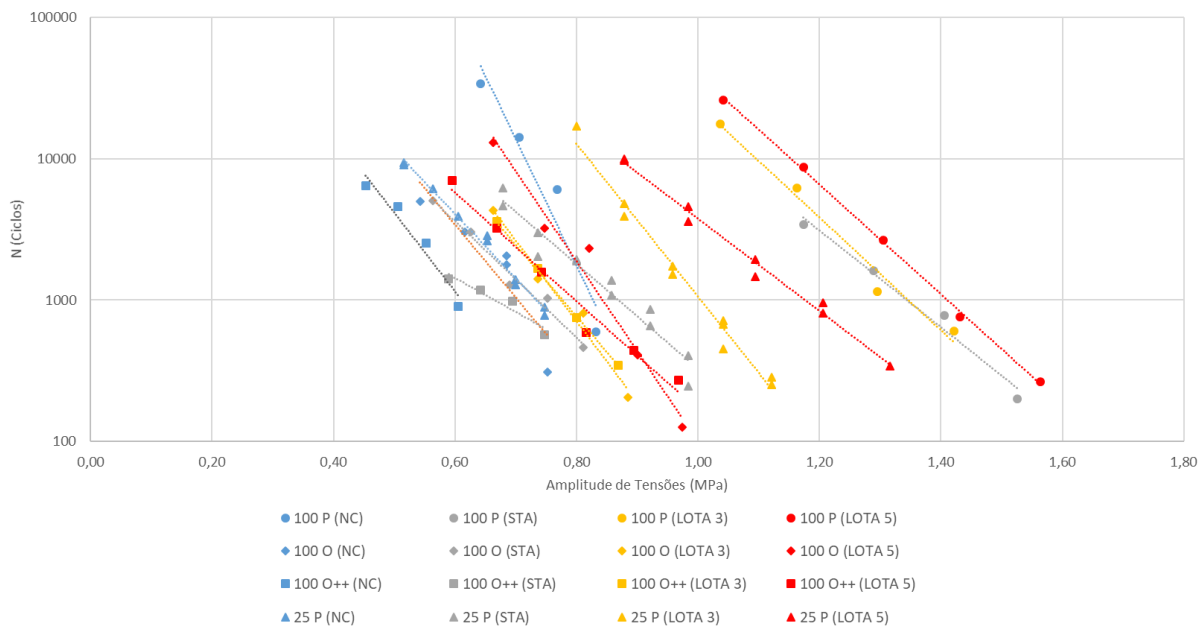


ter uma boa vida de fadiga, uma capacidade de deformação regular e a maior concentração de RAP sem perder grande parte dessas características. Porém, como dito anteriormente, as composições 75 P também podem ser utilizadas com restrições e maior fiscalização.

#### 4.3.1.2 Óleo residual de motor

Na Figura 55 estão representadas as curvas de fadiga para as composições de 100% de RAP sem e com adição do agente de reciclagem (óleo residual de motor).

Figura 56 – Curvas de fadiga amostras 100% RAP com e sem óleo residual de motor.



A Figura 56 ilustra que a adição do óleo residual de motor diminui a vida de fadiga das composições. Ao avaliar as curvas observa-se que a composição 100 O apresenta graficamente comportamento similar a composição 25 P, tida como uma amostra de referência e com bom desempenho de vida de fadiga. Entretanto, as deformações ocorridas nas composições 100 O e 25 P apresentam grande divergência, enquanto que as amostras 25 P apresentaram deformações de  $3,0 \pm 0,3$  mm, as amostras 100 O apresentaram deformações de  $0,3 \pm 0,1$  mm. Essa baixa deformação demonstra uma fragilidade das composições 100 O. É possível observar também que a composição 100 O ++, também apresenta redução, porém

em maior escala. A princípio esperava-se que a medida que a rigidez diminuísse, a capacidade de deformação aumentasse. Entretanto, tal comportamento não foi possível observar nessas composições. O aumento da capacidade de deformação, embora tenha ocorrido, foi muito baixo, ainda caracterizando as composições como misturas frágeis.

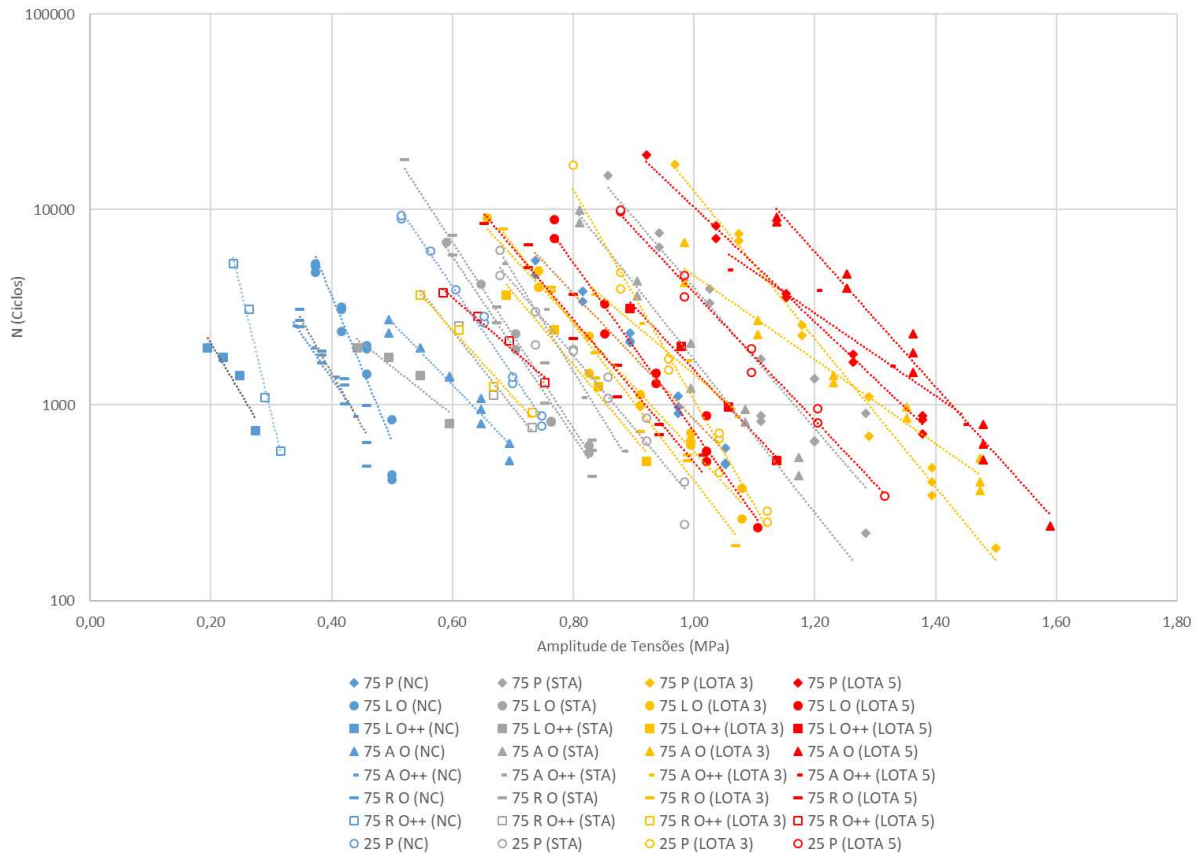
Esse comportamento pode ter ocorrido devido a fragilização da adesividade proporcionada pela a adição do óleo residual de motor diretamente sobre os agregados, fato já cogitado anteriormente. Esse fato ainda carece de confirmação, porém, se o mesmo comportamento for observado nas misturas com 75% e 50% de RAP que tiveram o óleo residual de motor adicionado diretamente nos agregados (composições A e R), esse comportamento pode ser confirmado.

As aplicações do condicionamento ao envelhecimento nas amostras apresentaram as mesmas tendências das amostras anteriores. Entretanto, observa-se que as adições retardaram o envelhecimento, ou aumento de rigidez. Devido as deformações obtidas, é possível dizer que não houve retardo de envelhecimento, somente uma diminuição da rigidez. Todas as composições após condicionamento ao envelhecimento apresentaram resultado menores que os observados para a mistura 100 P (NC). As composições 100 O e 100 O ++ (NC, STA, LOTA 3 e LOTA 5) apresentaram resultados de desempenho de vida de fadiga inferiores que as composições 25 P (LOTA 3 e 5), tendo como melhor desempenho a composição 100 O (LOTA 5), com resultados similares a composição 25 P (STA).

Ao analisar as curvas de fadiga é possível dizer que é inviável a utilização das composições 100 O e 100 O ++ em misturas asfálticas. Tal análise se dá devido à baixa vida de fadiga, baixa resistência e baixa capacidade de deformação.

Na Figura 55 estão representadas as curvas de fadigas para as composições de 75% de RAP sem e com adição do agente de reciclagem (óleo residual de motor).

Figura 57 – Curvas de fadiga amostras 75% RAP com e sem óleo residual de motor.

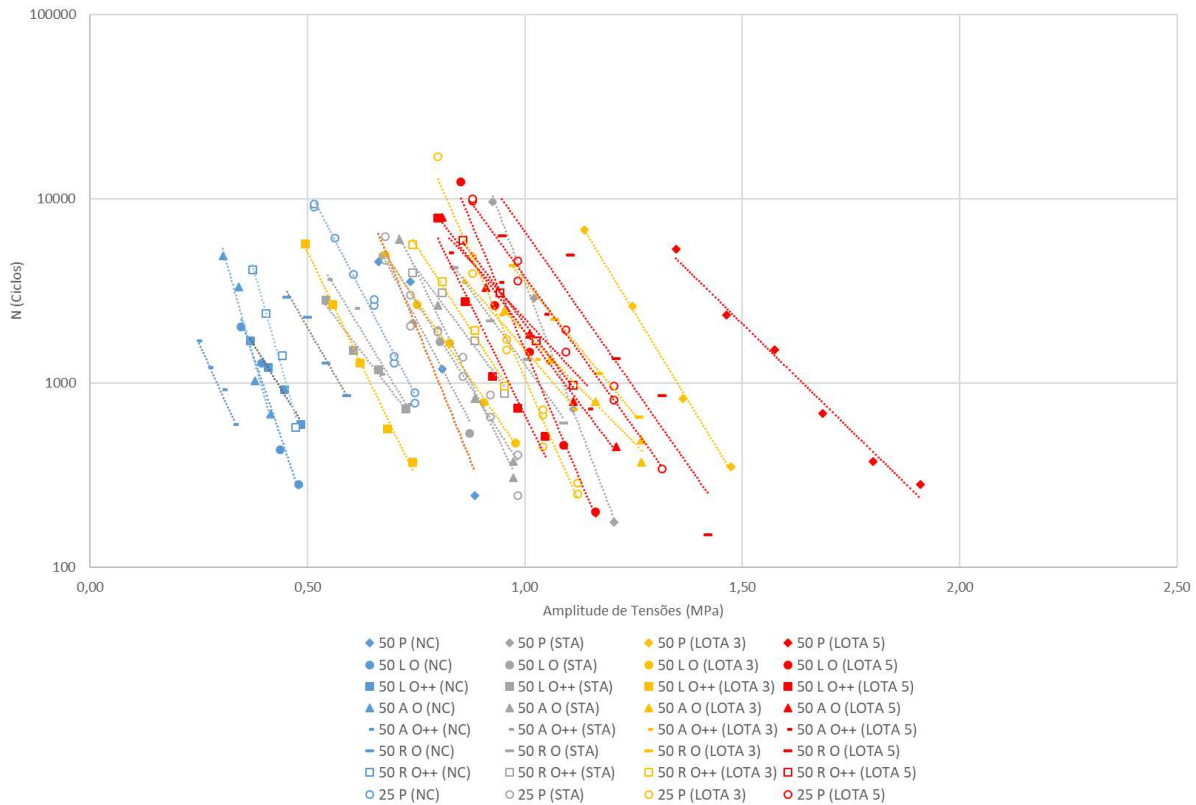


Analisando a Figura 57 é possível observar que a adição do óleo residual de motor reduziu a vida de fadiga das composições com 75% de RAP, similar ao ocorrido nas composições com 100% de RAP. Algumas composições (75 L O e 75 R O ++) apresentaram maior inclinação da curva, o que indica um comportamento mais frágil da mistura, suportando um maior carregamento sem deformação até próximo a carga de ruptura. Embora tenha ocorrido perda de vida de fadiga, para as amostras sem condicionamento, a deformação na ruptura dessas composições foi aumentada. Enquanto que a amostra 75 P teve  $0,9 \pm 0,1$  mm de deformação na ruptura, as demais composições com 75% de RAP adicionadas com óleo residual de motor, apresentaram em média deformações na ruptura de  $2,0 \pm 0,4$  mm. O que demonstra um comportamento dúctil das composições com 75% de RAP adicionadas com óleo residual de motor, permitindo a deformação e a recuperação sem causar grandes danos.

A realização do condicionamento ao envelhecimento aumentou a vida de fadiga das composições condicionadas. Ao analisar a Figura 57 não é possível determinar um padrão de desempenho de vida de fadiga para as amostras condicionadas, porém, as deformações obtidas diminuem significativamente durante o progresso do envelhecimento. As composições 75% RAP NC apresentaram deformação na ruptura de  $2,0 \pm 0,4$  mm, enquanto que as composições 75% RAP STA, LOTA 3 e LOTA 5 apresentaram deformação na ruptura de  $1,4 \pm 0,7$  mm,  $0,6 \pm 0,4$  mm e  $0,4 \pm 0,4$  mm, respectivamente. Tal comportamento indica que as composições analisadas vão apresentar comportamento dúctil durante toda a vida útil do pavimento, 23 meses em climas frios (de acordo com Yin et al., 2017) ou 7 a 10 anos (de acordo com a norma AASHTO R30). Esse fato pode ser importante na determinação da utilização dessas composições.

Ao avaliar as curvas de fadiga com 75% de RAP modificadas com óleo residual de motor é possível dizer que as composições propostas nessa pesquisa são viáveis para utilização em pavimentos, sendo necessário um acompanhamento e fiscalização durante a sua vida útil, pois potencialmente será menor. Na Figura 55 estão representadas as curvas de fadigas para as composições de 50% de RAP sem e com adição do agente de reciclagem (óleo residual de motor).

Figura 58 – Curvas de fadiga amostras 50% RAP com e sem óleo residual de motor.



Assim como aconteceu com as composições de 75% de RAP adicionadas com óleo residual de motor, as composições de 50% apresentaram os mesmos comportamentos. A adição de óleo residual de motor diminui a vida de fadiga das composições, sendo essa uma diminuição significativa, porém, a deformação na ruptura aumenta, saindo de  $1,5 \pm 0,2$  mm (50 P) para  $2,3 \pm 0,7$  mm.

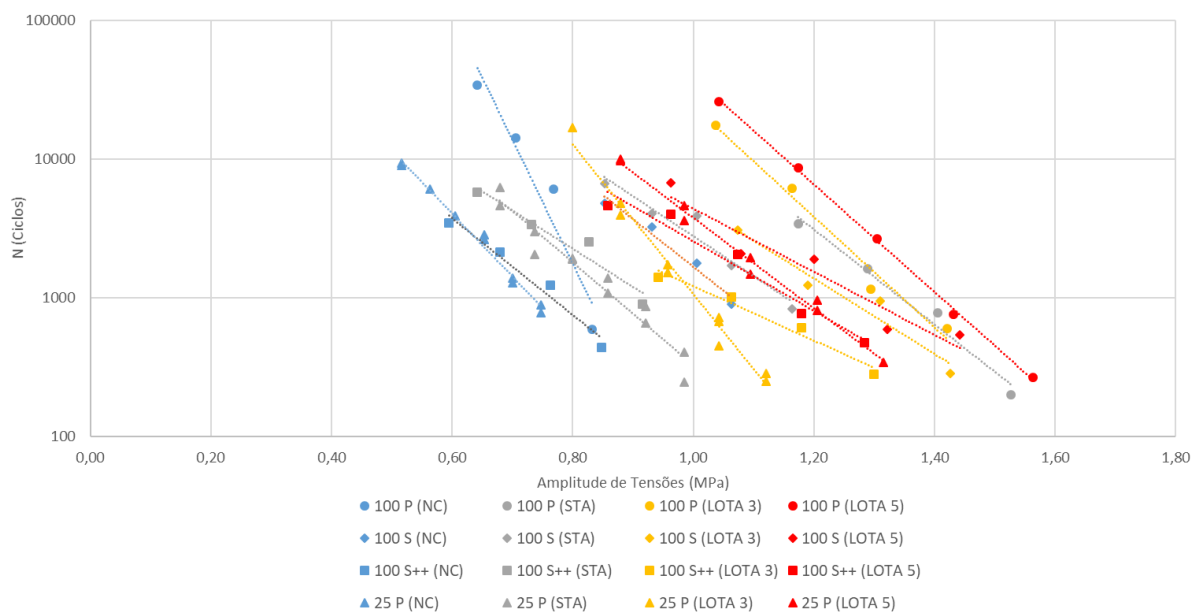
Quanto ao condicionamento ao envelhecimento, foi observado o aumento da vida de fadiga e diminuição a deformação na ruptura. Enquanto que as composições 75% RAP NC apresentaram deformação na ruptura de  $2,0 \pm 0,4$  mm, as composições 75% RAP STA, LOTA 3 e LOTA 5 apresentaram deformação na ruptura de  $1,7 \pm 0,5$  mm,  $1,1 \pm 0,7$  mm e  $1,0 \pm 0,2$  mm, respectivamente. A rigidez dessas composições condicionadas LOTA 5, apresentaram-se próximas a rigidez das composições 75 P. Esse comportamento indica que as amostras, se não sobrecarregadas, poderão ter uma vida útil estendida, suportando maiores carregamento no decorrer desse tempo.

Todas as composições com 50% RAP adicionadas com óleo residual de motor são viáveis a utilização na pavimentação. Entretanto, devem ser observados os carregamentos aplicados, já que as tensões suportadas são menores quando comparados com composições como as 25 P e 50 P.

#### 4.3.1.3 ADCAP WM

Na Figura 55 estão representadas as curvas de fadiga para as composições de 100% de RAP sem e com adição do agente de reciclagem (ADCAP WM).

Figura 59 – Curvas de fadiga amostras 100% RAP com e sem ADCAP WM.



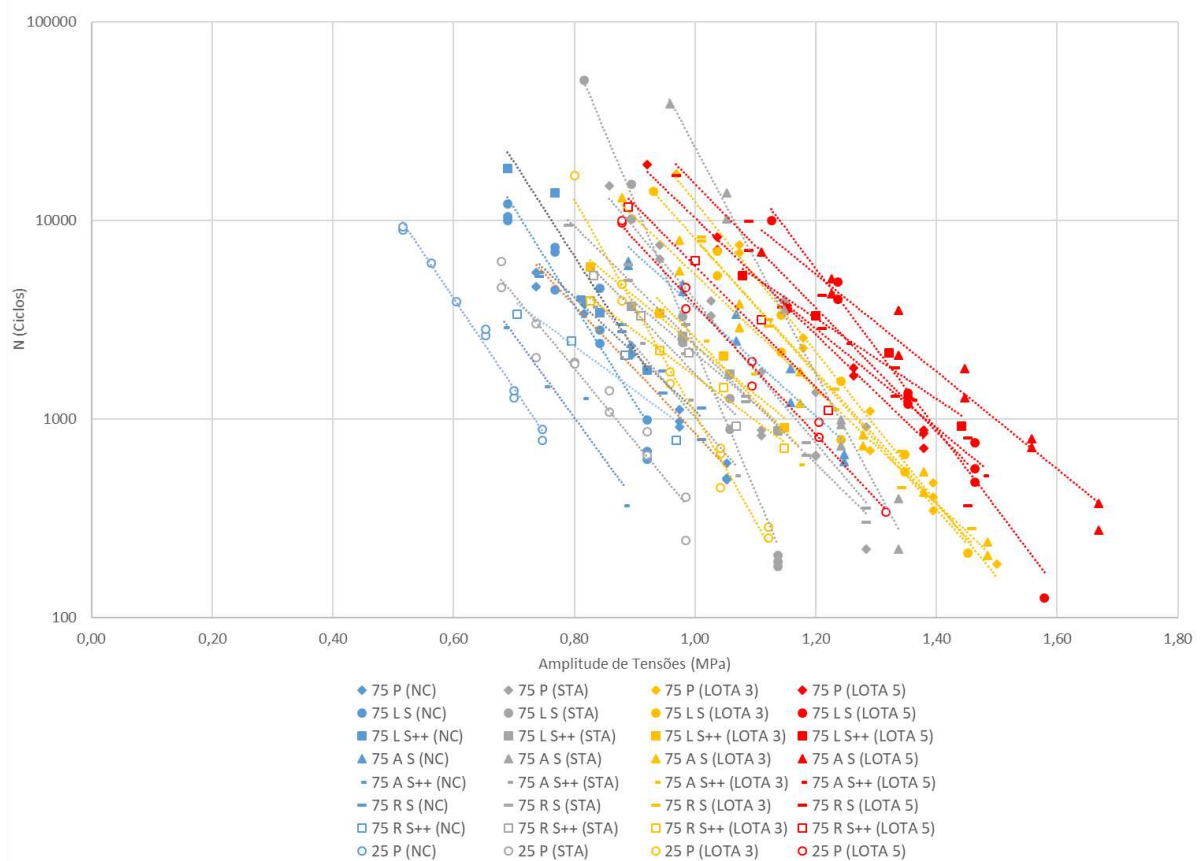
Os resultados apresentados na Figura 59 ilustram que a composição 100 S ++ apresenta comportamento similar a composição 25 P. Entretanto, diferente da composição 25 P, a composição 100 S ++ apresenta deformação na ruptura inferior. Tal comportamento se repete nas condições de condicionamento ao envelhecimento, sendo assim, a composição 100 S ++ é inviável para utilização em pavimentos, pois apresenta baixa vida de fadiga e baixa capacidade de deformação. Embora a composição 100 S apresente uma vida de fadiga maior entre as analisadas, a mesma apresentou deformação equivalente a composição 100 P. Essa rigidez excessiva

torna difícil a utilização dessa composição em pavimento, já que toda a estrutura deverá ser dimensionada para baixas condições de deformação.

Quanto ao condicionamento ao envelhecimento as amostras apresentaram aumento da vida de fadiga das composições condicionadas. Mas, ao contrário, do que aconteceu nas amostras modificadas com óleo residual de motor, as amostras modificadas com ADCAP WM e condicionadas LOTA 5 apresentaram comportamento próximos as amostras 100 P.

Na Figura 60 estão representadas as curvas de fadigas para as composições de 75% de RAP sem e com adição do agente de reciclagem (ADCAP WM).

Figura 60 – Curvas de fadiga amostras 75% RAP com e sem ADCAP WM.



Por meio do gráfico é possível identificar que não houve alteração significativa as composições com a adição do ADCAP WM. Apenas duas composições apresentaram variações no comportamento: 75 A S que aumentou a vida de fadiga e 75 A S ++ que diminuiu. Entretanto, ao analisar as deformações na ruptura observa-

se um aumento nos níveis de deformação. A deformação observada nas composições 75% RAP com ADCAP WM foram equivalentes as composições 50 P, considerada até o momento uma das melhores opções analisadas. Tais características indicam que a mistura 75 A S apresenta potencial de uso em pavimento, pois, possui o melhor desempenho de vida de fadiga com o maior teor de RAP, e apresenta considerável capacidade de deformação.

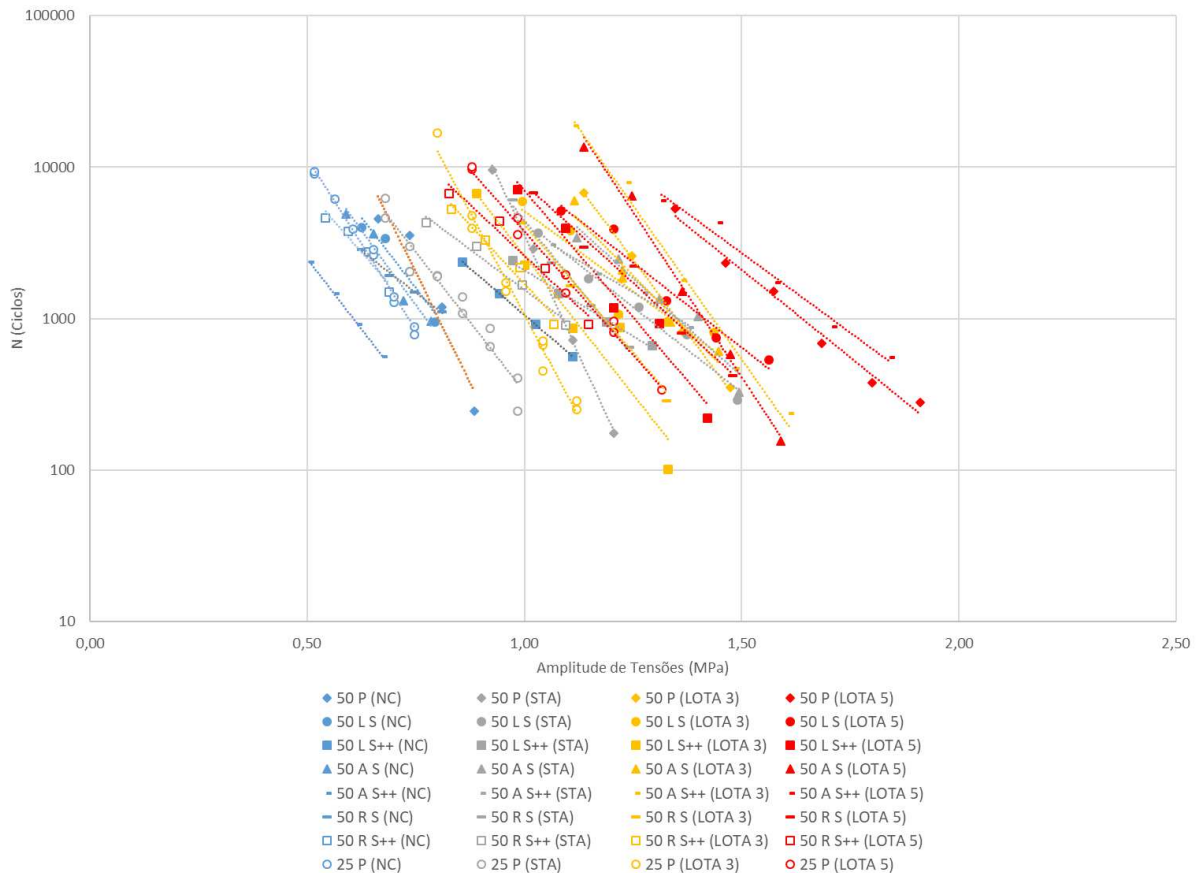
Após realização do condicionamento ao envelhecimento foi observado o aumento da vida de fadiga das composições condicionadas e diminuição da capacidade de deformação. Entretanto, com o condicionamento as composições 75 R S e 75 R S ++, apresentaram uma perda significativa na capacidade de deformação, tornando-se misturas mais frágeis. Esse comportamento indica um processo de envelhecimento mais acentuado nessas composições o que potencialmente inviabilizaria sua execução.

De forma geral, as amostras 75 A S, 75 A S ++, 75 L S e 75 L S++ são viáveis e irão desempenhar suas funções adequadamente durante sua vida útil, estando de certa forma com desempenho ainda satisfatório após 7 ou 10 anos (AASHTO R30). As composições 75 R S e 75 R S ++, assim como as composições 75% RAP com óleo residual de motor, poderão ser aplicadas. Entretanto, a sua vida útil será menor que as outras aqui listadas.

Na Figura 55 estão representadas as curvas de fadigas para as composições de 50% de RAP sem e com adição do agente de reciclagem (ADCAP WM).



Figura 61 – Curvas de fadiga amostras 50% RAP com e sem ADCAP WM.



Por meio do gráfico é possível identificar que não houve alteração significativa as composições com a adição do ADCAP WM. Apenas duas composições apresentaram variações de comportamento: 50 L S ++ que aumentou a vida de fadiga e 50 A S ++ que diminuiu. Entretanto, ao analisar as deformações na ruptura observa-se um aumento nos níveis de deformação, comportamento similar ao que aconteceu nas composições com 75% RAP com ADCAP WM. A deformação observada nas composições 50% RAP com ADCAP WM foram equivalentes as composições 25 P, considerada até o momento uma das melhores opções analisadas. Tais características indicam que a mistura 50 L S ++ apresenta potencial de uso em pavimento, pois, além de possuir um bom desempenho de vida de fadiga, apresenta considerável capacidade de deformação.

Com o condicionamento ao envelhecimento das amostras foi observado o mesmo comportamento que em ensaios anteriores, aumentando a vida de fadiga das

composições condicionadas e diminuindo a capacidade de deformação. Entretanto, com o condicionamento, as composições 50 R S e 50 R S ++ apresentaram uma perda significativa na capacidade de deformação, tornando-se misturas mais frágeis. Esse comportamento indica um processo de envelhecimento mais acentuado nessas composições o que potencialmente inviabilizaria sua execução.

De forma geral, as amostras 50 A S, 50 A S ++, 50 L S e 50 L S++ são viáveis e irão desempenhar suas funções adequadamente durante sua vida útil, apresentando desempenho satisfatório após 7 ou 10 anos (AASHTO R30). As composições 50 R S e 50 R S ++, assim como as composições 75 R S e 75 R S ++, poderão ser aplicadas, porém, a sua vida útil será menor que as outras aqui listadas. Embora seja possível a sua utilização, não existe benefícios na adição do ADCAP WM diretamente sobre o RAP, devendo ser optado por outro sistema de produção de misturas recicladas.

#### **4.3.2 Fratura por flexão em amostra semicircular**

Os ensaios de fratura por flexão em amostra semicircular foram realizados em 3 corpos de prova de cada composição, em uma temperatura de 25 °C, com taxa de deslocamento de  $5,0 \pm 0,1$  mm/min até a ruptura total do corpo de prova ensaiado. Parâmetros comuns as normas BS EN 12697-44 e AASHTO T 394-21, que embora o ensaio se desenvolva em condições próximas, possuem análises distintas. Nesse trabalho serão abordadas as duas metodologias.

##### **4.3.2.1 Fratura por flexão em amostra semicircular pela norma BS EN 12697-44**

Neste ensaio foi utilizada a metodologia preconizada na norma BS EN 12697-44 e os dados obtidos como resposta foram: deflexão máxima ( $\delta_{m\acute{a}x}$ ), porcentagem de deformação na tensão máxima ( $\varepsilon_{m\acute{a}x}$ ) e resistência ao trincamento máximo ( $\sigma_{m\acute{a}x}$ ). Estes resultados estão apresentados nas Tabela 56, Tabela 57, Tabela 58 e Tabela 59.

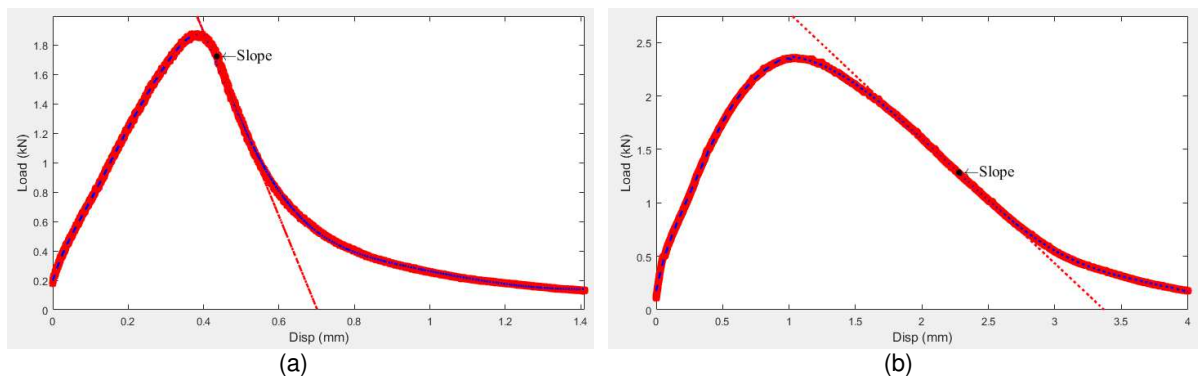
Tabela 56 – SCB de acordo com a norma BS EN 12697-44, NC.

faixa	$\delta_{\text{máx}}$ (mm)	desvio padrão	$\epsilon_{\text{máx}}$ (%)	desvio padrão	$\sigma_{\text{máx}}$ (N/mm <sup>2</sup> )	desvio padrão
100 P	0,35	0,03	0,47	0,04	1,22	0,25
75 P	0,47	0,15	0,65	0,20	1,64	0,42
50 P	0,86	0,10	1,18	0,13	1,47	0,03
25 P	1,15	0,13	1,59	0,18	1,22	0,29
100 O	0,28	0,11	0,37	0,15	1,38	0,13
100 O++	0,39	0,01	0,53	0,03	0,86	0,20
75 L O	0,75	0,10	1,02	0,14	0,82	0,11
75 L O++	0,90	0,12	1,22	0,17	0,49	0,00
75 A O	0,80	0,09	1,10	0,13	0,99	0,05
75 A O++	0,56	0,16	0,77	0,12	0,67	0,24
75 R O	0,69	0,12	0,95	0,16	0,76	0,07
75 R O++	0,71	0,18	0,97	0,12	0,52	0,04
50 L O	1,04	0,83	1,41	0,07	0,87	0,57
50 L O++	0,88	0,21	0,92	0,29	0,82	0,12
50 A O	1,04	0,04	1,42	0,06	0,78	0,11
50 A O++	0,88	0,07	1,21	0,11	0,55	0,05
50 R O	0,84	0,12	1,15	0,16	0,90	0,05
50 R O++	1,10	0,02	1,50	0,03	0,67	0,08
100 S	0,44	0,53	1,14	0,71	2,40	0,42
100 S++	0,47	0,03	0,65	0,07	1,69	0,39
75 L S	0,81	0,13	1,11	0,17	1,53	0,16
75 L S++	0,71	0,10	0,98	0,15	1,58	0,10
75 A S	0,53	0,11	0,72	0,15	1,95	0,26
75 A S++	0,76	0,02	1,04	0,03	1,36	0,01
75 R S	0,66	0,03	0,91	0,05	1,43	0,14
75 R S++	0,78	0,19	1,06	0,25	1,76	0,10
50 L S	1,12	0,02	1,53	0,02	1,13	0,27
50 L S++	0,71	0,07	0,97	0,10	1,69	0,08
50 A S	0,96	0,08	1,32	0,11	1,31	0,07
50 A S++	1,03	0,23	1,40	0,30	1,11	0,02
50 R S	1,03	0,02	1,39	0,02	1,23	0,10
50 R S++	0,88	0,04	1,22	0,06	0,98	0,09

Para facilitar a visualização das composições que apresentaram baixo desempenho, os resultados que estiverem com valores baixos de deflexão máxima ( $\leq 0,5$  mm) ou resistência ao trincamento máximo ( $\leq 0,5$  N/mm<sup>2</sup>) foram grifados de amarelo. De forma similar foram grifados de azul as composições que apresentaram desempenho no limite de falha. Ao analisar os resultados presentes na Tabela 56 observa-se que embora a maioria das composições tenham apresentado uma boa

resistência ao cisalhamento, algumas apresentaram baixa deformação. Esses tipos de condições atentam para o comportamento mais frágil e mais rígido dessas composições, características já apresentadas em outros ensaios como MR e fadiga. Ao analisar graficamente essa condição (Figura 62 (a)) nota-se que as tensões rapidamente atingem o seu pico e, da mesma forma, descrevem uma queda brusca até a ruptura total. Enquanto que, composições com comportamento mais deformáveis, após atingir a perda de estabilidade ou ruptura, apresentam uma suavização da curva antes de atingir a ruptura total, Figura 62 (b).

Figura 62 – Gráfico de comportamento de ensaio SCB, amostra 100 P (a) e amostra 25 P (b).



A tensão máxima pode ser atingida com pequenos valores de deformação, dando a falsa impressão de resistência ao trincamento, por isso é importante considerar a zona abaixo da curva de carregamento, por caracterizar de forma mais precisa a capacidade resiliente da amostra analisada. Segundo Godoi (2017) o tamanho da zona, na qual a formação de microtrincas ocorre, é uma característica do material e está relacionada a heterogeneidade na sua microestrutura (tamanho máximo, forma e distribuição dos agregados, propriedades do ligante, dentre outras variáveis). Assim, o tamanho da zona sob a curva é associado à fragilidade da composição e o comportamento de fratura. De acordo com Al-Qadi et al. (2015) a medida que a curva se expande, a área sob a curva cresce, resultando no aumento da energia de fratura.

Logo, as amostras que apresentam baixa deformação e altas resistências ao trincamento, por serem frágeis, serão consideradas insatisfatórias nesse ensaio. Assim como, as que apresentaram baixos valores de resistência ao trincamento máximo ( $\sigma_{\text{máx}}$ ). Embora não exista um limite mínimo estabelecido em norma, optou-se por considerar valores abaixo de 0,5 N/mm<sup>2</sup> como valor mínimo. A partir dessas

considerações é possível determinar que as misturas 100 P, 75 P, 100 O, 100 O ++, 75 L O ++, 75 A O ++, 75 R O ++, 50 A O ++, 100 S, 100 S ++ e 75 A S, são inviáveis para utilização em misturas asfálticas.

Tabela 57 – SCB de acordo com a norma BS EN 12697-44, STA.

faixa	$\delta_{\text{máx}}$ (mm)	desvio padrão	$\epsilon_{\text{máx}}$ (%)	desvio padrão	$\sigma_{\text{máx}}$ (N/mm <sup>2</sup> )	desvio padrão
100 P	1,06	0,74	1,46	1,01	2,34	0,01
75 P	0,59	0,15	0,81	0,20	1,71	0,11
50 P	0,68	0,01	0,93	0,01	1,87	0,38
25 P	1,09	0,08	1,48	0,10	1,36	0,24
100 O	0,45	0,10	0,61	0,33	1,47	0,11
100 O++	0,51	0,34	0,69	0,44	1,07	0,04
75 L O	0,60	0,40	0,83	0,15	1,17	0,31
75 L O++	0,76	0,02	1,04	0,03	0,97	0,04
75 A O	0,68	0,01	0,88	0,01	1,80	0,10
75 A O++	0,34	0,02	0,45	0,03	1,36	0,09
75 R O	0,33	0,09	0,46	0,12	1,36	0,26
75 R O++	0,37	0,04	0,51	0,05	1,17	0,13
50 L O	0,90	0,15	1,22	0,19	1,32	0,35
50 L O++	0,71	0,38	0,98	0,52	1,20	0,03
50 A O	0,61	0,08	0,83	0,11	1,79	0,10
50 A O++	0,56	0,15	0,77	0,24	1,55	0,18
50 R O	0,38	0,06	0,53	0,08	1,86	0,37
50 R O++	0,43	0,06	0,60	0,07	1,09	0,11
100 S	0,54	0,00	0,75	0,32	1,53	0,15
100 S++	0,39	0,13	0,53	0,17	1,97	0,46
75 L S	0,63	0,03	0,87	0,08	1,61	0,21
75 L S++	0,61	0,03	0,82	0,02	1,78	0,15
75 A S	0,56	0,23	0,76	0,32	1,90	0,32
75 A S++	0,72	0,09	0,99	0,13	1,84	0,05
75 R S	0,43	0,05	0,60	0,07	1,97	0,22
75 R S++	0,51	0,06	0,70	0,09	2,12	0,02
50 L S	0,72	0,15	0,98	0,21	2,29	0,25
50 L S++	0,66	0,05	0,86	0,05	2,13	0,23
50 A S	0,86	0,00	1,19	0,01	1,87	0,24
50 A S++	0,66	0,09	0,90	0,11	2,27	0,31
50 R S	0,30	0,03	0,40	0,03	1,89	0,58
50 R S++	0,27	0,07	0,36	0,09	1,68	0,14

Ao analisar os resultados da Tabela 57 percebe-se que, com a aplicação do condicionamento STA, o número de amostras que apresentaram comportamento frágil aumenta. Condição já era esperada, pois o condicionamento ao envelhecimento torna as composições mais rígidas, como verificado em ensaios anteriores. Tal efeito foi

observado nas amostras: 100 P, 75 P, 100 O, 100 O ++, 75 L O, 75 A O ++, 75 R O, 75 R O ++, 50 L O ++, 50 A O ++, 50 R O, 50 R O ++, 100 S, 100 S ++, 75 A S, 75 R S, 75 R S ++, 50 R S e 50 R S ++. Como o condicionamento (STA) é equivalente ao envelhecimento produzido durante usinagem e compactação da mistura asfáltica, as composições em questão teriam seu desempenho questionável e maior propensão ao surgimento de trincas prematuras nas primeiras atividades de sua vida útil. Tal fato, tornaria as misturas em questão, inviáveis para execução em pavimentos.

Tabela 58 – SCB de acordo com a norma BS EN 12697-44, LOTA 3.

faixa	$\delta_{\text{máx}}$ (mm)	desvio padrão	$\varepsilon_{\text{máx}}$ (%)	desvio padrão	$\sigma_{\text{máx}}$ (N/mm <sup>2</sup> )	desvio padrão
100 P	0,39	0,04	0,54	0,05	2,62	0,11
75 P	0,45	0,11	0,61	0,15	2,14	0,03
50 P	0,74	0,52	1,00	0,11	2,27	0,02
25 P	0,99	0,13	1,36	0,18	1,69	0,39
100 O	0,43	0,01	0,59	0,03	2,35	0,04
100 O++	0,29	0,03	0,40	0,05	1,33	0,23
75 L O	0,49	0,10	0,68	0,14	1,43	0,49
75 L O++	0,78	0,00	1,06	0,00	0,99	0,07
75 A O	0,50	0,07	0,68	0,10	2,27	0,11
75 A O++	0,29	0,09	0,40	0,12	2,01	0,18
75 R O	0,34	0,11	0,47	0,15	1,55	0,38
75 R O++	0,33	0,02	0,45	0,04	1,34	0,11
50 L O	0,51	0,02	0,71	0,02	1,50	0,45
50 L O++	0,55	0,25	0,76	0,33	1,23	0,29
50 A O	0,40	0,07	0,54	0,09	2,11	0,02
50 A O++	0,33	0,02	0,46	0,03	1,97	0,23
50 R O	0,47	0,29	0,65	0,39	1,94	0,04
50 R O++	0,57	0,13	1,18	0,17	1,62	0,07
100 S	0,40	0,03	0,54	0,04	2,38	0,32
100 S++	0,38	0,00	0,52	0,01	2,37	0,01
75 L S	0,50	0,05	0,68	0,07	2,25	0,15
75 L S++	0,54	0,00	0,73	0,02	2,28	0,09
75 A S	0,49	0,09	0,68	0,14	2,01	0,23
75 A S++	0,61	0,13	0,84	0,18	1,94	0,07
75 R S	0,39	0,10	0,54	0,14	2,24	0,28
75 R S++	0,50	0,05	0,69	0,08	2,28	0,10
50 L S	0,53	0,10	0,72	0,15	2,20	0,19
50 L S++	0,47	0,11	0,65	0,14	2,16	0,19
50 A S	0,47	0,04	0,64	0,02	2,22	0,06
50 A S++	0,55	0,03	0,75	0,06	2,63	0,14
50 R S	0,33	0,02	0,46	0,03	2,20	0,11
50 R S++	0,23	0,02	0,32	0,03	1,98	0,29

Os resultados presentes na Tabela 58 além de comprovar que o condicionamento ao envelhecimento imposto as amostras ocorreu, indicam um maior comprometimento das composições. Observa-se que somente as composições 50 P, 25 P e 75 L O ++, ainda são passíveis de uso após 7 a 12 meses, de acordo com Yin et al. (2017), ou 3 a 5 anos, de acordo com a norma AASHTO R30. As composições 75 A O, 50 L O, 50 A O, 75 L S, 75 L S ++, 75 A S ++, 50 L S, 50 L S ++, 50 A S e 50 A S ++, ainda podem ser aplicadas, desde que sejam respeitadas restrições quanto ao tempo de vida útil de projeto.

Tabela 59 – SCB de acordo com a norma BS EN 12697-44, LOTA 5.

faixa	$\delta_{\text{máx}}$ (mm)	desvio padrão	$\epsilon_{\text{máx}}$ (%)	desvio padrão	$\sigma_{\text{máx}}$ (N/mm <sup>2</sup> )	desvio padrão
100 P	0,46	0,14	0,62	0,20	2,76	0,14
75 P	0,41	0,05	0,57	0,08	2,30	0,23
50 P	0,56	0,19	0,76	0,16	2,24	0,10
25 P	1,04	0,30	1,43	0,42	1,60	0,09
100 O	0,49	0,01	0,68	0,23	1,25	0,10
100 O++	0,33	0,04	0,45	0,14	1,48	0,20
75 L O	0,35	0,03	0,49	0,05	1,70	0,13
75 L O++	0,56	0,15	0,77	0,24	1,55	0,18
75 A O	0,39	0,08	0,53	0,11	2,46	0,05
75 A O++	0,30	0,07	0,41	0,09	2,30	0,23
75 R O	0,42	0,07	0,57	0,09	1,44	0,03
75 R O++	0,46	0,02	0,63	0,04	1,29	0,18
50 L O	0,99	0,54	1,37	0,76	1,55	0,10
50 L O++	0,45	0,17	0,62	0,25	1,23	0,12
50 A O	0,24	0,03	0,33	0,05	2,02	0,28
50 A O++	0,24	0,05	0,33	0,07	1,83	0,08
50 R O	0,28	0,08	0,38	0,11	2,10	0,10
50 R O++	0,40	0,11	0,54	0,16	1,60	0,25
100 S	0,40	0,05	0,56	0,07	2,40	0,03
100 S++	0,32	0,12	0,44	0,16	2,15	0,01
75 L S	0,51	0,07	0,71	0,10	2,06	0,12
75 L S++	0,35	0,00	0,48	0,00	2,27	0,18
75 A S	0,51	0,11	0,69	0,15	2,04	0,31
75 A S++	0,89	0,03	0,95	0,02	1,78	0,15
75 R S	0,42	0,11	0,58	0,15	2,42	0,04
75 R S++	0,69	0,21	0,94	0,27	2,51	0,06
50 L S	0,43	0,01	0,59	0,02	2,40	0,22
50 L S++	0,26	0,02	0,65	0,03	2,14	0,36
50 A S	0,45	0,10	0,63	0,14	2,27	0,45
50 A S++	0,32	0,05	0,45	0,06	2,47	0,36
50 R S	0,35	0,10	0,49	0,13	2,25	0,06
50 R S++	0,31	0,06	0,42	0,08	2,12	0,02

Ao avaliar os dados presentes na Tabela 59 observa-se que todas as composições falharam, com exceção da composição 25 P, indicando que apenas esta teria desempenho satisfatório durante a vida útil do pavimento (Yin et al., 2017; AASHTO R30). Este fato demonstra a importância da análise do condicionamento ao envelhecimento das misturas asfálticas, pois, comprova de forma fatídica a vida útil do pavimento. Logo, essa confirmação experimental pode validar a qualidade de uma mistura asfáltica e até quantificar a duração da sua vida útil.

É importante pontuar que, apesar dos resultados negativos observados, a metodologia empregada na norma BS EN 12697-44 não analisa a amplitude da área sob a curva de carregamento ou a inclinação da curva pós ruptura. Ou seja, não considera uma variável importante para o entendimento do comportamento de rigidez das misturas asfálticas, fato que pode ser suprido pela utilização da metodologia da norma AASHTO T 394-21.

Apesar das amostras 50 L O e 75 A S ++, grifados de verde, apresentarem resultados de comportamento “aceitáveis” para a condição LOTA 5, devido a ter sido detectado falhas em condicionamentos anteriores, acredita-se que tais resultados sejam em decorrência mais do espaço amostral restrito, que propriamente uma melhoria nas propriedades das composições.

Nas Tabela 60, Tabela 61, Tabela 62 e Tabela 63 são mostradas as análises de variância (ANOVA) para o ensaio SCB, de acordo com a norma BS EN 12697-44. Essa análise foi realizada utilizando os resultados obtidos de resistência ao trincamento máximo ( $\sigma_{\text{máx}}$ ) e o nível do coeficiente de determinação é de 10%.

*Tabela 60 – ANOVA Ensaio SCB norma BS EN 12697-44 amostras NC*

ANOVA – R <sup>2</sup> = 0,755010					
FATOR	SS	GL	MS	F	p
TEOR	35,7038	3	11,90128	3,04076	0,050407
AR	213,9795	3	71,32651	18,22385	0,000004
MOMENTO	22,1835	2	10,09174	1,02344	0,097685
ERROR	86,1060	22	3,91391		



Tabela 61 – ANOVA Ensaio SCB norma BS EN 12697-44 amostras STA.

ANOVA – R <sup>2</sup> = 0,751085					
FATOR	SS	GL	MS	F	p
TEOR	24,0034	3	8,00114	2,91469	0,056997
AR	137,6778	3	45,89259	16,71793	0,000007
MOMENTO	14,0951	2	7,04753	2,56730	0,099516
ERROR	60,3925	22	2,74511		

Tabela 62 – ANOVA Ensaio SCB norma BS EN 12697-44 amostras LOTA 3

ANOVA – R <sup>2</sup> = 0,734086					
FATOR	SS	GL	MS	F	p
TEOR	32,5933	3	10,86443	3,12551	0,046440
AR	136,1257	3	45,37524	13,05367	0,000041
MOMENTO	34,3200	2	17,15999	4,93663	0,016942
ERROR	76,4731	22	3,47605		

Tabela 63 – ANOVA Ensaio SCB norma BS EN 12697-44 amostras LOTA 5

ANOVA – R <sup>2</sup> = 0,750017					
FATOR	SS	GL	MS	F	p
TEOR	28,7334	3	9,57779	1,787003	0,079060
AR	115,2268	3	38,40892	7,166251	0,001568
MOMENTO	19,3608	2	9,68039	1,806147	0,127809
ERROR	117,9133	22	5,35970		

Ao analisa os resultados de p é possível afirmar que as composições apresentaram comportamento significativamente diferentes para quase todos aos parâmetros observados, exceto para o parâmetro momento de adição para condicionamento LOTA 5. Este fato mostra que é possível predizer o comportamento desta variável por meio dos teores de RAP, tipo de AR e momento de adição do AR separadamente, pois a interação desses fatores não é significativa para o modelo. Entretanto a precisão dessa predição não será tão elevada quanto as desenvolvidas em análises anteriores, pois os valores de R<sup>2</sup> variaram de 73 a 75%, embora sejam valores de R<sup>2</sup> satisfatório, são abaixo do desejado.

De forma análoga as realizadas nos tópicos anteriores foram realizados testes de Tukey. Os resultados obtidos nessa nova análise estão expostos nas Tabela 64, Tabela 65, Tabela 66 e Tabela 67. Devido ao fato que, as condições de

condicionamento produziram resultados no teste Tukey semelhantes, exceto o já citado, as análises dos resultados serão feitas em conjunto. As Tabela 64 e Tabela 65 estão expostos os resultados comuns quanto as variáveis teor de RAP e agente de reciclagem, para todos as condições de condicionamento. No caso da Tabela 66 estão expostos os resultados para a variável momento de adição para as condições de condicionamento NC, STA e LOTA 3. E para o caso da Tabela 67 estão expostos os resultados para a variável momento de adição para a condição de condicionamento LOTA 5.

*Tabela 64 – Teste Tukey componente teor de RAP (Ensaio SCB, BS EN 12697-44).*

Tukey teste; variável SCB BS Grupos homogêneos, alpha = ,05000 Erro: entre MS = 2,7451, df = 22,000		
TEOR	1	2
25	****	
50	****	
75	****	****
100		****

Ao analisar os resultados expostos Tabela 64, para as condições de condicionamento NC, STA, LOTA 3 e LOTA 5, é possível determinar que as variáveis com teor 25, 50 e 75 apresentam comportamentos similares, enquanto que as componentes 75 e 100 também se apresentaram similares. Com esses resultados não é possível prever o comportamento pelo ensaio de SCB (BS EN 12697-44) para as componentes 25, 50 e 75, quando avaliados entre si. Entretanto, a análise para os componentes 25 e 50, quando avaliados em relação a componente 100, é possível sua predição e o recíproco é válido. Apenas a componente 75 não é passível de hipóteses de determinação de comportamento pelo ensaio SCB (BS EN 12697-44).

*Tabela 65 – Teste Tukey componente agente de reciclagem (Ensaio SCB, BS EN 12697-44).*

Tukey teste; variável SCB BS Grupos homogêneos, alpha = ,05000 Erro: entre MS = 2,7451, df = 22,000			
AR	1	2	3
O++			****
O		****	
P	****	****	
S	****		
S++	****		

Para o caso da variável agente de reciclagem, os resultados expostos na Tabela 65 observa-se a formação de três grupos distintos. Com os resultados é possível afirmar que o grupo O++ foi o único que apresentou comportamento dessa propriedade de forma isolada, sendo o único grupo que tenha seu comportamento passível de previsão por esse ensaio. Para os demais casos, o comportamento apresenta dois grupos similares e diferentes dos demais, onde: Os grupos O e P são similares entre si e distintos entre os outros; e os grupos S, S++ e P similares entre si, distintos anteriormente citados. Assim, seus comportamentos podem ser determinados quando em comparações com os grupos distintos, mas não entre os seus similares.

*Tabela 66 – Teste Tukey componente momento de adição (Ensaio SCB, BS EN 12697-44).*

Tukey teste; variável SCB BS Grupos homogêneos, alpha = ,05000 Erro: entre MS = 2,7451, df = 22,000		
MOMENTO	1	2
L		****
R	****	****
A	****	
S/AR	****	

Para o caso da variável momento de adição (NC, STA e LOTA 3), ao analisar os resultados exposto na Tabela 66, observa-se a formação de dois grupos, onde: as composições L e R são semelhantes; e as composições R, A e S/AR são semelhantes. Esse resultado implica que para esse ensaio, a variável momento de adição do AR, só é previsível para as composições L, A e S/AR quando não comparada a R, enquanto que a composição R não apresenta possibilidade de predição.

*Tabela 67 – Teste Tukey componente momento de adição (Ensaio SCB – LOTA 5, BS EN 12697-44).*

Tukey teste; variável SCB BS Grupos homogêneos, alpha = ,05000 Erro: entre MS = 2,7451, df = 22,000	
MOMENTO	1
A	****
L	****
R	****
S/AR	****

Ao analisar os resultados para a componente momento de adição no condicionamento LOTA 5 e exposto na Tabela 67, observa-se um comportamento

único nas composições. Esse resultado implica que para o ensaio de SCB, a variável momento de adição do AR não provocou influências nos resultados.

#### **4.3.2.2 Fratura por flexão em amostra semicircular pela norma AASHTO T 394-21**

Na Tabela 68, Tabela 69, Tabela 70 e Tabela 71 estão registrados os resultados do ensaio SCB pela norma AASHTO T 394-21, para as composições condicionadas e não condicionadas ao envelhecimento (STA e LOTA). Os resultados obtidos foram calculados pelo software I-FIT, sendo apresentados os resultados de energia de fratura ( $G_f$ ), inclinação da curva pós-pico ( $|m|$ ) e índice de flexibilidade (FI). Observa-se que o  $G_f$  representa o valor da área sob a curva,  $|m|$  a inclinação ou suavização da curva pós-pico, enquanto que, o FI está associado a forma do segmento pós-pico da curva  $P \times \delta$ .

Tabela 68 – SCB de acordo com a norma AASHTO T 394-21, NC.

faixa	Gf	desvio padrão	m	desvio padrão	FI	desvio padrão
<b>100 P</b>	<b>939,01</b>	<b>440,89</b>	<b>9,67</b>	<b>4,82</b>	<b>0,98</b>	<b>0,33</b>
75 P	799,47	132,84	4,05	2,00	1,72	0,38
50 P	1153,40	46,78	2,97	0,04	3,89	0,11
25 P	1509,31	411,70	1,44	0,41	10,68	1,89
<b>100 O</b>	<b>621,95</b>	<b>236,40</b>	<b>9,31</b>	<b>2,50</b>	<b>0,54</b>	<b>0,06</b>
<b>100 O++</b>	<b>363,54</b>	<b>19,99</b>	<b>8,62</b>	<b>0,42</b>	<b>0,42</b>	<b>0,18</b>
75 L O	655,12	134,34	1,62	0,14	4,03	0,62
75 L O++	542,60	128,13	0,87	0,35	6,71	0,37
75 A O	1065,18	315,46	1,75	0,12	6,19	1,29
75 A O++	409,84	119,03	1,27	0,51	3,42	0,76
75 R O	625,06	23,99	1,42	0,32	4,58	1,10
75 R O++	488,16	104,54	0,76	0,04	6,47	0,74
50 L O	1151,91	468,70	1,46	1,09	7,20	2,18
50 L O++	726,30	382,84	1,72	0,63	5,68	0,70
50 A O	937,09	168,42	1,10	0,11	8,55	0,87
50 A O++	968,11	288,77	0,86	0,12	11,93	1,56
50 R O	958,28	139,79	1,44	0,13	6,73	1,38
50 R O++	731,81	127,31	0,91	0,04	8,02	1,03
<b>100 S</b>	<b>616,70</b>	<b>12,05</b>	<b>35,27</b>	<b>21,63</b>	<b>0,22</b>	<b>0,13</b>
<b>100 S++</b>	<b>572,83</b>	<b>102,24</b>	<b>11,70</b>	<b>3,47</b>	<b>0,50</b>	<b>0,06</b>
75 L S	1146,75	159,73	3,13	0,52	3,71	0,66
75 L S++	1148,30	151,30	3,41	0,71	3,50	0,01
75 A S	818,27	139,46	2,34	0,30	3,42	0,29
75 A S++	1060,08	43,13	2,53	0,13	4,19	0,04
75 R S	952,87	112,41	2,65	0,31	3,60	0,32
75 R S++	1120,60	49,94	3,40	0,34	3,35	0,08
50 L S	1147,06	159,81	1,81	0,11	6,43	0,37
50 L S++	1227,76	153,51	3,87	0,81	3,34	0,23
50 A S	1261,04	121,68	2,14	0,20	5,93	0,78
50 A S++	1117,18	68,80	1,82	0,33	6,27	1,50
50 R S	1198,62	6,47	2,10	0,37	5,81	1,00
50 R S++	969,72	132,07	1,50	0,18	6,48	0,11

De forma análoga a que foi realizada para as análises do ensaio SCB pela norma BS EN 12697-44 será grifado de amarelo as composições que apresentarem baixo desempenho no ensaio SCB pela norma AASHTO T 394-21, NC. No qual o parâmetro mínimo de desempenho é baseado no índice de flexibilidade ( $\geq 1,0$ ) De início deve analisar as seguintes condições:

- quanto maior for o valor de  $|m|$  mais abrupta é a deformação após o rompimento. Godoi (2017) relata que se identifica que o percurso das curvas entre o pico de carga e a ruptura apresenta um caminho suave em função do baixo valor de  $|m|$ . Em outras palavras, composições com baixos valores de  $|m|$  impõe dificuldade à propagação das microtrincas, sendo necessário maiores deformações para ampliá-las.
- valores de FI menores que 1,0, indicam que a mistura apresenta comportamento frágil. O software I-FIT, notifica o usuário quando as amostras ensaiadas apresentam resultados abaixo de 1,0 e indica a não viabilidade da composição.

Ao analisar os resultados presentes na Tabela 68 é possível inferir que nenhuma composição com 100% de RAP apresentou desempenho satisfatório em relação a esse ensaio. Embora algumas amostras tenham apresentado valores de FI acima de 1,0, esses valores ficaram próximos ao mínimo. Além disso, as amostras com 100% de RAP apresentaram os maiores valores de  $|m|$  das composições ensaiadas, conseqüentemente, apresentando uma ruptura mais abrupta.

De uma forma geral, a adição de teores maiores de RAP nas misturas reduz os valores de  $G_f$  e FI, conseqüentemente aumentando os valores de  $|m|$ . As incorporações com ADCAP WM resultaram em valores de  $G_f$  maiores que os resultados observados em incorporações com óleo residual de motor. Entretanto, as composições com óleo residual de motor apresentaram menores resultados de  $|m|$ , demonstrando uma maior resistência a propagação de trincas.

Ao analisar as composições com adições de AR nota-se que:

- As incorporações com 50% a mais do TO de óleo residual de motor apresentaram diminuição dos valores de  $G_f$  e  $|m|$ , indicando uma fragilização dessas composições em relação as composições no TO.
- As incorporações com 50% a mais do TO e com TO de ADCAP WM não apresentaram uma tendência possível de determinação. Os valores de  $G_f$ ,  $|m|$  e FI, apresentaram-se próximos entre si.

Não é possível determinar um padrão definido de comportamento em relação ao momento de adição dos ARs. Porém, as amostras modificadas com óleo residual de motor apresentam um pequeno benefício no Gf quando a adição ocorre junto ao agregado. Já no caso das composições modificadas com ADCAP WM, esse pequeno benefício está nas composições cuja adição ocorre junto ao ligante.

Tabela 69 – SCB de acordo com a norma AASHTO T 394-21, STA.

faixa	Gf	desvio padrão	m	desvio padrão	FI	desvio padrão
<b>100 P</b>	<b>754,74</b>	<b>38,11</b>	<b>22,57</b>	<b>3,44</b>	<b>0,34</b>	<b>0,07</b>
75 P	872,88	81,70	5,58	1,06	1,59	0,21
50 P	1196,53	22,70	5,11	2,38	2,90	0,82
25 P	1704,75	330,42	1,98	0,44	8,68	0,90
<b>100 O</b>	<b>681,71</b>	<b>156,87</b>	<b>9,97</b>	<b>2,10</b>	<b>0,58</b>	<b>0,09</b>
<b>100 O++</b>	<b>465,39</b>	<b>193,56</b>	<b>10,71</b>	<b>2,79</b>	<b>0,35</b>	<b>0,21</b>
75 L O	719,03	107,39	2,92	0,73	2,44	0,36
75 L O++	560,77	78,96	1,67	0,21	3,37	0,06
75 A O	972,27	112,05	3,49	0,72	2,09	0,96
75 A O++	832,38	44,20	3,78	0,34	2,20	0,31
<b>75 R O</b>	<b>319,78</b>	<b>55,55</b>	<b>10,23</b>	<b>1,29</b>	<b>0,39</b>	<b>0,01</b>
<b>75 R O++</b>	<b>264,08</b>	<b>93,90</b>	<b>9,54</b>	<b>3,49</b>	<b>0,58</b>	<b>0,00</b>
50 L O	925,24	83,87	3,14	0,60	2,40	1,34
50 L O++	827,67	160,17	2,80	0,08	2,96	0,49
50 A O	580,02	205,03	5,36	0,98	1,64	0,16
50 A O++	761,40	144,58	4,80	0,93	1,93	0,18
50 R O	628,04	164,56	5,73	1,75	1,73	0,26
50 R O++	632,80	117,95	6,09	0,25	1,05	0,23
<b>100 S</b>	<b>491,42</b>	<b>8,98</b>	<b>25,83</b>	<b>1,74</b>	<b>0,25</b>	<b>0,03</b>
<b>100 S++</b>	<b>504,82</b>	<b>100,92</b>	<b>22,87</b>	<b>11,03</b>	<b>0,27</b>	<b>0,15</b>
75 L S	885,99	81,06	4,95	0,66	1,95	0,75
75 L S++	917,22	75,78	6,94	0,70	1,38	0,45
75 A S	906,26	188,18	6,13	0,64	1,78	0,14
75 A S++	1193,76	271,63	5,02	0,76	2,44	0,32
75 R S	813,53	70,41	6,44	0,97	1,13	0,04
75 R S++	986,25	21,84	4,75	0,39	2,18	0,69
50 L S	1350,74	99,36	5,58	0,88	2,42	0,03
50 L S++	975,69	46,77	6,62	0,61	1,92	0,44
50 A S	1331,63	314,70	4,15	0,82	3,62	0,87
50 A S++	1298,49	206,40	5,22	0,68	2,89	0,63
50 R S	644,03	137,23	6,03	0,82	1,25	0,09
50 R S++	689,86	26,02	6,42	0,58	1,53	0,08

Após realização do condicionamento ao envelhecimento a curto prazo e ensaios de SCB, os resultados foram organizados e expostos na Tabela 69. Ao

analisar os resultados de |m| observa-se que o condicionamento ao envelhecimento aumentou os resultados de |m|, quando comparado as amostras não condicionadas. Enquanto que, para os resultados de FI, estes foram reduzidos com o condicionamento ao envelhecimento.

Nas amostras não condicionadas, os teores com 100% de RAP com ou sem agente de reciclagem, não apresentaram desempenho satisfatório quanto a esse ensaio. Observa-se também que as amostras 75 R O e 75 R O ++, apresentaram comportamento insatisfatório. Devido ao fato que o condicionamento ao envelhecimento a curto prazo remete aos danos ocasionados as misturas asfálticas na sua produção e aplicação, assim como as amostras com 100% de RAP, as composições 75 R O e 75 R O ++, são consideradas inviáveis para utilização em pavimentos. No entanto, observa-se que ao contrário dos resultados da Tabela 69, a maioria das composições desenvolvidas ainda apresentam desempenhos aceitáveis a utilização em pavimentos.

Os resultados das amostras ensaiadas apresentaram resultados de FI abaixo dos encontrados na literatura para misturas convencionais e recicladas. Godoi et al. (2019) obteve resultados de FI entre 22 e 28, para diferentes composições de misturas. Enquanto que, Yousefi et al. (2021) obteve resultados de FI entre 15 e 45 para misturas usinadas a quente e misturas mornas. Resultados superiores aos encontrados para misturas recicladas nessa pesquisa.

No mesmo estudo, Yousefi et al. (2021) obteve resultados de FI entre 4 e 8 para composições com adição de 50% de RAP, em misturas usinadas a quente e mornas. Os resultados observados pelos autores são próximos aos observados nessa pesquisa. Entretanto, esse comportamento não é típico da adição do RAP as misturas asfálticas, tal qual observado por Mubaraki et al. (2019) que obteve resultados de FI entre 6 e 13 para misturas com 20% de RAP e 15 a 28 para misturas com 40% de RAP.

Ao analisar a influência dos ARs, observa-se que quanto ao resultado de Gf e FI não ocorrem grandes variações, entretanto, quando analisados os resultados de |m| as composições com adição de ADCAP WM apresentam valores maiores que as com adição de óleo residual de motor. Quanto as composições com adições adicionais de AR são observados o mesmo comportamento das amostras sem condicionamento.



Quando analisando o momento de adição continua não sendo possível estabelecer um padrão definido. Porém, as amostras modificadas com óleo residual de motor apresentam um pequeno benefício no Gf quando a adição ocorre junto ao ligante. Fato esse, divergente do observado nos resultados das composições sem condicionamento. Já no caso das composições modificadas com ADCAP WM, esse pequeno benefício continua a ser observado em composições cuja adição ocorre junto ao ligante.

Tabela 70 – SCB de acordo com a norma AASHTO T 394-21, LOTA 3.

faixa	Gf	desvio padrão	m	desvio padrão	FI	desvio padrão
100 P	770,79	3,46	28,16	4,89	0,28	0,05
75 P	933,23	231,53	6,17	2,21	1,07	0,20
50 P	1083,64	37,02	5,38	1,11	1,99	0,27
25 P	1542,61	81,00	3,18	1,57	4,63	0,35
100 O	387,26	99,73	12,02	0,77	0,33	0,55
100 O++	321,03	35,70	13,77	7,02	0,22	0,37
75 L O	854,30	41,39	4,79	1,71	1,90	0,64
75 L O++	863,47	130,12	5,19	1,75	1,66	0,01
75 A O	921,97	118,20	10,98	0,88	0,84	0,14
75 A O++	849,42	71,06	11,39	3,98	0,82	0,05
75 R O	518,69	126,03	14,45	5,18	0,84	0,10
75 R O++	624,21	152,75	9,24	1,38	0,90	0,02
50 L O	783,69	206,33	3,28	3,08	2,71	0,43
50 L O++	658,85	6,42	3,04	1,43	2,18	0,95
50 A O	643,01	80,11	5,97	2,10	1,48	0,16
50 A O++	652,14	9,93	4,81	1,32	1,58	0,17
50 R O	758,17	281,08	9,42	1,78	0,85	0,46
50 R O++	638,67	269,10	5,95	3,71	1,10	0,16
100 S	579,75	14,34	31,17	10,94	0,22	0,11
100 S++	613,95	53,57	28,77	9,15	0,23	0,09
75 L S	967,30	144,50	5,87	2,21	1,29	0,16
75 L S++	681,94	48,46	3,28	1,39	2,36	0,21
75 A S	919,47	138,50	5,88	2,27	1,25	0,15
75 A S++	986,25	21,84	4,75	1,39	2,18	0,69
75 R S	755,73	163,16	15,33	6,34	0,55	0,22
75 R S++	1071,56	220,91	11,09	3,47	0,97	0,01
50 L S	1369,61	217,19	6,40	0,18	2,86	0,61
50 L S++	943,69	122,58	6,74	1,19	1,90	0,37
50 A S	1198,14	153,17	5,96	1,13	2,07	0,65
50 A S++	997,61	260,20	4,46	1,83	2,69	0,29
50 R S	780,96	62,62	5,23	0,79	1,17	0,12
50 R S++	722,09	14,33	6,51	1,83	1,00	0,26

Ao analisar os resultados presentes na Tabela 70, observa-se a mesma tendência já observada quanto ao condicionamento ao envelhecimento, onde a sua efetivação aumenta os valores obtidos de  $|m|$  e diminui os resultados obtidos de FI. A partir dos resultados obtidos, é possível determinar que além das composições anteriormente descartadas, as composições 75 A O, 75 A O ++, 50 R O, 75 R S e 75 R S ++, falharam quanto a esse ensaio. Devido o condicionamento ao envelhecimento (LOTA 3) representar a condição de uso de 7 a 12 meses, de acordo com Yin et al. (2017), ou 3 a 5 anos, de acordo com a norma AASHTO R30, as mesmas não devem ser consideradas inviáveis.

Todavia, para sua utilização devem ser consideradas condições adicionais como o tempo de vida útil do pavimento, controle das cargas aplicadas e maior rigor nas confecções de base e sub-base. No caso das composições 75 P, 50 R O ++, 50 R S e 50 R S ++, essas composições apresentam-se no limiar da falha, sendo necessária uma atenção especial na sua escolha, aplicação e uso.

Ao analisar a influência dos ARs, as adições acima do TO proporcionaram uma redução das propriedades analisadas. Outro ponto a ser analisado, a partir desse condicionamento ao envelhecimento (LOTA 3) começa a surgir uma tendência quanto a influência do momento de adição do AR. As amostras que tiveram a adição do AR junto ao ligante asfáltico, apresentaram os melhores resultados, quando comparadas as mesmas composições, porém com adições em momentos distintos.

As amostras com 75% de RAP viáveis, até o momento, apresentaram resultados semelhantes a composição 50 P. Esses resultados por se só, já é surpreendente, pois indica um teor nada convencional e exequível de uma mistura reciclada. Dando assim, um excelente horizonte de resultados possíveis para execução de misturas recicladas.

Tabela 71 – SCB de acordo com a norma AASHTO T 394-21, LOTA 5.

faixa	Gf	desvio padrão	m	desvio padrão	FI	desvio padrão
100 P	778,69	206,19	35,23	11,63	0,25	0,13
75 P	805,23	190,31	16,25	12,75	0,78	0,58
50 P	1303,29	464,46	5,92	2,63	2,36	0,46
25 P	1458,41	110,96	2,74	0,47	5,45	0,21
100 O	557,93	125,89	14,39	0,00	0,27	0,11
100 O++	379,77	25,11	15,03	8,77	0,31	0,20
75 L O	1093,83	269,67	5,09	1,75	2,47	0,21
75 L O++	914,16	20,51	5,69	1,25	1,31	0,23
75 A O	889,25	400,01	18,39	10,30	0,67	0,58
75 A O++	615,54	61,70	24,48	10,24	0,42	0,40
75 R O	640,98	39,62	15,31	1,64	0,31	0,52
75 R O++	431,94	119,17	13,28	1,39	0,36	0,21
50 L O	1036,61	60,42	3,57	0,40	2,94	0,50
50 L O++	810,29	202,03	2,54	0,98	3,79	0,55
50 A O	379,74	19,76	34,55	2,69	0,11	0,00
50 A O++	655,01	0,67	14,79	0,33	0,45	0,01
50 R O	596,42	160,30	11,98	4,91	0,57	0,37
50 R O++	504,28	219,03	6,69	3,92	0,80	0,13
100 S	552,70	11,38	44,09	2,79	0,13	0,01
100 S++	593,40	147,10	19,35	8,37	0,36	0,23
75 L S	1046,55	100,06	5,89	1,88	1,38	0,18
75 L S++	1192,19	30,29	4,46	0,64	2,86	0,13
75 A S	966,61	198,01	5,64	1,98	1,32	0,19
75 A S++	1245,87	197,94	4,37	1,27	2,34	0,18
75 R S	722,27	147,07	23,34	13,10	0,44	0,37
75 R S++	1076,03	314,60	13,26	0,40	0,81	0,21
50 L S	958,69	112,12	5,96	0,62	1,97	0,04
50 L S++	775,28	164,38	6,64	1,32	1,81	0,00
50 A S	1004,42	111,02	6,18	1,34	1,42	0,20
50 A S++	719,17	153,07	6,26	1,05	1,41	0,05
50 R S	560,86	45,47	26,07	0,73	0,22	0,02
50 R S++	389,86	26,02	7,42	0,58	0,53	0,08

Ao analisar os resultados presentes na Tabela 71, observa-se a mesma tendência já observada quanto ao condicionamento ao envelhecimento, onde a sua efetivação aumenta os valores obtidos de |m| e diminui os resultados obtidos de FI. A partir dos resultados obtidos é possível determinar que além das composições anteriormente descartadas, as composições 75 P, 50 A O, 50 A O ++, 50 R O ++, 50 R S e 50 R S ++, falharam quanto a esse ensaio.

O que indica que as composições 25 P, 50 P, 75 L O, 75 L O ++, 50 L O, 50 L O ++, 75 L S, 75 L S ++, 75 A S, 75 A S ++, 50 L S, 50 L S ++, 50 A S e 50 A S ++ terão desempenho satisfatório durante a vida útil do pavimento (12 a 23 meses, de acordo com Yin et al., 2017, ou 7 a 10 anos, de acordo com a norma AASHTO R30).

Ao analisar a influência dos ARs, as adições acima do TO a tendência anteriormente observada se repete, ocorrendo uma redução das propriedades analisadas. Observa-se também que, a tendência observada no condicionamento ao envelhecimento (LOTA 3) quanto a influência do momento de adição do AR é confirmada. Onde, as amostras que tiveram a adição do AR junto ao ligante asfáltico, apresentaram os melhores resultados, quando comparadas as mesmas composições, porém com adições em momentos distintos.

Após análise completa dos resultados do ensaio SCB com e sem condicionamento ao envelhecimento, é seguro inferir que algumas das composições com adições de 75% de RAP são viáveis, estas demonstrando resultados semelhantes a composição 50 P. Dentre as configurações de adição do agente de reciclagem, analisadas nessa pesquisa, a mais eficiente foi a configuração onde ocorreram acréscimos do AR junto ao ligante asfáltico. Para o caso do óleo residual de motor a adição deve ser realizada com o TO de 12% em massa do ligante envelhecido, e para o caso do ADCAP WM a adição deve ser realizada com o TO de 3% em massa do ligante envelhecido.

Nas Tabela 72, Tabela 73, Tabela 74 e Tabela 75 são mostradas as análises de variância (ANOVA) para o ensaio SCB, de acordo com a norma AASHTO T 394-21. Essa análise foi realizada utilizando os resultados obtidos de resistência ao trincamento máximo ( $\sigma_{m\acute{a}x}$ ) e o nível do coeficiente de determinação é de 10%.

*Tabela 72 – ANOVA Ensaio SCB norma AASHTO T 394-21 amostras NC*

ANOVA – R <sup>2</sup> = 0,796416					
FATOR	SS	GL	MS	F	p
TEOR	160,7415	3	53,58051	22,78134	0,000001
AR	20,8100	3	6,93665	2,94932	0,055099
MOMENTO	16,4590	2	4,22952	2,37312	0,074187
ERROR	51,7428	22	2,35195		

Tabela 73 – ANOVA Ensaio SCB norma AASHTO T 394-21 amostras STA

ANOVA – R <sup>2</sup> = 0,764708					
FATOR	SS	GL	MS	F	p
TEOR	37,67589	3	12,55863	14,75367	0,000017
AR	15,74154	3	6,24718	8,29038	0,031857
MOMENTO	9,22907	2	4,61453	5,42108	0,012187
ERROR	18,72685	22	0,85122		

Tabela 74 – ANOVA Ensaio SCB norma AASHTO T 394-21 amostras LOTA 3

ANOVA – R <sup>2</sup> = 0,776245					
FATOR	SS	GL	MS	F	p
TEOR	17,30288	3	5,767625	17,97969	0,000004
AR	12,07187	3	3,023958	8,07469	0,072966
MOMENTO	11,20952	2	2,604758	6,88524	0,075510
ERROR	7,05728	22	0,320786		

Tabela 75 – ANOVA Ensaio SCB norma AASHTO T 394-21 amostras LOTA 5

ANOVA – R <sup>2</sup> = 0,794292					
FATOR	SS	GL	MS	F	p
TEOR	15,91096	3	5,303654	7,728016	0,001049
AR	9,54768	3	4,182560	5,266011	0,049148
MOMENTO	4,36450	2	2,182248	3,179778	0,061229
ERROR	15,09836	22	0,686289		

Ao analisa os resultados de p é possível afirmar que as condições de condicionamento as componentes teor de RAP, teor de AR e momento de adição apresentaram comportamento significativamente diferentes e consequentemente significante para o modelo. Este fato mostra que é possível predizer o comportamento deste ensaio por meio dessas componentes separadamente, fato destoante quando comparados os resultados obtidos para a norma BS EN 12697-44. Esse comportamento é observado em todas as etapas de condicionamento e mantendo um R<sup>2</sup> relevante.

De forma análoga ao que foi realizado em tópicos anteriores, foi realizado uma análise complementar através da utilização do teste de comparação múltipla, o teste de Tukey. Os resultados obtidos nessa nova análise estão expostos nas Tabela 76, Tabela 77 e Tabela 78. Devido ao fato que, as três condições de condicionamento

produziram resultados similares, as análises dos resultados para a condição NC pode ter sua análise estendida as demais variáveis de condicionamento.

*Tabela 76 – Teste Tukey para a componente teor de RAP.*

Tukey teste; variável SCB AASHTO Grupos homogêneos, alpha = ,05000 Erro: entre MS = 2,3519, df = 22,000				
TEOR	1	2	3	4
25	****			
50		****		
75			****	
100				****

Como observado nos resultados da Tabela 76, para a variável teor de RAP as componentes variaram entre si, sendo possível predizer que cada variável apresentara comportamento próprio para o ensaio SCB pela norma AASHTO T 394-21.

*Tabela 77 – Teste Tukey para a componente agente de reciclagem.*

Tukey teste; variável SCB AASHTO Grupos homogêneos, alpha = ,05000 Erro: entre MS = 0, ,85122, df = 22,000		
AR	1	2
S++	****	
O++	****	
O	****	
S	****	
P		****

Para o caso da componente agente de reciclagem, ao analisar os resultados exposto na Tabela 77, observa-se a formação de dois grupos, sendo é possível afirmar que o grupo P foi o único que apresentou comportamento dessa propriedade de forma isolada, os demais apresentaram comportamento similares. Conforme os resultados apresentados, a única componente que pode ter seu comportamento predito pela componente AR é a P, enquanto as demais só poderão ser preditas seu comportamento se em comparação a variável P. Esse fato faz com que a análise entre as variáveis em questão seja irrelevante.

Tabela 78 – Teste Tukey para a componente momento de adição.

Tukey teste; variável SCB AASHTO Grupos homogêneos, alpha = ,05000 Erro: entre MS = 0, ,85122, df = 22,000			
MOMENTO	1	2	3
R	****		
A	****	****	
L		****	****
S/AR			****

Para o caso da variável momento de adição, ao analisar os resultados exposto na Tabela 78, observa-se a formação de três grupos de semelhanças. Por meio dos resultados é possível afirmar que: os grupos R e A são similares entre si e diferem dos demais; os A e L são similares entre si e diferem dos demais; e os grupos L e S/AR são similares entre si e diferem dos demais.

#### 4.4 Resumo dos resultados obtidos

A Tabela 79 foi elaborada para facilitar a análise dos resultados, nela constam todos os ensaios realizados em amostras não condicionadas nessa pesquisa. Para facilitar o entendimento foi utilizado um método expositivo, onde os resultados são comparados a amostras de referência (ref) e mediante ganho (↑) ou perda (↓) de propriedades. Vale salientar que os resultados também podem ser considerados aproximadamente próximos (≈) ao de referência. Para tanto, serão utilizados resultados de referência geral (ref), que são resultados de amostras com 25% de RAP sem modificações, e de referência por teor (ref50, ref 75 e ref 100), que são os resultados para teores não modificados com seus equivalentes teores modificados.

Tabela 79 – Comparação dos ensaios e parâmetros.

Ensaio Abreviatura	Ensaio						
	RT	MR	LOTTMAN	FADIGA SC	SCB* ( $\delta_{\text{máx}}$ )	SCB* ( $\sigma_{\text{máx}}$ )	SCB** (FI)
25 P	ref/ref 25	ref/ref 25	ref/ref 25	ref/ref 25	ref/ref 25	ref/ref 25	ref/ref 25
50 P	↑/ref 50	↑/ref 50	≈/ref 50	↑/ref 50	↓/ref 50	↑/ref 50	↓/ref 50
75 P	↑/ref 75	↑/ref 75	≈/ref 75	↑/ref 75	↓/ref 75	↑/ref 75	↓/ref 75
100 P	↑/ref 100	↑/ref 100	↓/ref 100	↑/ref 100	↓/ref 100	≈/ref 100	↓/ref 100
100 R O	↑ / ↓	≈ / ↓	↓ / ↓	≈ / ↓	↓ / ≈	↑ / ≈	↓ / ↓
100 R O+	↑ / ↓	↓ / ↓	↓ / ↓				
100 R O++	≈ / ↓	↓ / ↓	↓ / ↓	↓ / ↓	↓ / ≈	↓ / ↓	↓ / ↓
75 L O	↑ / ↓	≈ / ↓	↓ / ↓	↓ / ↓	↓ / ↑	↓ / ↓	↓ / ↑
75 L O+	≈ / ↓	↓ / ↓	↓ / ↓				
75 L O++	↓ / ↓	↓ / ↓	↓ / ↓	↓ / ↓	↓ / ↑	↓ / ↓	↓ / ↑
75 R O	↑ / ↓	↓ / ↓	↓ / ↓	↓ / ↓	↓ / ↓	↓ / ↓	↓ / ↑
75 R O+	↑ / ↓	↓ / ↓	↓ / ↓				
75 R O++	↓ / ↓	↓ / ↓	↓ / ≈	↓ / ↓	↓ / ↑	↓ / ↓	↓ / ↑
75 A O	↑ / ↓	≈ / ↓	↓ / ≈	↓ / ↓	↓ / ↑	↓ / ↓	↓ / ↑
75 A O+	↓ / ↓	↓ / ↓	↓ / ≈				
75 A O++	↓ / ↓	↓ / ↓	↓ / ≈	↓ / ↓	↓ / ≈	↓ / ↓	↓ / ↑
50 L O	↓ / ↓	↓ / ↓	↓ / ↓	↓ / ↓	↓ / ↑	↓ / ↓	↓ / ↑
50 L O+	↓ / ↓	↓ / ↓	↓ / ↓				
50 L O++	↓ / ↓	↓ / ↓	↓ / ↓	↓ / ↓	↓ / ≈	↓ / ↓	↓ / ↑
50 R O	↓ / ↓	↓ / ↓	↓ / ↓	↓ / ↓	↓ / ≈	↓ / ↓	↓ / ↑
50 R O+	↓ / ↓	↓ / ↓	↓ / ↓				
50 R O++	↓ / ↓	↓ / ↓	↓ / ↓	↓ / ↓	≈ / ↑	↓ / ↓	↓ / ↑
50 A O	↓ / ↓	↓ / ↓	↓ / ↓	↓ / ↓	↓ / ↑	↓ / ↓	↓ / ↑



50 A O+	↓ / ↓	↓ / ↓	↓ / ↓				
50 A O++	↓ / ↓	↓ / ↓	↓ / ↓	↓ / ↓	↓ / ≈	↓ / ↓	↑ / ↑
100 R S	↑ / ≈	↑ / ↓	↓ / ≈	↑ / ↑	↓ / ↑	↑ / ↑	↓ / ↓
100 R S+	↑ / ≈	↑ / ↓	↓ / ≈				
100 R S++	↑ / ≈	↑ / ↓	↓ / ≈	≈ / ↓	↓ / ↑	↑ / ↑	↓ / ↓
75 L S	↑ / ≈	↑ / ↓	≈ / ≈	↑ / ≈	↓ / ↑	↑ / ≈	↓ / ↑
75 L S+	↑ / ≈	↑ / ↓	↓ / ≈				
75 L S++	↑ / ≈	↑ / ↓	↓ / ≈	↑ / ≈	↓ / ↑	↑ / ≈	↓ / ↑
75 R S	↑ / ≈	↑ / ↓	↓ / ≈	↑ / ≈	↓ / ↑	↑ / ≈	↓ / ↑
75 R S+	↑ / ↓	↑ / ↓	↓ / ↓				
75 R S++	↑ / ↓	↑ / ↓	↓ / ↓	↑ / ↓	↓ / ↑	↑ / ≈	↓ / ↑
75 A S	↑ / ≈	↑ / ≈	↓ / ≈	↑ / ↑	↓ / ≈	↑ / ≈	↓ / ↑
75 A S+	↑ / ≈	↑ / ≈	↓ / ↓				
75 A S++	↑ / ≈	↑ / ≈	↓ / ↓	↑ / ↓	↓ / ↑	↑ / ↓	↓ / ↑
50 L S	↑ / ↑	↓ / ↓	↓ / ↓	≈ / ≈	≈ / ↑	↓ / ↓	↓ / ↑
50 L S+	↑ / ≈	↓ / ↓	↓ / ↓				
50 L S++	↑ / ≈	↓ / ↓	↓ / ↓	↑ / ↑	↓ / ↓	↑ / ↑	↓ / ↓
50 R S	↑ / ≈	↓ / ↓	↓ / ↓	≈ / ↓	↓ / ↑	≈ / ↓	↓ / ↑
50 R S+	↑ / ≈	↓ / ↓	↓ / ↓				
50 R S++	↑ / ≈	↓ / ↓	↓ / ↓	≈ / ↓	↓ / ≈	↓ / ↓	↓ / ↑
50 A S	↑ / ↑	↓ / ↓	↓ / ↓	≈ / ↓	↓ / ↑	≈ / ↓	↓ / ↑
50 A S+	↑ / ↑	↓ / ↓	↓ / ↓				
50 A S++	↑ / ↑	↓ / ↓	↓ / ↓	↓ / ↓	↓ / ↑	↓ / ↓	↓ / ↑

\* SCB de acordo com a norma BS EN 12697-44

\*\* SCB de acordo com a norma AASHTO T 394-21

A demonstração feita na Tabela 79 é uma comparação direta de resultados, o que não implica a inviabilidade da composição. Tal análise só demonstra de forma direta se houve ganhos ou perdas quando comparada as composições de referências. Para uma análise mais objetiva de viabilidade das composições, em alguns ensaios, deverão ser feitas análises de interação com as demais camadas do pavimento, sendo exemplos os ensaios de modulo de resiliência e fadiga SC. Ensaios como RT, SCB e lottman por apresentar um desempenho mínimo são mais fácil de análise (Tabela 80).

Tabela 80 – Comparação com resultados mínimos exigidos em normas.

Ensaio	RT	LOTTMAN	SCB*	SCB** (FI)
25 P	↑	↑	↑	↑
50 P	↑	↑	↑	↑
75 P	↑	↑	↓	↑
100 P	↑	↓	↓	↓
100 R O	↑	↓	↓	↓
100 R O+	↑	↓		
100 R O++	↑	↓	↓	↓
75 L O	↑	↓	↑	↑
75 L O+	↑	↓		
75 L O++	↑	↓	↑	↑
75 R O	↑	↓	↑	↑
75 R O+	↑	↓		
75 R O++	↑	↓	↓	↑
75 A O	↑	↓	↑	↑
75 A O+	↑	↓		
75 A O++	↑	↓	↓	↑
50 L O	↑	↓	↑	↑
50 L O+	↑	↓		
50 L O++	↑	↓	↑	↑
50 R O	↑	↓	↑	↑
50 R O+	↑	↓		
50 R O++	↑	↓	↑	↑
50 A O	↑	↓	↑	↑
50 A O+	↑	↓		
50 A O++	↑	↓	↑	↑

100 R S	↑	↓	↓	↓
100 R S+	↑	↓		
100 R S++	↑	↓	↓	↓
75 L S	↑	↑	↑	↑
75 L S+	↑	↓		
75 L S++	↑	↓	↑	↑
75 R S	↑	↓	↑	↑
75 R S+	↑	↓		
75 R S++	↑	↓	↑	↑
75 A S	↑	↓	↓	↑
75 A S+	↑	↓		
75 A S++	↑	↓	↑	↑
50 L S	↑	↓	↑	↑
50 L S+	↑	↓		
50 L S++	↑	↓	↑	↑
50 R S	↑	↓	↑	↑
50 R S+	↑	↓		
50 R S++	↑	↓	↑	↑
50 A S	↑	↓	↑	↑
50 A S+	↑	↓		
50 A S++	↑	↓	↑	↑

\* SCB de acordo com a norma BS EN 12697-44

\*\* SCB de acordo com a norma AASHTO T 394-21

Observa-se que praticamente todas as amostras não condicionadas não apresentaram boa resistência ao dano por umidade induzida, indicando a necessidade de doping das composições. Embora seja um desempenho negativo, o mesmo não representa inviabilidade, tendo em vista, a possibilidade de correção. Ao se tirar o critério de resistência ao dano por umidade induzida, vê-se que apenas as composições com 100% de RAP apresentaram-se inviáveis. As composições 75 P, 75 R O++, 75 A O++ e 75 A S, apresentaram resultado insatisfatório para a norma BS EN 12697-44 e satisfatória para a norma AASHTO T 394-21. Esses teores devem ser melhor analisados com ensaios de durabilidade (STA e LOTA), para determinar a confiabilidade da composição ao longo de sua vida útil. As demais composições, em teoria, estão aptas para utilização em misturas asfálticas. Entretanto, como visto

anteriormente, é de suma importância a análise das composições quanto aos condicionamentos, pois esses simulam o desempenho durante a vida útil da mistura.

A Tabela 81 apresenta uma comparação dos efeitos dos condicionamentos em relação ao desempenho das composições não condicionadas.

*Tabela 81 – Comparação dos efeitos dos condicionamentos.*

Ensaio	RT	MR	LOTTMAN	FADIGA SC	SCB*	SCB** (FI)
STA	↑	↑		↑	↓	↓
LOTA 3	↑	↑		↑	↓	↓
LOTA 5	↑	↑		↑	↓	↓
F-T			↓			

As observações presentes na Tabela 81, deixam claro o aumento de rigidez com a evolução do envelhecimento produzido pelo condicionamento ao envelhecimento e a deterioração da qualidade da mistura com o condicionamento F-T. Por serem ensaios de trincamento, intimamente ligado com rigidez da composição, os ensaios SCB são os que melhor determinam o desempenho das misturas ao longo do condicionamento. Logo, tais ensaios irão determinar os melhores desempenhos das composições analisados nessa pesquisa.

A Tabela 82 apresenta uma comparação das variáveis analisadas estatisticamente utilizando-se do método ANOVA em relação ao ensaios e condicionamentos realizados nessa pesquisa.

Tabela 82 – Comparação análise estatística ANOVA

Ensaio	Variáveis		
	TEOR	AR	MOMENTO
RT NC	↑	↑	↑
RT STA	↑	↑	↑
RT LOTA 5	↑	↑	↑
MR NC	↑	↑	↑
MR STA	↑	↑	↑
MR LOTA 5	↑	↑	↑
LOTTMAN 1 CICLO	↑	↓	↓
LOTTMAN 3 CICLOS	↑	↓	↓
LOTTMAN 5 CICLOS	↑	↓	↓
SCB* NC	↑	↑	↑
SCB* STA	↑	↑	↑
SCB* LOTA 3	↑	↑	↑
SCB* LOTA 5	↑	↑	↓
SCB** NC	↑	↑	↑
SCB** STA	↑	↑	↑
SCB** LOTA 3	↑	↑	↑
SCB** LOTA 5	↑	↑	↑

As observações presentes na Tabela 82 deixam claro o grau de significância observados nas análises estatísticas ANOVA, sendo possível afirmar que possível prever o comportamento das composições com base nos ensaios realizado. Entretanto, para o ensaio SCB pela norma BS EN 12697-44 com condicionamento LOTA 5 a variável momento de adição do AR apresentou baixa significância. Outro ponto a ser observado é que, apenas para o ensaio lottman as variáveis agente de reciclagem e momento de adição apresentaram grau de significância baixo.

## 5 Considerações finais

As conclusões finais apresentadas neste trabalho restringem-se ao RAP caracterizado nesta pesquisa, para outros tipos é necessário a análise dos parâmetros mecânicos. Este tópico pretende pontuar aquilo que se acredita serem as maiores contribuições da presente tese. Algumas condições verificadas durante análise experimental devem ser destacadas:

- as adições de AR melhoraram a trabalhabilidade e a qualidade das misturas recicladas, verificadas por meio da melhor homogeneização das misturas resultantes;
- as composições com teores de 75 e 100% apresentaram, relativa, facilidade de execução, desde da parte de fragmentação dos grumos maiores até compactação. Essa característica pode ser interessante uma análise mais profunda, já que utilizar altos teores podem levar a um período menor de mistura e, conseqüentemente, redução do consumo de energia;
- os teores com 75 e 100% de adição de RAP apresentaram emissão excessiva de gases, tal qual o esperado. Esse comportamento foi verificado em todas as composições com esses teores;
- a retirada da umidade foi realizada previamente devido as amostras coletadas estarem expostas ao meio no momento de coleta. No início foram realizados alguns testes sem a retirada da umidade, entretanto essas misturas apresentaram baixo desempenho e dificuldade na etapa de mistura e homogeneização;
- em alguns casos, foi observada a volatilização dos ARs na hora de sua aplicação, geralmente, ocorrendo quando do contato com o agregado virgem. Para reduzir esse efeito as composições com acréscimo junto ao agregado passaram por processo prévio de homogeneização RAP/Agregado novo, para em seguida ser adicionado o AR;
- devido a sua disposição antes da coleta, o RAP coletado apresentava alguns materiais contaminantes que passaram despercebidos no momento de coleta (chupeta, piolas de cigarro, seixos, entre outros). Outros materiais indesejados também foram encontrados, mas estes

eram constituintes do pavimento original (camada de tinta de sinalização e tachas). Esses materiais foram retirados sempre que foi possível.

Com essas condições expostas é possível afirmar que tipo de ajustes devem ser realizados para a correta confecção de misturas recicladas com altos teores de RAP. Ajustes na planta da usina podem ser necessárias a depender das características que se pretende trabalhar. Ao observar os resultados é possível prever que existe necessidade de montagem de um segundo cilindro para aquecimento do RAP, para os casos que: o RAP apresente necessidade de retirada de umidade; redução de emissões de gases; acréscimo de AR junto ao RAP; entre outros. Essa configuração com dois cilindros tem desvantagens óbvias quanto ao aumento de gasto e espaço físico. Entretanto, benefícios como agilidade na produção, diminuição de gases e menor desgaste do RAP devem compensar a sua escolha. Vale a observação que, embora as composições com 75% possam ser executadas em qualquer configuração, os benefícios inerentes do sistema com cilindro duplo sejam mais efetivos nessas composições.

Para os casos de impossibilidade, ou desinteresse, do sistema com duplo cilindro, as plantas de usinagem convencionais podem ser utilizadas, com ajustes e limitações. Deve-se eliminar a umidade, seja por correto condicionamento e estocagem do RAP ou por aumento de exposição dele no cilindro. Devido a isso, já é previsível a emissão excessiva de gases e um possível desgaste nos componentes, que deva ser corrigido com o AR. Embora os gastos quanto a usinagem diminuam, a qualidade final das misturas recicladas, se não corretamente executadas, serão duvidosas.

#### **5.1.1.1 Avaliação e percepção da influência do teor de RAP**

De uma forma geral é perceptível o aumento da rigidez das misturas recicladas com o aumento do teor de RAP presente nela, estando visível em praticamente todos os ensaios e composições. Esse aumento da rigidez compromete de forma significativa a resistência ao trincamento dessas misturas, ficando evidente esse

comportamento nas deformações até a ruptura no ensaio SCB (BS EN 12697-44) e nos resultados FI do ensaio SCB (AASHTO T 394-21).

Embora esse comprometimento nas propriedades ocorra, os resultados ainda demonstram a viabilidade de misturas recicladas com teores de até 75% RAP, feitas com as configurações corretas. Essas configurações além de apresentarem alta capacidade de aproveitamento de material, diminuindo a necessidade de transporte e descarte adequado, é uma característica de suma importância pela diminuição de insumos.

#### **5.1.1.2 Avaliação e percepção da influência do AR e seu teor**

Observar-se comportamento distinto entre os resultados apresentados pelos ARs utilizados nessa pesquisa. De uma forma geral, as misturas recicladas com óleo residual de motor apresentam-se exequíveis quando avaliados os parâmetros mínimos exigidos em uma camada de rolamento. Entretanto observa-se a perda de desempenho em todos os parâmetros observados, em relação ao seu teor equivalente e sem adição, sendo uma redução significativa, o que faz com que seja necessária uma análise química para melhor entendimento desse comportamento. A adição de teores superiores ao ideal acentuou esse comportamento de degradação das composições com adição de óleo residual de motor.

Os resultados das composições com AR ADCAP WM mantiveram-se próximas as de teor equivalente sem adição, no entanto houve ganhos em propriedades, como: aumento na capacidade de deformação, maior resistência ao envelhecimento, maior resistência ao trincamento e menores perdas de resistência ao dano por umidade induzida. O acréscimo desse aditivo, além de manter a alta resistência ao trincamento, apresentou um ganho considerável nas capacidades de deformações até ruptura total dos corpos de prova, demonstrados nos ensaios SCB. Tal comportamento é desejável, pois garante que a mistura irá resistir a altas tensões de carregamento sem a camada de revestimento venha a romper ou trincar. Teores superiores ao ótimo de ADCAP WM (S+ ou S++) não agregaram benefícios às composições, o que indica que a utilização do teor ótimo nas misturas recicladas.



### **5.1.1.3 Avaliação e percepção da influência do momento de adição do AR**

Em relação ao momento de adição do AR os resultados mostram que todos os métodos são eficientes para serem utilizados em misturas recicladas. Entretanto devem ser apresentadas duas considerações:

1. O baixo desempenho das misturas adicionadas com óleo residual de motor deve-se exclusivamente ao aditivo, não aos momentos de adição. Embora as composições com acréscimo de óleo residual de motor diretamente sobre o ligante apresentem resultados satisfatório, seu desempenho é inferior as demais.
2. As composições com adição de AR junto ao RAP apresentaram os menores desempenhos, dentre as configurações analisadas. Entretanto, essa variação de desempenho foi relativamente irrisória, sendo em muitos casos desconsiderada.

De forma geral, as três metodologias apresentaram desempenhos similares e adequados a sua aplicação em misturas recicladas. Vale ressaltar que a utilização ideal de cada AR foi ressaltada nessa pesquisa, onde os ARs utilizados são indicados com a aplicação direta no ligante, com o destaque que o ADCAP WM também pode ser utilizado nas demais configurações. Outra informação relevante é que o momento de adição junto ao RAP tem indicação de utilização com agentes rejuvenescedores, aditivo não utilizado nessa pesquisa, o que torna uma nova possibilidade para estudos futuros. Por meio dessas análises afirma-se que, como o momento de adição para os ARs utilizados nessa pesquisa não alteraram de forma significativa os resultados mecânicos das composições, deve-se optar pelo método tradicional uma vez que ele não acarretará mudança em usina.

### **5.1.1.4 Avaliação e percepção sobre a análise estatística**

De forma geral a análise estatística mostrou a relevância dos parâmetros analisados na confecção de misturas recicladas, onde foi possível observar a significância de todas as variáveis analisadas. As únicas variáveis que apresentaram comportamentos discrepantes foram a SCB pela norma BS EN 12697-44 (LOTA5) e

todas as variáveis ligadas ao ensaio Lottman. Entretanto, esse comportamento já era esperado, visto que, os resultados observados na realização do ensaio apresentaram baixa variação.

Outro ponto a ser observado na análise estatística é os valores obtidos de  $R^2$ , embora tenha apresentado valores altos nos ensaios de RT e MR, esse parâmetro apresentou grandes variações, principalmente nos ensaios de Lottman e SCB. Tal comportamento é indesejado já que valores de  $R^2$  altos implicam em análises com maiores precisões.

Outra análise que deve ter sua análise mais aprofundada é a realizada pelo teste Tukey, pois essa análise consistiu em comparar todos os possíveis pares de médias e não em uma abordagem com quantificação dessas comparações. Entretanto, tal análise se encontra fora do foco dessa pesquisa, mas sua análise poderá complementar e justificar alguns resultados onde foram observadas similaridades entre variáveis que apresentaram grau de significância adequado. Dessa forma, seriam quantificadas as comparações de todos os possíveis pares de médias.

## 6 CONCLUSÕES

Por meio da análise dos resultados obtidos nessa pesquisa, é possível concluir que:

As adições dos agentes de reciclagem resultaram em alterações nos parâmetros das composições ensaiadas, demonstrando efetivamente a sua atividade nas misturas ensaiadas. O acréscimo de óleo residual de motor promoveu a redução da rigidez das misturas ensaiadas, característica benéfica as composições em virtude da elevada rigidez do RAP em decorrência do ligante oxidado presente nele. Entretanto, essa diminuição pode ser devido à falta de uma interação efetiva entre o agente e o ligante envelhecido, estando o agente diminuindo a efetividade de ligação ou aderência da mistura. O acréscimo de ADCAP WM não alterou de forma significativa algumas propriedades, como RT e MR, mesmo assim, em sua maioria, as adições desse AR apresentaram os melhores desempenhos. Outro ponto a ser ressaltado foi o ganho ocorrido nas propriedades analisadas do ensaio SCB, onde ocorreu o aumento nas capacidades de deformação até a ruptura apresentadas nas composições com esse acréscimo. O que torna o ADCAP WM um AR viável para misturas recicladas.

Os resultados obtidos nessa pesquisa demonstram a efetividade da metodologia de condicionamento. Os resultados de fadiga e SCB foram altamente alterados pelo condicionamento ao envelhecimento, evidenciando a redução do desempenho das composições. Por se tratar de uma estimativa de desempenho futuro, os processos de condicionamento ao envelhecimento tornam-se uma ferramenta importante para o desenvolvimento de misturas asfálticas. A incorporação dos processos de condicionamento ao envelhecimento em dosagens de misturas asfálticas será fundamental para a realização de uma dosagem mais realista. Esse fato se torna ainda mais relevante no caso de misturas recicladas, tendo em vista que muitas delas podem estar em zonas limites de utilização.

A mesma efetividade foi observada no condicionamento F-T, onde é possível observar que os ciclos consecutivos de gelo e degelo danificaram ainda mais a estrutura da mistura, em relação ao condicionamento Lottman. No entanto, esse

condicionamento carece de uma base de dados onde se possa determinar a equivalência desses ciclos em relação ao desempenho da composição em campo.

Ao avaliar as etapas de adição do agente de reciclagem não foi possível observar variações significativas entre elas, no entanto, a etapa que apresentou resultados levemente superiores as demais foi a adição do AR diretamente ao ligante. Essa etapa é visivelmente superior quanto a adição de óleo residual de motor, onde as demais formas de adição não apresentaram desempenho satisfatório durante a vida útil da mistura. Para o caso de adições de ADCAP WM, além da adição ao ligante, pode-se realizar a adição direto a composição total, ou seja, em um misturador único aquecer agregado/RAP, adicionar o ADCAP WM, simultaneamente ou seguido do CAP. Observa-se que o único método de adição que falhou foi o de adição sobre o RAP, no entanto, esse método é mais indicado em adições de agentes rejuvenescedores, onde existe recomendações técnicas de uso nesse formato.

A análise estatística mostrou que os parâmetros teor de RAP, agente de reciclagem e momento de adição de AR apresentaram significância adequada aos ensaios analisados. Entretanto, as variáveis SCB pela norma BS EN 12697-44 (LOTA5) e as variáveis ligadas ao ensaio Lottman apresentaram baixa significância para as condições agente de reciclagem (ensaio Lottman) e momento de adição (ensaio Lottman e SCB – LOTA 5). Esse comportamento já era esperado para o ensaio Lottman, pois os resultados obtidos apresentaram uma variação pequena, o que resultou em valores de  $R^2$  baixos para esse teste (entre 50 e 75%). Para os ensaios SCB pela norma BS EN 12697-44 (LOTA5), observa-se que sua significância (12,78%) ficou próxima do limite estimado nessa pesquisa (10%), podendo essa variação ser em decorrência do espaço amostral. Outro ponto a ser pontuado foi a variabilidade dos valores obtidos de  $R^2$ , onde foi observado valores altos nos ensaios de RT e MR (90 a 99%), enquanto que nos ensaios de Lottman e SCB apresentaram-se abaixo (70 a 80%). A análise pelo teste Tukey possibilitou a comparação de todos os possíveis pares de média de forma satisfatória, porém sem quantificá-las, análise com potencial em pesquisas futuras.

Ao se analisar o contexto geral é possível afirmar que é possível utilizar até 75% de RAP em misturas asfálticas recicladas, no entanto, é necessário um acompanhamento detalhado de sua execução e desempenho ao longo de sua vida

útil. Ao se adicionar óleo residual de motor é possível confeccionar misturas recicladas com adições de 50 e 75% de RAP, desde que a adição do óleo residual seja feita diretamente ao ligante novo. Para o caso de adições de ADCAP WM as mesmas adições podem ser realizadas e as configurações de adição podem ser acrescidas de adição do agente de reciclagem direto na mistura.

## **6.1 Sugestões para pesquisas futuras**

Para aprimoramento do entendimento das misturas recicladas com altos teores de RAP, sugere-se:

- realização do mesmo quadro de análise com adições de agentes rejuvenescedores. O grupo que esses agentes pertencem foi o único não desenvolvido nessa pesquisa, a sua análise permitirá aferir o desempenho de todos os grupos de agentes de reciclagem;
- análises de adição de teores de RAP entre 75 e 100%, tendo em vista que, o teor de 75% pode não ser efetivamente o máximo a ser incorporado. A análise de teores superiores poderá obter teores com maior percentual de RAP nas misturas recicladas;
- analisar RAPs com diferentes ligantes ou faixas de envelhecimento. Tal análise permitirá que seja montado um banco de dados sobre a influência desses parâmetros no desempenho e proporção do RAP em misturas recicladas;
- desenvolver uma análise de deformação resiliente para o ensaio de fadiga em SCB. Essa análise pode contribuir na aceitação do método de fadiga em cps semicirculares, pois as metodologias atuais priorizam a análise da vida de fadiga em função da deformação resiliente. Um exemplo disso é a aplicação da equação de vida de fadiga de deformação resiliente para análise no software do MeDiNa;
- comparar resultados de fadiga por compressão diametral com os resultados de fadiga com cps semicirculares. Essa análise permitirá a efetivação da equidade entre os meios, ou ao menos uma relação de equivalência.

## REFERENCIAS

AASHTO – AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO R 30-02. **STANDARD PRACTICE FOR MIXTURE CONDITIONING OF HOT MIX ASPHALT (HMA)**. Washington, D.C., 2010.

\_\_\_\_\_. AASHTO TP 70. **STANDARD METHOD OF TEST FOR MULTIPLE STRESS CREEP RECOVERY (MSCR) TEST OF ASPHALT BINDER USING A DYNAMIC SHEAR RHEOMETER (DSR)**. Washington, D.C., 2013.

\_\_\_\_\_. AASHTO T 304 – 17, **STANDARD METHOD OF TEST FOR UNCOMPACTED VOID CONTENT OF FINE AGGREGATE**. Washington, D.C., 2017.

\_\_\_\_\_. AASHTO T 319. **STANDARD METHOD OF TEST FOR QUANTITATIVE EXTRACTION AND RECOVERY OF ASPHALT BINDER FROM ASPHALT MIXTURES**. Washington, D.C., 2015.

\_\_\_\_\_. AASHTO M 320. **STANDARD SPECIFICATION FOR PERFORMANCE-GRADED ASPHALT BINDER**. Washington, D.C., 2021.

\_\_\_\_\_. AASHTO T 393. **STANDARD METHOD OF TEST FOR DETERMINING THE FRACTURE POTENTIAL OF ASPHALT MIXTURES USING THE ILLINOIS FLEXIBILITY INDEX TEST (I-FIT)**. Washington, D.C., 2021.

\_\_\_\_\_. AASHTO T 394. **STANDARD METHOD OF TEST FOR DETERMINING THE FRACTURE ENERGY OF ASPHALT MIXTURES USING THE SEMICIRCULAR BEND GEOMETRY (SCB)**. Washington, D.C., 2021.

\_\_\_\_\_. AASHTO P 442. **STANDARD PRACTICE FOR MIXTURE CONDITIONING OF HOT MIX ASPHALT (HMA)**. Washington, D.C., 2002. (Inactive)

ABDO, A. M. A.; **UTILIZING RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT (RAP) MATERIALS IN NEW PAVEMENTS – A REVIEW**. Int. J. of Thermal & Environmental Engineering Volume 12, No. 1 (2016) 61-66

AL-QADI, I.; OZER, H.; LAMBROS, J.; EL KHATIB, A.; SINGHVI, P.; KHAN, T.; RIVERA, J.; DOLL, B. **TESTING PROTOCOLS TO ENSURE PERFORMANCE OF HIGH ASPHALT BINDER REPLACEMENT MIXES USING RAP AND RAS**. Illinois Center for Transportation. Research Report, No. FHWA-ICT-15-017, 2015.

ALI, A. W., MEHTA, Y. A., NOLAN, A., PURDY, C., BENNERT, T.; **INVESTIGATION OF THE IMPACTS OF AGING AND RAP PERCENTAGES ON EFFECTIVENESS OF ASPHALT BINDER REJUVENATORS**. Construction and Building Materials, 110, 211–217. 2016.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6560, **MATERIAIS BETUMINOSOS: DETERMINAÇÃO DO PONTO DE AMOLECIMENTO: MÉTODO DO ANEL E BOLA**. Rio de Janeiro, 2000.

\_\_\_\_\_. NBR 6576, **MATERIAIS BETUMINOSOS: DETERMINAÇÃO DA PENETRAÇÃO**. Rio de Janeiro, 1998.

\_\_\_\_\_. NBR 11341, **DERIVADOS DE PETRÓLEO: DETERMINAÇÃO DOS PONTOS DE FULGOR E DE COMBUSTÃO EM VASO ABERTO CLEVELAND**. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. NBR 15086: **MATERIAIS BETUMINOSOS - DETERMINAÇÃO DA RECUPERAÇÃO ELÁSTICA PELO DUCTILÔMETRO**. Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_. NBR 15087: **MISTURAS ASFÁLTICAS — DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL**. RIO DE JANEIRO, 2012.

\_\_\_\_\_. NBR 15184: **MATERIAIS BETUMINOSOS: DETERMINAÇÃO DA VISCOSIDADE EM TEMPERATURA ELEVADA USANDO UM VISCOSÍMETRO ROTACIONAL**. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. NBR 16018: **MISTURAS ASFÁLTICAS – DETERMINAÇÃO DA RIGIDEZ POR COMPRESSÃO DIAMETRAL SOB CARGA REPETIDA**. Rio de Janeiro, 2011.

AMIRKHANIAN, A., SPRING, D., ROESLER, J., PAULINO, G.; **FORWARD AND INVERSE ANALYSIS OF CONCRETE FRACTURE USING THE DISK-SHAPED COMPACT TENSION TEST**. Journal of Testing and Evaluation 44, no. 1 (2016): 625-634.

ARRUDA, S. M.; **AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO E AUTORREGENERATIVO DE MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS**. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 2021.

ASLI, H., AHMADINIA, E., ZARGAR, M., & KARIM, M.R.; **INVESTIGATION ON PHYSICAL PROPERTIES OF WASTE COOKING OIL – REJUVENATED BITUMEN BINDER**. Construction and Building Materials, 37, 398–405. 2012.

ASPHALT RECYCLING AND RECLAIMING ASSOCIATION – ARRA. **BASIC ASPHALT RECYCLING MANUAL**. 2nd ed. Annapolis, Estados Unidos. 2015.

ASPHALT INSTITUTE. **ASPHALT MIX DESIGN METHODS 7th EDITION**. USA, 2017.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM M 332-21, STANDARD SPECIFICATION FOR PERFORMANCE-GRADED ASPHALT BINDER USING THE MULTIPLE STRESS CREEP AND RECOVERY (MSCR) TEST**. USA, 2021.

\_\_\_\_\_. **ASTM E 399, STANDARD TEST METHOD FOR PLANE-STRAIN FRACTURE TOUGHNESS OF METALLIC MATERIALS**. USA, 2020.

\_\_\_\_\_. **ASTM D 2041, STANDARD TEST METHOD FOR THEORETICAL MAXIMUM SPECIFIC GRAVITY AND DENSITY OF BITUMINOUS PAVING MIXTURES**. USA, 2011.

\_\_\_\_\_. **ASTM D 2872, EFFECT OF HEAT AND AIR ON A MOVING FILM OF ASPHALT (ROLLING THIN-FILM OVEN TEST)**. USA, 1997.

\_\_\_\_\_. **ASTM D 4123, STANDARD METHOD OF INDIRECT TENSION TEST FOR RESILIENT MODULUS OF BITUMINOUS MIXTURES**. USA, 1982.

\_\_\_\_\_. **ASTM D 4791, STANDARD TEST METHOD FOR FLAT PARTICLES, ELONGATED PARTICLES, OR FLAT AND ELONGATED PARTICLES IN COARSE AGGREGATE**. USA, 2005.

\_\_\_\_\_. **ASTM D5404 / D5404M, STANDARD PRACTICE FOR RECOVERY OF ASPHALT FROM SOLUTION USING THE ROTARY EVAPORATOR**. USA, 2017.

\_\_\_\_\_. **ASTM D 6373-21a, STANDARD SPECIFICATION FOR PERFORMANCE-GRADED ASPHALT BINDER**. USA, 2021.

\_\_\_\_\_. **ASTM D 8044. STANDARD TEST METHOD FOR EVALUATION OF ASPHALT MIXTURE CRACKING RESISTANCE USING THE SEMI-CIRCULAR BEND TEST (SCB) AT INTERMEDIATE TEMPERATURES**. USA, 2016.



AZARI, H., & MOHSENI, A.; **EFFECT OF SHORT-TERM CONDITIONING AND LONG-TERM AGEING ON PERMANENT DEFORMATION CHARACTERISTICS OF ASPHALT MIXTURES**. Road Materials and Pavement Design, 14, 79–91. 2013.

BADELI, S., CARTER, A., DORÉ, G.; **EFFECT OF LABORATORY COMPACTION ON THE VISCOELASTIC CHARACTERISTICS OF NA ASPHALT MIX BEFORE AND AFTER RAPID FREEZE-THAW CYCLES**. Cold Reg. Sci. Technol. 146, 98–109. 2018.

BENNERT, T., DONGRÉ, R.; **BACKCALCULATION METHOD TO DETERMINE EFFECTIVE ASPHALT BINDER PROPERTIES OF RECYCLED ASPHALT PAVEMENT MIXTURES**. Transportation Research Record. Pag. 75–84. 2010.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L.M.G.; CERATTI, J.A.P.; SOARES, J.B., **PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA: FORMAÇÃO BÁSICA PARA ENGENHEIROS**. Petrobras, ABEDA, Rio de Janeiro, 2008.

BROWN, S. F., & SCHOLZ, T. V.; **DEVELOPMENT OF LABORATORY PROTOCOLS FOR THE AGEING OF ASPHALT MIXTURES**. In Proceedings of 2nd Euroasphalt and Eurobitume Conference (pp. 83–90). Barcelona, Spain, Book 1. 2000.

CARTER, A., PARADIS, M., **LABORATORY CHARACTERIZATION OF THE EVOLUTION OF THE THERMAL CRACKING RESISTANCE WITH THE FREEZE-THAW CYCLES**. 2010.

CAVALCANTE, F.P., **EFEITO DA ADIÇÃO DOS ÓLEOS DE RICINUS COMMUNIS E LINUS USITATISSIMUM NAS PROPRIEDADES REOLÓGICAS DO CIMENTO ASFÁLTICO DE PETRÓLEO PURO E MODIFICADO**. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 2016.

CERATTI, J. A. P., BERNUCCI, L., SOARES, J. B.; **UTILIZAÇÃO DE LIGANTES ASFÁLTICOS EM PAVIMENTAÇÃO**. ABEDA. 2015.

CENTOFANTE, R.; **ESTUDO LABORATORIAL DA UTILIZAÇÃO DE MATERIAL FRESADO EM MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS A QUENTE**. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2016.

CHEN, X.; **USE OF SEMI-CIRCULAR BEND TEST TO CHARACTERIZE FRACTURE PROPERTIES OF ASPHALT CONCRETE WITH VIRGIN AND**

**RECYCLED MATERIALS.** Tese (Doutorado). Pennsylvania State University. Pensilvânia. 2019.

CHONG, K. E KURUPPU, M.; **NEW SPECIMEN FOR FRACTURE TOUGHNESS DETERMINATION FOR ROCK AND OTHER MATERIALS.** International Journal of Fracture. 1984.

CIFUENTES, H., LOZANO, M., HOLUŠOVÁ, T., MEDINA, F. SEITL, S., FARNANDEZ-CANTELI, A.; **MODIFIED DISK-SHAPED COMPACT TENSION TEST FOR MEASURING CONCRETE FRACTURE PROPERTIES.** Int J Concr Struct Mater 11, 215–228. 2017.

CONG, P., ZHANG, Y., LIU, N.; **INVESTIGATION OF THE PROPERTIES OF ASPHALT MIXTURES INCORPORATING RECLAIMED SBS MODIFIED ASPHALT PAVEMENT.** Construction and Building Materials, 113. Pag. 334–340. 2016.

CONG, L., REN, M., SHI, J., YANG, F., GUO, G. **EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON PERFORMANCE DETERIORATION OF ASPHALT MIXTURE UNDER FREEZE-THAW CYCLES.** International Journal of Transportation Science and Technology. 2020.

CUNHA, C. M.; **RECICLAGEM DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS FLEXÍVEIS DIFERENTES TIPOS DE RECICLAGEM.** Dissertação (mestrado). INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA. Lisboa, 2010.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES. DNIT – ME 031/06. **PAVIMENTOS FLEXÍVEIS - CONCRETO ASFÁLTICO - ESPECIFICAÇÃO DE SERVIÇO.** Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_. DNIT – ME 033/21, **PAVIMENTOS FLEXÍVEIS – CONCRETO ASFÁLTICO RECICLADO EM USINA A QUENTE – ESPECIFICAÇÃO DE SERVIÇO.** Rio de Janeiro, 2021

\_\_\_\_\_. DNIT – ME 035/98, **AGREGADOS – DETERMINAÇÃO DA ABRASÃO “LOS ANGELES”.** Rio de Janeiro, 1998.

\_\_\_\_\_. DNIT – ME 053/94. **MISTURAS BETUMINOSAS – PERCENTAGEM DE BETUME.** Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_\_. DNIT – ME 054/97. **EQUIVALENTE AREIA.** Rio de Janeiro, 1997.

\_\_\_\_\_. DNIT – ME 078/94. **AGREGADO GRAÚDO: ADESSIVIDADE AO LIGANTE ASFÁLTICO**. Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_\_. DNIT – ME 081/98. **AGREGADOS: DETERMINAÇÃO DA ABSORÇÃO E DA DENSIDADE DE AGREGADO GRAÚDO**. Rio de Janeiro, 1998.

\_\_\_\_\_. DNIT – ME 083/98. **AGREGADOS: ANÁLISE GRANULOMETRICA**. Rio de Janeiro, 1998.

\_\_\_\_\_. DNIT – ME 084/95. **AGREGADO MIÚDO: DETERMINAÇÃO DE DENSIDADE REAL**. Rio de Janeiro, 1995.

\_\_\_\_\_. DNIT – ME 086/94. **AGREGADO: DETERMINAÇÃO DE ÍNDICE DE FORMA**. Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_\_. DNIT – ME 128/18. **PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA - ENSAIO DE FADIGA POR COMPRESSÃO DIAMETRAL À TENSÃO CONTROLADA – MÉTODO DE ENSAIO**. Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_\_. DNIT – ME 136/10. **DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL**. Rio de Janeiro, 2010.

DEVULAPALLI, L., KOTHANDARAMAN, S. K., SARANG, G.; **A REVIEW ON THE MECHANISMS INVOLVED IN RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT**. International Journal of Pavement Research and Technology. Pag. 185-196. 2019.

DIAS, P. S.; PINTO, I. E.; COSTA, C. **CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DE MATERIAIS FRESADOS INCORPORADOS A UM SOLO ARGILO SILTOSO PARA O USO EM CAMADAS DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS**. 44° RAPv; 18° Enacor. Foz do Iguaçu, PR. 2015.

DIN, I. M., MIR, M. S., FARROQ, M. A.; **EFFECT OF FREEZE-THAW CYCLES ON THE PROPERTIES OF ASPHALT PAVEMENTS IN COLD REGIONS: A REVIEW**. Transportation Research Procedia 48. 2020.

DING, B., ZOU, X., PENG, Z., LIU, X.; **EVALUATION OF FRACTURE RESISTANCE OF ASPHALT MIXTURES USING THE SINGLE-EDGE NOTCHED BEAMS**. Advances in Materials Science and Engineering. 2018.

DONY, A., COLIN, J., BRUNEAU, D., DROUADAIN, I., & NAVARO, J.; **RECLAIMED ASPHALT CONCRETES WITH HIGH RECYCLING RATES: CHANGES IN**

**RECLAIMED BINDER PROPERTIES ACCORDING TO REJUVENATING AGENT.** Construction and Building Materials, 41, 175–181. 2013.

EL-HAKIM, M., TIGHE, S., **IMPACT OF FREEZE-THAW CYCLES ON MECHANICAL PROPERTIES OF ASPHALT MIXES.** Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. 2014.

ELKASHEF, M., WILLIAMS R. C., COCHRAN, E. **INVESTIGATION OF FATIGUE AND THERMAL CRACKING BEHAVIOR OF REJUVENATED RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT BINDERS AND MIXTURES.** International Journal of Fatigue. Vol. 108, Pag. 90-95. 2018.

ELWARDANY, M., DANIEL, J.S.; **EVALUATION OF HIGH RAP CONTENT MIXTURE RESISTANCE TO MOISTURE DAMAGE.** Annual Meeting of the Northeast Asphalt User Producer Group, Providence. 2011.

EPPS MARTIN, A., ARAMBULA, E., YIN, F., GARCIA CUCALON, L., CHOWDHURY, A., LYTTON, R, ..., PARK, E. S.; **EVALUATION OF THE MOISTURE SUSCEPTIBILITY OF WMA TECHNOLOGIES** (NCHRP Report 763). National Cooperative Highway Research Program. 2014.

EUROPEAN STANDARD. BS EN 12697-44. **BITUMINOUS MIXTURES. TEST METHODS. CRACK PROPAGATION BY SEMI-CIRCULAR BENDING TEST.** European Committee, 2019.

FARRAR, M. J., TURNER, T. F., PLANCHE, J., SCHABRON, J. F., & HARNSBERGER, P. M.; **EVOLUTION OF THE CROSSOVER MODULUS WITH OXIDATIVE AGING.** Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2370, 76–83. Transportation Research Board of the National Academies, Washington, DC. 2013.

FAN, S., WANG, H., ZHU, H., Sun, W.; **EVALUATION OF SELF-HEALING PERFORMANCE OF ASPHALT CONCRETE FOR LOW-TEMPERATURE FRACTURE USING SEMICIRCULAR BENDING TEST.** Journal of Materials in Civil Engineering/Volume 30 Issue 9 - September 2018.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION RESEARCH AND TECHNOLOGY - FHWA. **Pavement Recycling Guidelines for State and Local Governments Participant's Reference Book.** Federal Highway Administration, USA. 1997.

\_\_\_\_\_ - FHWA. **User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction.** Federal Highway Administration, USA. 2016.

\_\_\_\_\_ - FHWA. **Overview of Project Selection Guidelines for Cold In-place and Cold Central Plant Pavement Recycling.** Federal Highway Administration, USA. 2018.

GAO, L., LI, H., XIE, J., YU, Z., CHARMOT, S.; **EVALUATION OF PAVEMENT PERFORMANCE FOR RECLAIMED ASPHALT MATERIALS IN DIFFERENT LAYERS.** Construction and Building Materials, Volume 159, 2018, Pages 561-566, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.019>.

GENNESSEAU, M. M. L., **AVALIAÇÃO DA DURABILIDADE DE MISTURAS ASFÁLTICAS A QUENTE E MORNAS CONTENDO MATERIAL ASFÁLTICO FRESADO.** Tese (Doutorado). Escola Politecnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transporte. São Paulo, 2015.

GODOI, L. C.; **APLICAÇÃO DO ENSAIO DE FLEXÃO EM AMOSTRA SEMICIRCULAR PARA AVALIAÇÃO DE TRINCAMENTO DE MISTURAS ASFÁLTICAS.** Dissertação (mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programe de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, RS. 2017.

GU, F., MA, W., WEST, R. C., TAYLOR, A. J., ZHANG, Y.; **STRUCTURAL PERFORMANCE AND SUSTAINABILITY ASSESSMENT OF COLD CENTRAL-PLANT AND IN-PLACE RECYCLED ASPHALT PAVEMENTS: A CASE STUDY.** Journal of Cleaner Production. Volume 208, 20. 2019, Pages 1513-1523.

GUDURU, G., TAVVA, T. L., KUNA, K.; **ESTIMATION OF RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT (RAP) CHARACTERISTICS USING SIMPLE INDICATIVE TESTS.** Road Materials and Pavement Design. 2020.

HANSEN, K.R.; COPELAND, A.; **ANNUAL ASPHALT PAVEMENT INDUSTRY SURVEY ON RECYCLED MATERIALS AND WARM-MIX ASPHALT USAGE: 2009–2012.** Federal Highway Administration, Final Report 2009–2012, USA. 2013.

HARRIGAN, E. T.; **SIMULATING THE EFFECTS OF HOT MIX ASPHALT AGING FOR PERFORMANCE TESTING AND PAVEMENT STRUCTURAL DESIGN**

(Research Results Digest 324). Washington, DC: Transportation Research Board. 2007.

HILÁRIO, R. Q.; **USO DE PAVIMENTO RECICLADO ADICIONADO COM CIMENTO PARA USO COMO REFORÇO DE BASE PARA RODOVIAS – ESTUDO DE CASO: BR-120.** Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Nucleo de Pesquisa em Geotecnia. Área de Concentração: Geotecnia de Pavimentos. 2016.

HOFKO, B., FALCHETTO, A. C., GRENFELL, J., HUBER, L., LU, X., POROT, L., YOU, Z.; **EFFECT OF SHORT-TERM AGEING TEMPERATURE ON BITUMEN PROPERTIES.** Road Materials and Pavement Design. Pag. 108-117. 2017

HUANG, B., SHU, X., ZUO, G.; **USING NOTCHED SEMI CIRCULAR BENDING FATIGUE TEST TO CHARACTERIZE FRACTURE RESISTANCE OF ASPHALT MIXTURES.** Engineering Fracture Mechanics. Pag. 78–88. 2013.

ISLAM, R. e TAREFDER, R. A.; **EFFECTS OF LARGE FREEZE-THAW CYCLES ON STIFFNESS AND TENSILE STRENGTH OF ASPHALT CONCRETE.** Journal of Cold Regions Engineering. 2016.

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, 53, 596–603. 2014.

JAHANBAKHSH, H., HOSSEINI, P., NEJAD, F. M., HABIBI, M.; **INTERMEDIATE TEMPERATURE FRACTURE RESISTANCE EVALUATION OF CEMENT EMULSIFIED ASPHALT MORTAR.** Constrution and building materials. 2019.

KARLSSON, R., & ISACSSON, U.; **MATERIAL-RELATED ASPECTS OF ASPHALT RECYCLING—STATE-OF-THEART.** Journal of Materials in Civil Engineering, 18(1), 81–92. 2006.

KASEER, F., YIN, F., ARÁMBULA-MERCADO, E., MARTIN, A. E., DANIEL, J. S., SALARI, S.; **DEVELOPMENT OF AN INDEX TO EVALUATE THE CRACKING POTENTIAL OF ASPHALT MIXTURES USING THE SEMI-CIRCULAR BENDING TEST,** Construction and Building Materials, Vol. 167. Pag 286-298. 2018.

KASEER, F., ARÁMBULA-MERCADO, E., MARTIN, A.E.; **A METHOD TO QUANTIFY RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT BINDER AVAILABILITY (EFFECTIVE RAP BINDER) IN RECYCLED ASPHALT MIXES.** Transportation Research Record. Pag. 205-216. 2019.

KIM, Y. R., **EVALUATION OF HEALING AND CONSTITUTIVE MODELING OF ASPHALT CONCRETE BY MEANS OF THE THEORY OF NONLINEAR VISCOELASTICITY AND DAMAGE MECHANICS.** Doctoral dissertation, Texas A&M University. 1988.

KIM, Y.-R., ARAGÃO, F. T. S.; **MICROSTRUCTURE MODELING OF RATE-DEPENDENT FRACTURE BEHAVIOR IN BITUMINOUS PAVING MIXTURES.** Finite Elements in Analysis and Design. 2013.

KOUDELKA, T., & VARAUS, M.; **ASPHALT MIXTURES WITH A HIGH AMOUNT OF RAP – CASE STUDY.** Materials science and engineering. Vol. 236. 2017.

LENG, Z., SREERAM, A., PADHAN, R. K., TAN, Z.; **VALUE-ADDED APPLICATION OF WASTE PET BASED ADDITIVES IN BITUMINOUS MIXTURES CONTAINING HIGH PERCENTAGE OF RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT (RAP).** Journal of Cleaner Production, 196, 615-625, 2018.

LIPHARDT, A., RADZISZEWSKI, P., KRÓL, J.; **BINDER BLENDING ESTIMATION METHOD IN HOT MIX ASPHALT WITH RECLAIMED ASPHALT.** Procedia Engineering. Pag. 502-509. 2015

LIMA, A. T.; **CARACTERIZAÇÃO MECANICA DE MISTURAS ASFALTICAS RECICLADAS A QUENTE.** Dissertação (mestrado). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE. 2003.

LU, D. X., SALEH, M.; **LABORATORY EVALUATION OF WARM MIX ASPHALT INCORPORATING HIGH RAP PROPORTION BY USING EVOTHERM AND SYLVAROAD ADDITIVES.** Construction and Building Materials. Vol. 114. Pag. 580-587. 2016.

LU, D. X., SALEH, M., NGUYEN, N. H. T.; **EFFECT OF REJUVENATOR AND MIXING METHODS ON BEHAVIOUR OF WARM MIX ASPHALT CONTAINING HIGH RAP CONTENT.** Construction and Building Materials. Vol. 197. Pag. 792-802. 2019.

LU, D. X., SALEH, M., NGUYEN, N. H. T.; **EVALUATION OF FRACTURE AND FATIGUE CRACKING CHARACTERIZATION ABILITY OF NONSTANDARDIZED SEMICIRCULAR-BENDING TEST FOR ASPHALT CONCRETE.** American Society of Civil Engineers. 2020.

LUZ, P. M.S. G.; **AVALIAÇÃO REOLÓGICA DO LIGANTE ASFÁLTICO 50/70 MODIFICADO COM LIGNINA DAS MADEIRAS PINUS E EUCALIPTO.** Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2019.

LUZZI, F. C.; **ADAPTAÇÃO DE USINA PARA RECICLAGEM A QUENTE E AVALIAÇÃO LABORATORIAL DAS MISTURAS ASFÁLTICAS PRODUZIDAS.** Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS. 2019.

MA, B., SI, W., ZHU, D.; **APPLYING METHOD OF MOMENTS TO MODEL THE RELIABILITY OF DETERIORATING PERFORMANCE TO ASPHALT PAVEMENT UNDER FREEZE-THAW CYCLES IN COLD REGIONS.** Journal of Materials in Civil Engineering. 2015.

MAMUN, A. A.; AL-ABDUL WAHHAB, H. I.; **EVALUATION OF WASTE ENGINE OIL-REJUVENATED ASPHALT CONCRETE MIXTURES WITH HIGH RAP CONTENT",** Advances in Materials Science and Engineering, vol. 2018, Article ID 7386256, 8 pages, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/7386256>.

MARI, A. C. C.; **LODO DE ESGOTO COMO SUBSTRATO PARA O CHRYSANTHEMUM JUNIER.** Tese (doutorado). Universidade Estadual Paulista, Botucatu, SP. 2018.

MEDINA, J. e MOTTA, L. M. G.; **MECANICA DOS PAVIMENTOS.** 3° Ed. Rio de Janeiro, Brasil. 2015.

MOGAWER, W., BENNERT, T., DANIEL, J.S., BONAQUIST, R., AUSTERMAN, A., & BOOSHEHRIAN, A.; **PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF PLANT PRODUCED HIGH RAP MIXTURES.** Road Materials and Pavement Design. Pag. 183–208. 2012

MOGHADDAM, T. B., BAAJ, H.; **THE USE OF REJUVENATING AGENTS IN PRODUCTION OF RECYCLED HOT MIX ASPHALT: A SYSTEMATIC REVIEW.** Construction and Building Materials. Vol. 114. Pag. 805–816. 2016.



MOLENAAR, A. A. A., LIU, X., ERKENS, S.; **SEMI-CIRCULAR BENDING TEST; SIMPLE BUT USEFUL?**. Asphalt Paving Technology: Association of Asphalt Paving Technologists-Proceedings of the Technical Sessions. 2015.

MUBARAKI, M.; OSMAN, S. A.; SALLAM, H. E. M.; **EFFECT OF RAP CONTENT ON FLEXURAL BEHAVIOR AND FRACTURE TOUGHNESS OF FLEXIBLE PAVEMENT**. Latin American Journal of Solids and Structures, 16(3), e177. <http://dx.doi.org/10.1590/1679-78255516>. 2019.

NABIZADEH, H., HAGHSHENAS, H. F., KIN, Y-R., ARAGÃO, F. T. S.; **EFFECTS OF REJUVENATORS ON HIGH-RAP MIXTURES BASED ON LABORATORY TESTS OF ASPHALT CONCRETE (AC) MIXTURES AND FINE AGGREGATE MATRIX (FAM) MIXTURES**. Construction and Building Material. Pag. 65 – 73. 2017.

NATIONAL ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION (NAPA). **HIGH RAP ASPHALT PAVEMENTS JAPAN PRACTICE — LESSONS LEARNED**. Lanham. 2018.

NSENGIYUMVA, G., KIM, Y., YOU, T.; **DEVELOPMENT OF A SEMICIRCULAR BEND (SCB) TEST METHOD FOR PERFORMANCE TESTING OF NEBRASKA ASPHALT MIXTURES**. Nebraska Transportation Center. Report SPR-P1 (15) MPMC07. 2015.

NOFERINI, L., SIMONE, A., SANGIORGI, C., MAZZOTTA, F.; **INVESTIGATION ON PERFORMANCES OF ASPHALT MIXTURES MADE WITH RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT: EFFECTS OF INTERACTION BETWEEN VIRGIN AND RAP BITUMEN**. International Journal of Pavement Research and Technology, Vol 10, Issue 4, Pag 322-332, ISSN 1996-6814, .2017

OLIVEIRA, A. G.; **ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO LODO TÊXTIL PARA FINS DE UTILIZAÇÃO EM PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS**. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2014.

OLIVEIRA, M. S.; **ANÁLISE DA FADIGA EM MISTURAS ASFÁLTICAS RECLICADAS À QUENTE. DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**, Publicação 349/20, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 136 p. 2020.

OMRANIAN, S. R., HAMZAH, M. O., GUNGAT, L., THE, S. Y.; **EVALUATION OF ASPHALT MIXTURE BEHAVIOR INCORPORATING WARM MIX ADDITIVES AND**

**RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT.** Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition). Vol. 5, Issue 3, Pag. 181-196. 2018.

O'SULLIVAN, K. A.; **REJUVENATION OF RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT (RAP) IN HOT MIX ASPHALT RECYCLING WITH HIGH RAP CONTENTE.** Dissertação (Mestrado). Worcester Polytechnic Institute. Worcester, MA. 2011.

OSHONE, M., DAVE, E., SIAS, J., VOELS, J., GHOSH, D., DAI, S.; **INCREASING PRECISION AND CONFIDENCE LEVEL IN FRACTURE ENERGY MEASUREMENT BY OPTIMIZING THE NUMBER OF TEST REPLICATES FOR DISK-SHAPED COMPACT TENSION FRACTURE TEST (ASTM D7313).** Journal of Testing and Evaluation 47. 2019.

ÖZGAN, E., SERIN, S., **INVESTIGATION OF CERTAIN ENGINEERING CHARACTERISTICS OF ASPHALT CONCRETE EXPOSED TO FREEZE-THAW CYCLES.** Cold Regions Science and Technology, 85, 2013.

PRATIK, N., UMESH, C. S.; **A RHEOLOGICAL STUDY ON AGED BINDER REJUVENATED WITH PONGAMIA OIL AND COMPOSITE CASTOR OIL.** International Journal of Pavement Engineer. Pag. 595-607. 2015.

PING, L., TENG-FEI, N., KE, M.; **FRACTURE THEORY AND CRACK PROPAGATION TEST OF ASPHALT MIXTURE PRE-NOTCHED BEAM BASED ON WEIGHT FUNCTION METHOD.** Journal of Highway and Transportation Research and Development. Volume 11. 2017.

ROSA JUNIOR, J. M.; **ESTUDO DAS PROPRIEDADES REOLÓGICAS DO CIMENTO ASFÁLTICO DE PETRÓLEO (CAP50/70) MODIFICADO COM POLÍMEROS FUCIONALIZADOS.** Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Camina Grande. Campina Grande, 2015.

RONDON, H. A., REYES, F. A., FLINTSCH, G.W., & MOGROVEJO, D. E.; **ENVIRONMENTAL EFFECTS ON HOT MIX ASPHALT DYNAMIC MECHANICAL PROPERTIES – A CASE STUDY IN BOGOTA, COLUMBIA.** Transportation Research Board 91st Annual Meeting Compendium of Papers, 12-3637. Washington, DC. 2012.

SABAHFAR, N., HOSSAIN, M.; **EFFECT OF ASPHALT REJUVENATING AGENT ON AGED RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT AND BINDER PROPERTIES.**

Kansas State University Transportation Center. Report N° KS-16-12. FINAL REPORT. 2016.

SAFAEI, F., LEE, J., NASCIMENTO, L. A., HINTZ, C., & KIM, R. Y.; **IMPLICATIONS OF WARM-MIX ASPHALT ON LONG-TERM OXIDATIVE AGEING AND FATIGUE PERFORMANCE OF ASPHALT BINDERS AND MIXTURES.** Road Materials and Pavement Design, 15, 45–61. 2014.

SAHA, G., BILIGIRI, K.P.; **FRACTURE PROPERTIES OF ASPHALT MIXTURES USING SEMI-CIRCULAR BENDING TEST: A STATE-OF-THE-ART REVIEW AND FUTURE RESEARCH.** Construction and Building Materials, 105, p. 103-112, 2016.

SCHAPERLY, R. A., **CORRESPONDENCE PRINCIPLES AND A GENERALIZED J INTEGRAL FOR LARGE DEFORMATION AND FRACTURE ANALYSIS OF VISCOELASTIC MEDIA,** International Journal of Fracture, Vol. 25, 1984. pp. 195-223.

SHEN, S.; LU, X. **ENERGY BASED LABORATORY FATIGUE FAILURE CRITERIA FOR ASPHALT MATERIALS.** Journal of Testing and Evaluation, Vol. 39, No. 3, p. 1-8, 2011.

SILVA, J. P. S.; **AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DE PRODUTOS REJUVENESCEDORES EM MISTURAS ASFÁLTICAS.** Tese (doutorado). **Publicação G.TD-067/2011,** Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasília, Brasília, DF. 2011.

SILVA, J. P. S.; FARIAS, M. M.; **ESTUDO DOS EFEITOS DE PRODUTOS REJUVENESCEDORES NO COMPORTAMENTO FÍSICO, QUÍMICO E REOLÓGICO DE LIGANTE ASFÁLTICO ENVELHECIDO.** Revista Transporte. DOI:10.14295/transportes.v28i3.1874. 2020.

SIVILEVIČIUS, H., BRAZIUNAS, J., PRENTKOVSKIS, O.; **TECHNOLOGIES AND PRINCIPLES OF HOT RECYCLING AND INVESTIGATION OF PREHEATED RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT BATCHING PROCESS IN AN ASPHALT MIXING PLANT.** Applied Sciences. 7. 10.3390/app7111104. 2017.

SPECHT, L. P.; PIRES, G. M.; VITORELO, T.; HIRSH, F.; CRONST, F.; BERGMANN, E. C.; TIEFENSEE, M. D.; **UTILIZAÇÃO DE MATERIAL FRESADO COMO CAMADA DE PAVIMENTO: ESTUDO LABORATORIAL E APLICAÇÃO EM CAMPO.** 42° RAPv; 16° Enacor. Gramado, RS. 2013.

SONG, W., HUANG, B., SHU, X.; **INFLUENCE OF WARM-MIX ASPHALT TECHNOLOGY AND REJUVENATOR ON PERFORMANCE OF ASPHALT MIXTURES CONTAINING 50% RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT.** Journal of Cleaner Production, Vol. 192, Pag 191-198, ISSN 0959-6526, 2018.

SUBHASH C. THAKUR, J. H., CHONG, K., PARSONS, R. L.; **COMPARISON OF PROPERTIES OF RAP AGGREGATES EXTRACTED BY IGNITION AND CENTRIFUGE METHODS.** Geo-Frontiers – Proceeding of Advances in Geotechnical Engineering, pag. 4525–4534. 2011.

SUDARSANAN, N., KARPURAPU, R., AMIRTHALINGAM, V.; **INVESTIGATIONS ON FRACTURE CHARACTERISTICS OF GEOSYNTHETIC REINFORCED ASPHALT CONCRETE BEAMS USING SINGLE EDGE NOTCH BEAM TESTS.** Geotextiles and Geomembranes. Volume 47, Issue 5, 2019, Pages 642-652.

STEWART, C. M., OPUTA, C. W., GARCIA, E.; **EFFECT OF SPECIMEN THICKNESS ON THE FRACTURE RESISTANCE OF HOT MIX ASPHALT IN THE DISK-SHAPED COMPACT TENSION (DCT) CONFIGURATION.** Construction and Building Materials. Vol. 160. Pag 487-496. 2018

TANG, N., SUN, C.J., HUANG, S.X., WU, S.P.; **DAMAGE AND CORROSION OF CONDUCTIVE ASPHALT CONCRETE SUBJECTED TO FREEZE–THAW CYCLES AND SALT.** Materials Research Innovations, 17, pp.240-245. 2013.

TARBOX, S., SIAS DANIEL, J.; **EFFECTS OF LONG TERM OVEN AGING ON RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT MIXTURES.** Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2294, 1–15. Transportation Research Board of the National Academies, Washington, DC. 2012.

TELTAYEV, B. B., ROSSI, C. O., IZMAILOVA, G. G., AMIRBAYEV, E. D.; **EFFECT OF FREEZE-THAW CYCLES ON MECHANICAL CHARACTERISTICS OF BITUMENS AND STONE MASTIC ASPHALTS.** Applied Sciences. 2019.

TRAN, N., TAYLOR, A., WILLIS, R.; **EFFECT OF REJUVENATOR ON PERFORMANCE PROPERTIES OF HMA MIXTURES WITH HIGH RAP AND RAS CONTENTES.** NCAT Report 12-05. Auburn, AL. National Center for Asphalt Technology.2012.

TURNER, P., TAYLOR, A., TRAN, P. N.; **LABORATORY EVALUATION OF SYLVAROAD TM RP 1000 REJUVENATOR**, NCAT Rep. 15–03. 2015.

UNGER FILHO, W.; **ESTUDO DE MISTURAS ASFALTICAS RECICLADAS A FRIO PRODUZIDA COM 100% DE REVESTIMENTO ASFALTICO FRESADO E AGENTE DE RECICLAGEM EMULSIFICADO**. Dissertação (mestrado). Escola Politecnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Eng. De Transportes. São Paulo, SP. 2019.

VEIGA, J.M.R.C, **MODELOS DE PREVISÃO DE DEFORMAÇÃO PERMANENTE DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS**. Dissertação (Mestrado). Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2013.

WANG, J.; QIN, Y., XU, J., ZENG, W., ZHANG, Y., WANG, W., WANG, P.; **CRACK RESISTANCE INVESTIGATION OF MIXTURES WITH RECLAIMED SBS MODIFIED ASPHALT PAVEMENT USING THE SCB AND DSCT TESTS**. Construction and Building Materials, 265. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120365>. 2020.

WEST, R.C., WILLIS, J.R., & MARASTEANU, M.O.; **IMPROVED MIX DESIGN, EVALUATION, AND MATERIALS MANAGEMENT PRACTICES FOR HOT MIX ASPHALT WITH HIGH-RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT CONTENT**. NCHRP Report 752. Washington, DC. 2013.

WEST, R., RODEZNO, C., JULIAN, G., & PROWELL, B.; **ENGINEERING PROPERTIES AND FIELD PERFORMANCE OF WARM MIX ASPHALT TECHNOLOGIES** (NCHRP 9-47A Draft Final Report). National Cooperative Highway Research Program. 2014.

XU, Y., XU, S., & JI, J.; **MEASUREMENT METHOD OF BLENDING STATUS BETWEEN VIRGIN AND AGED BINDER IN RECYCLED ASPHALT MIXTURES—A LITERATURE REVIEW**. Challenges and advances in sustainable transportation systems (pg. 311–318.). 2014.

YANG, S.-H., LEE, L.-C.; **CHARACTERIZING THE CHEMICAL AND RHEOLOGICAL PROPERTIES OF SEVERELY AGED RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT MATERIALS WITH HIGH RECYCLING RATE**. Construction and Building Materials, 111. Pag. 139–146. 2016.

YANG, J. J., LAKTE, P. T. A., KIM, S. H.; **USE OF CONDITIONAL INFERENCE TREES FOR EVALUATING THE EFFECT OF RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT CONTENT AND BINDER GRADE ON THE DYNAMIC MODULUS OF ASPHALT CONCRETE MIXTURES**, International Journal of Pavement Research and Technology. 2018.

YANG, C., XIE, J., WU, S., AMIRKHANIANB, S., WANG, Z., SONG, J., ZHOU, X., WANG, F., ZHANG, L.; **ENHANCEMENT MECHANISM OF INDUCTION HEATING ON BLENDING EFFICIENCY OF RAP - VIRGIN ASPHALT IN STEEL SLAG RECYCLED ASPHALT MIXTURES**. Construction and Building Materials. Outubro 2020.

YIN, F., ARAMBULA-MERCADO, E., MARTIN, A. E., NEWCOMB, D., TRAN, N.; **LONG-TERM AGEING OF ASPHALT MIXTURES**. Road Materials and Pavement Design, 18:sup1, 2-27, DOI: 10.1080/14680629.2016.1266739. ISSN: 1468-0629, 2017.

YOUSEFI, A., BEHNOOD, A., NOWRUZI, A., HAGHSHENAS, H.; **PERFORMANCE EVALUATION OF ASPHALT MIXTURES CONTAINING WARM MIX ASPHALT (WMA) ADDITIVES AND RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT (RAP)**. Construction and Building Materials, Vol. 268, ISSN 0950-0618, 2021.

YU, B.; WANG, Y.; ZHANG, M.; **RESEARCH OF MECHANICAL PROPERTIES OF ASPHALT PAVEMENT MATERIALS WITH WMA AND RAP**. Applied Mechanics and Materials. Vol. 204-208. Pag: 3934-3937. Trans Tech Publications, Ltd. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.204-208.3934>.

ZANETTE, C. C., MORENO, K. R., DEL CARPIO, J. A. V.; **USO DO AGENTE REJUVENESCEDOR AR-5 NA PRODUÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS 100% RECICLADAS - RESISTÊNCIA À TRAÇÃO**. Anais do Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental e Sustentabilidade - Vol. 4. ISSN 2318-7603. 2016.

ZAUMANIS, M., MALLICK, R.B., & FRANK, R.; **USE OF REJUVENATORS FOR PRODUCTION OF SUSTAINABLE HIGH CONTENT RAP HOT MIX ASPHALT**. XXVIII International Baltic Road Conference, Vilnius, Lithuania. 2013.

ZAUMANIS, M., MALLICK, R., FRANK, R.; **EVALUATION OF REJUVENATOR'S EFFECTIVENESS WITH CONVENTIONAL MIX TESTING FOR 100% RECLAIMED**

**ASPHALT PAVEMENT MIXTURES.** Transportation Research Record. Pag. 17-25. 2013

ZAUMANIS, M., MALLICK, R.B., FRANK, R.; **100% RECYCLED HOT MIX ASPHALT: A REVIEW AND ANALYSIS.** Resources, Conservation and Recycling, 92, 230–245. 2014.

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, 71, 538–550. 2014.

ZAUMANIS, M., MALLICK, R. B., FRANK, R. **EVALUATION OF DIFFERENT RECYCLING AGENTS FOR RESTORING AGED ASPHALT BINDER AND PERFORMANCE OF 100% RECYCLED ASPHALT.** Materials and Structures. Pag. 2475-2488. 2015.

ZAUMANIS, 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 Engineer. Pag. 1-9. 2018.

ZHANG, K., HUCHET, F., HOBBS, A.; **A REVIEW OF THERMAL PROCESSES IN THE PRODUCTION AND THEIR INFLUENCES ON PERFORMANCE OF ASPHALT MIXTURES WITH RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT (RAP).** Construction and Building Materials. Vol. 206. Pag. 609–619. 2019

ZHOU, B., PEI, J., ZHANG, J., GUO, F., WEN, Y., LUO, P.; **COMPARISON OF FRACTURE TEST METHODS FOR EVALUATING THE CRACK RESISTANCE OF ASPHALT MIXTURE.** Arabian Journal for Science and Engineering. Vol. 45, pages 8745–8758. 2020.