



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

**ANÁLISE DO GRAU DE MISTURA (DoB) DE MISTURAS ASFÁLTICAS  
RECICLADAS COM VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DE USINAGEM, TIPO E  
TEOR DE RAP**

PRISCILA MARIA SOUSA GONÇALVES LUZ

Campina Grande-PB,

2023

PRISCILA MARIA SOUSA GONÇALVES LUZ

**ANÁLISE DO GRAU DE MISTURA (DoB) DE MISTURAS ASFÁLTICAS  
RECICLADAS COM VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DE USINAGEM, TIPO E  
TEOR DE RAP**

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 Doutora em Engenharia Civil e Ambiental.

Área de Concentração: Geotecnia.

Linha de Pesquisa: Mecânica e Gerência de Pavimentos.

Orientadora: Dra. Lêda Christiane de Figueiredo Lopes Lucena

Coorientadora: Dra. Raquel Menezes Bezerra Sampaio

Campina Grande – PB,

2023

L979a

Luz, Priscila Maria Sousa Gonçalves.

Análise do grau de mistura (DoB) de misturas asfálticas recicladas com variação da temperatura de usinagem, tipo e teor de rap / Priscila Maria Sousa Gonçalves Luz. - Campina Grande, 2023.

178 f. : il. color.

Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2023.

"Orientação: Profa. Dra. Lêda Christiane de Figueiredo Lopes Lucena, Profa. Dra. Raquel Menezes Bezerra Sampaio."

Referências.

1. Geotécnia. 2. Modulo Dinâmico. 3. Material Fresado. 4. Material Fresado. 5. Grau de Fresado. 6. FTIR. I. Lucena, Lêda Christiane de Figueiredo. II. Sampaio, Raquel Menezes Bezerra. III. Título.

CDU 624.131(043)

PRISCILA MARIA SOUSA GONÇALVES LUZ

**ANÁLISE DO GRAU DE MISTURA (DoB) DE MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS  
COM VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DE USINAGEM, TIPO E TEOR DE RAP**

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 29/06/2023

**BANCA EXAMIDORA**



Documento assinado digitalmente  
LEDA CHRISTIANE DE FIGUEIREDO LOPES  
Data: 25/07/2023 15:04:15-0300  
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

---

Prof. Dra. Lêda Christiane de Figueiredo Lopes Lucena (UFCG)  
Orientadora

---

Prof. Dra. Raquel Menezes Bezerra Sampaio (UFRN)  
Coorientadora



Documento assinado digitalmente  
ADRIANO ELISIO DE FIGUEIREDO LOPES LI  
Data: 25/07/2023 07:48:13-0300  
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

---

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



Documento assinado digitalmente  
ANA MARIA GONÇALVES DUARTE MENDON  
Data: 25/07/2023 15:46:32-0300  
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

---

Prof. Dra. Ana Maria Gonçalves Duarte Mendonça (PNPD UFCG)  
Membro interno

---

Prof. PhD. Kamilla Vasconcelos Savasini (USP)  
Examinadora Externa

---

Prof. Dr. Ricardo Almeida de Melo (UFPB)  
Examinador Externo



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

### REGISTRO DE PRESENÇA E ASSINATURAS

1. **ATA DA DEFESA PARA CONCESSÃO DO GRAU DE DOUTOR EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

2. **ALUNO(A): PRISCILA MARIA SOUZA GONÇALVES LUZ / COMISSÃO EXAMINADORA: DR.ª LÊDA CHRISTIANE DE FIGUEIREDO LOPES LUCENA - PPGECA/UFMG (PRESIDENTE) - ORIENTADORA, DR.ª RAQUEL MENEZES BEZERRA SAMPAIO - UFRN - COORIENTADORA, DR. ADRIANO ELÍSIO DE FIGUEIREDO LOPES LUCENA – PPGECA/UFMG – EXAMINADOR INTERNO, DR.ª KAMILA VASCONCELOS SAVASINI - USP - EXAMINADORA EXTERNA, DR.ª ANA MARIA GONÇALVES DUARTE MENDONÇA - EXAMINADORA INTERNA, DR. RICARDO ALMEIDA DE MELO - UFPB - EXAMINADOR EXTERNO (PORTARIA 16/2023). / TÍTULO DA TESE: “ANÁLISE DO GRAU DE MISTURA (DOB) DE MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS COM VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DE USINAGEM, TIPO E TEOR DE RAP” / ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: GEOTECNIA / HORA DE INÍCIO: 08:30HORAS / NA SALA 02 DO BLOCO CT, LABORATÓRIO DE PAVIMENTOS, CAMPUS SEDE DA UFMG, EM CAMPINA GRANDE, EM FORMATO HÍBRIDO.**

3. **EM SESSÃO REALIZADA EM FORMATO HÍBRIDO, APÓS EXPOSIÇÃO DE CERCA DE 40 MINUTOS, O(A) ALUNO(A) FOI ARGUIDO(A) ORALMENTE PELOS MEMBROS DA COMISSÃO EXAMINADORA, TENDO DEMONSTRADO SUFICIÊNCIA DE CONHECIMENTO E CAPACIDADE DE SISTEMATIZAÇÃO NO TEMA DE SUA TESE, SENDO-LHE ATRIBUÍDO O CONCEITO “EM EXIGÊNCIA”, SENDO QUE A POSSIBILIDADE DE APROVAÇÃO ESTÁ CONDICIONADA À AVALIAÇÃO DA NOVA VERSÃO DO TRABALHO FINAL, SEGUINDO PROCEDIMENTOS PREVISTOS NA RESOLUÇÃO DO PROGRAMA. O PRESIDENTE DA COMISSÃO EXAMINADORA, OUVIDOS OS DEMAIS MEMBROS, DEVERÁ FICAR RESPONSÁVEL POR ATESTAR QUE AS CORREÇÕES SOLICITADAS NA LISTA DE EXIGÊNCIAS FORAM ATENDIDAS NA VERSÃO FINAL DO TRABALHO. A COMISSÃO EXAMINADORA CUMPRINDO OS PRAZOS REGIMENTAIS, ESTABELECE UM PRAZO MÁXIMO DE 30 DIAS PARA QUE SEJAM FEITAS AS ALTERAÇÕES EXIGIDAS. APÓS O DEPÓSITO FINAL DO DOCUMENTO DE TESE, DEVIDAMENTE REVISADO E MEDIANTE ATESTADO DO ORIENTADOR, O CONCEITO "EM EXIGÊNCIA" PASSARÁ IMEDIATAMENTE PARA O DE “APROVADO”. NA FORMA REGULAMENTAR, FOI LAVRADA A PRESENTE ATA, QUE É ASSINADA POR MIM, FLÁVIO PEREIRA DA CUNHA, SECRETÁRIO, ALUNO E OS MEMBROS DA COMISSÃO EXAMINADORA PRESENTES.**

4. **CAMPINA GRANDE, 29 DE JUNHO DE 2023**

5.

6.

7.

8.

9. **RAQUEL MENEZES BEZERRA SAMPAIO - UFRN - COORIENTADORA**

10.

11.

12.

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** KAMILLA VASCONCELOS SAVASINI  
Data: 04/07/2023 15:00:11-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

13.

14.

**DR.ª KAMILLA VASCONCELOS SAVASINI - USP - EXAMINADORA EXTERNA**

Documento assinado eletronicamente por **LEDA CHRISTIANE DE FIGUEIREDO LOPES LUCENA, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 30/06/2023, às 07:59, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **ADRIANO ELISIO DE FIGUEIREDO LOPES LUCENA, CHEFE (A)**, em 30/06/2023, às 09:08, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ricardo Almeida de Melo, Usuário Externo**, em 30/06/2023, às 09:11, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Priscila Maria Sousa Gonçalves Luz, Usuário Externo**, em 01/07/2023, às 09:35, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **FLAVIO PEREIRA DA CUNHA, SECRETÁRIO (A)**, em 03/07/2023, às 11:04, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **ANA MARIA GONÇALVES DUARTE MENDONÇA, Usuário Externo**, em 03/07/2023, às 17:24, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufcg.edu.br/autenticidade>, informando o código verificador **3470703** e o código CRC **68AB6757**.

## DEDICATÓRIA

*À Deus que me guiou até aqui e à minha família, Ceicinha, Divino, Francisco e Wesley, que estiveram ao meu lado em todos os momentos dessa jornada*

## AGRADECIMENTOS

Quero agradecer primeiramente a Deus por ter me dado forças e saúde para chegar até aqui, por todas as graças que ele me concedeu ao longo desses 11 anos de estudo; sempre me dando forças para enfrentar os momentos difíceis e lutar pelos meus objetivos.

Aos meus pais, Divino e Ceicinha, que são minha fonte de inspiração e que sempre prezaram e se esforçaram para me proporcionar todos os estudos e uma boa educação. Ao meu irmão, Francisco, que sempre será meu pequeno e sempre me apoiou. Ao meu amigo, namorado, noivo e esposo, Wesley, por todo o incentivo ao longo desses anos, foram muitos momentos difíceis, mas mesmo com a distância sempre se manteve presente e paciente em toda essa jornada. Vocês foram minha motivação para continuar nas várias vezes que pensei em desistir.

Agradeço também à minha orientadora, Lêda, por ter me aceitado em um dos momentos mais desafiadores dessa jornada, por todo seu apreço, incentivo e confiança em mim. Quando entrei no LEP fui em busca de ser sua orientanda de PIBIC e fico extremamente feliz em terminar essa jornada sob sua orientação.

À professora Ana Maria, que durante todos esses anos me auxiliou no laboratório, pesquisa e mundo acadêmico, mas muito mais que isso, esteve presente em todos os momentos dessa jornada, me confortou durante os problemas pessoais e crises, me abrigou e cuidou de mim como uma filha.

Gostaria também de agradecer a minha co-orientadora, professora Raquel, por ter aceitado o convite e o desafio de me orientar em uma área diferente da sua, seus ensinamentos foram fundamentais para eu conseguir finalizar essa tese.

Também gostaria de agradecer à Capes pelo financiamento desse doutorado que foi fundamental para eu completar essa pesquisa.

Aos meus presentes de Campina Grande Daniel, Thamires, Sonaly, Conrado, Manoel, Léo, Paulo, Osires, Thiago, Luísa, Vanessa e Paulo Roberto. Principalmente a Daniel que não apenas no doutorado, mas ao longo dos 8 anos de laboratório sempre me auxiliou, esteve presente em todos os momentos. Agradeço também as minhas amigas Thamires e Sonaly que nunca largaram minha mão e que se estiveram presente em todos os momentos.

A todos os professores do laboratório, vocês são exemplos de profissionais e irei lembrar sempre dos ensinamentos. Aos colaboradores do LEP, Jadilson, Ildinho, Dona Ladjane e Arthur, vocês são fundamentais para esse laboratório.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Curva de degradação do pavimento .....	28
<b>Figura 2</b> - Evolução do estado de um pavimento .....	29
<b>Figura 3</b> - Textura após a fresagem .....	30
<b>Figura 4</b> - Equipamentos combinados para realização de HIR. ....	31
<b>Figura 5</b> - Possíveis composições do material particulado de RAP .....	41
<b>Figura 6</b> - Situações possíveis para interação entre ligantes no processo de reciclagem.....	45
<b>Figura 7</b> - Exemplo dos ligantes que compõem o RAP .....	48
<b>Figura 8</b> - Cromatograma do ligante recuperado dos agregados graúdos X o ligante do RAP dos agregados finos .....	59
<b>Figura 9</b> - Gráfico de mistura indicando a temperatura crítica com base na alta temperatura do PG.....	62
<b>Figura 10</b> - Conceitos de combinação total-parcial-nula, incluindo o DoB, DoA e DoAv ....	63
<b>Figura 11</b> - Fluxograma geral da metodologia da pesquisa .....	69
<b>Figura 12</b> - Fluxograma de caracterização dos materiais virgens: agregados e ligante asfáltico .....	70
<b>Figura 13</b> - Distribuição granulométrica dos agregados .....	73
<b>Figura 14</b> - Pilha da qual foi coletada as amostras do RAP 02 .....	74
<b>Figura 15</b> - Fluxograma de caracterização do RAP .....	75
<b>Figura 16</b> - Distribuição granulométrica dos RAPs .....	77
<b>Figura 17</b> - Evaporador rotativo para recuperação de ligante asfáltico .....	78
<b>Figura 18</b> - Estufa a vácuo usada na recuperação do ligante envelhecido .....	78
<b>Figura 19</b> - Distribuição granulométrica dos agregados recuperados .....	80
<b>Figura 20</b> – Resistência à Tração para os RAPs .....	83
<b>Figura 21</b> - DoA para os RAPs .....	84
<b>Figura 22</b> - Composição granulométrica RAP 01 .....	88
<b>Figura 23</b> - Composição granulométrica RAP 02 .....	88
<b>Figura 24</b> - Composição granulométrica RAP 03 .....	89
<b>Figura 25</b> - Composição granulométrica RAP 04 .....	89
<b>Figura 26</b> - Composição granulométricas das misturas 0% RAP .....	92
<b>Figura 27</b> - Módulo Dinâmico para os teores de RAP 01: 0% (a), 25% (b), 50% (c), 75% (d) e 100% (e) .....	104

<b>Figura 28</b> - Módulo Dinâmico para as temperaturas de usinagem: 140°C (a), 150°C (b), 160°C (c), 170°C (d) e 180°C (e).....	107
<b>Figura 29</b> – Ângulo de fase para os teores de RAP: 0% (a), 25% (b), 50% (c), 75% (d) e 100% (e) .....	110
<b>Figura 30</b> - Módulo Dinâmico para os teores de RAP 02: 0% (a), 25% (b), 50% (c), 75% (d) e 100% (e).....	111
<b>Figura 31</b> - Módulo Dinâmico para as temperaturas de usinagem: 140°C (a), 150°C (b), 160°C (c), 170°C (d) e 180°C (e).....	114
<b>Figura 32</b> - Ângulo de fase para os teores de RAP 02: 0% (a), 25% (b), 50% (c), 75% (d) e 100% (e).....	116
<b>Figura 33</b> - Módulo Dinâmico para os teores de RAP 03: 0% (a), 25% (b), 50% (c), 75% (d) e 100% (e).....	118
<b>Figura 34</b> - Módulo Dinâmico para as temperaturas de usinagem: 140°C (a), 150°C (b), 160°C (c), 170°C (d) e 180°C (e).....	121
<b>Figura 35</b> - Ângulo de fase para os teores de RAP 03: 0% (a), 25% (b), 50% (c), 75% (d) e 100% (e).....	123
<b>Figura 36</b> - Módulo Dinâmico para os teores de RAP 04: 0% (a), 25% (b), 50% (c), 75% (d) e 100% (e).....	125
<b>Figura 37</b> - Módulo Dinâmico para as temperaturas de usinagem: 140°C (a), 150°C (b), 160°C (c), 170°C (d) e 180°C (e).....	128
<b>Figura 38</b> - Ângulo de fase para os teores de RAP 03: 0% (a), 25% (b), 50% (c), 75% (d) e 100% (e).....	130
<b>Figura 39</b> - FTIR para os teores de RAP 01: 0% (a), 25% (b), 50% (c), 75% (d) e 100% (e) .....	146
<b>Figura 40</b> - FTIR para os teores de RAP 02: 0% (a), 25% (b), 50% (c), 75% (d) e 100% (e) .....	147
<b>Figura 41</b> - FTIR para os teores de RAP 03: 0% (a), 25% (b), 50% (c), 75% (d) e 100% (e) .....	148
<b>Figura 42</b> - FTIR para os teores de RAP 04: 0% (a), 25% (b), 50% (c), 75% (d) e 100% (e) .....	149

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Caracterização física e reológica do ligante asfáltico usado na pesquisa .....	71
<b>Tabela 2</b> - Caracterização dos agregados graúdos utilizados na pesquisa .....	72
<b>Tabela 3</b> - Caracterização dos agregados miúdos utilizados na pesquisa .....	72
<b>Tabela 4</b> - Análise granulométrica dos agregados.....	73
<b>Tabela 5</b> - Dados dos RAPs usados na pesquisa .....	74
<b>Tabela 6</b> - Caracterização dos RAPs .....	76
<b>Tabela 7</b> - Análise granulométricas dos RAPs antes da extração .....	76
<b>Tabela 8</b> - Teor de ligante dos RAPs.....	77
<b>Tabela 9</b> - Caracterização física e reológica dos ligantes asfálticos recuperados .....	79
<b>Tabela 10</b> - Caracterização dos agregados recuperados .....	79
<b>Tabela 11</b> - Análise granulométrica dos agregados recuperados .....	80
<b>Tabela 12</b> - Volume de vazios das amostras usadas para cálculo do DoA .....	82
<b>Tabela 13</b> - Percentuais finais para as misturas do RAP 01 .....	85
<b>Tabela 14</b> - Percentuais finais para as misturas do RAP 02.....	85
<b>Tabela 15</b> - Percentuais finais para as misturas do RAP 03.....	85
<b>Tabela 16</b> - Percentuais finais para as misturas do RAP 04.....	85
<b>Tabela 17</b> - Composições granulométricas do RAP 01.....	86
<b>Tabela 18</b> - Composições granulométricas do RAP 02.....	86
<b>Tabela 19</b> - Composições granulométricas do RAP 03.....	87
<b>Tabela 20</b> - Composições granulométricas do RAP 04.....	87
<b>Tabela 21</b> - Características volumétricas do RAP 01.....	90
<b>Tabela 22</b> - Características volumétricas do RAP 02.....	91
<b>Tabela 23</b> - Características volumétricas do RAP 03.....	91
<b>Tabela 24</b> - Características volumétricas do RAP 04.....	91
<b>Tabela 25</b> - Proporções dos agregados nas granulometrias (%)......	92
<b>Tabela 26</b> - Resumos dos parâmetros das composições granulométricas .....	93
<b>Tabela 27</b> – Nomenclatura das regressões para o RAP 01.....	95
<b>Tabela 28</b> – Nomenclatura das regressões para o RAP 02.....	95
<b>Tabela 29</b> – Nomenclatura das regressões para o RAP 03.....	96
<b>Tabela 30</b> - Nomenclatura das regressões para o RAP 04 .....	96
<b>Tabela 31</b> – Nomenclatura dos modelos de DoB .....	101
<b>Tabela 32</b> - Equações de regressão e $R^2$ para as curvas mestras do Módulo Dinâmico.....	106

<b>Tabela 33</b> - Equações de regressão para as curvas mestras de Módulo Dinâmico para o RAP 02.....	113
<b>Tabela 34</b> - Equações de regressão para as curvas mestras de Módulo Dinâmico para o RAP 03.....	119
<b>Tabela 35</b> - Equações de regressão para as curvas mestras de Módulo Dinâmico para o RAP 0.....	126
<b>Tabela 36</b> – Análise do MD (sem interação) – RAP 01 .....	131
<b>Tabela 37</b> - Análise do MD (com interação) – RAP 01 .....	132
<b>Tabela 38</b> - Análise do AF (sem interação) – RAP 01 .....	133
<b>Tabela 39</b> - Análise do AF (com interação) – RAP 01 .....	133
<b>Tabela 40</b> – Resumo dos modelos estatísticos para o RAP 01 .....	134
<b>Tabela 41</b> – Análise do MD (sem interação) – RAP 02.....	135
<b>Tabela 42</b> - Análise do MD (com interação) – RAP 02 .....	135
<b>Tabela 43</b> - Análise do AF (sem interação) – RAP 02.....	136
<b>Tabela 44</b> - Análise do AF (com interação) – RAP 02 .....	137
<b>Tabela 45</b> - Resumo dos modelos estatísticos para o RAP 02 .....	137
<b>Tabela 46</b> – Análise do MD (sem interação) – RAP 03.....	138
<b>Tabela 47</b> - Análise do MD (com interação) – RAP 03 .....	139
<b>Tabela 48</b> - Análise do AF (sem interação) – RAP 03.....	139
<b>Tabela 49</b> - Análise do AF (com interação) – RAP 03 .....	140
<b>Tabela 50</b> - Resumo dos modelos estatísticos para o RAP 03 .....	141
<b>Tabela 51</b> – Análise do MD (sem interação) – RAP 04.....	141
<b>Tabela 52</b> - Análise do MD (com interação) – RAP 04 .....	142
<b>Tabela 53</b> - Análise do AF (sem interação) – RAP 04.....	143
<b>Tabela 54</b> - Análise do AF (com interação) – RAP 04 .....	144
<b>Tabela 55</b> - Resumo dos modelos estatísticos para o RAP 04 .....	144
<b>Tabela 56</b> - Grupo de compostos orgânicos identificados no FTIR.....	150
<b>Tabela 57</b> - DoB para o RAP 01 segundo a metodologia de Hettiarachchi et al. (2020).....	153
<b>Tabela 58</b> - DoB para o RAP 02 segundo a metodologia de Hettiarachchi et al. (2020).....	153
<b>Tabela 59</b> - DoB para o RAP 03 segundo a metodologia de Hettiarachchi et al. (2020).....	154
<b>Tabela 60</b> - DoB para o RAP 04 segundo a metodologia de Hettiarachchi et al. (2020).....	154
<b>Tabela 61</b> - Modelo 01 DoB.....	156
<b>Tabela 62</b> - Modelo 02 DoB.....	157
<b>Tabela 63</b> - Modelo 03 DoB.....	157

<b>Tabela 64</b> - Modelo 04 DoB .....	158
<b>Tabela 65</b> - Modelo 05 DoB.....	158
<b>Tabela 66</b> – Resumo dos Modelos DoB .....	159
<b>Tabela 67</b> - Análise do R <sup>2</sup> predito .....	160
<b>Tabela 68</b> - Validação do modelo com o RAP 04 .....	161

## **LISTA DE QUADROS**

<b>Quadro 1</b> - Métodos de reabilitação de pavimentos asfálticos .....	21
<b>Quadro 2</b> – Vantagens e desvantagens das técnicas de reciclagem de pavimentos flexíveis.	23
<b>Quadro 3</b> - Limites e requisitos da adição de RAP em alguns países da Europa .....	32

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing Materials
AR	Agente de Reciclagem
ARRA	Asphalt Recycling and Reclaiming Associations
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CBUq	Concreto Betuminoso Usinado à Quente
CG	Cromatografia Gasosa
CIR	Cold in-place recycling
CO	Índice de Carbonila
CP	Corpo de Prova
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DoA	Degree of Binder Activity
DoAv	Degree of Availability
DoB	Degree of Blending
DSR	Reômetro de Cisalhamento Dinâmico
EDS	Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy
FDR	Full depth reclamation
FHWA	Federal Highway Administration
FTIR	Fourier Transformed Infra Red
Gmm	Densidade máxima medida
GPC	Cromatografia de Permeação em Gel
HIR	Hot in-place recycling
FID	Ionização por Chama
LTA <sub>b</sub>	Ligante ativado de longo prazo
LMS	Tamanhos Moleculares Grandes
MMS	Tamanhos Médios Moleculares
MSCR	Multiple Strees Creep Recovey
NAPA	National Asphalt Pavement Association
NBR	Norma Brasileira Redigida
NCHRP	National Cooperative Highway Research Program
PG	Performance Grade

RAP	Reclaimed Asphalt Pavement
RBR	RAP Binder Ratio
RT	Resistência à Tração
RTFO	Rolling Thin-Film Oven
SMS	Tamanhos Moleculares Pequenos
SO	Índice de Sulfóxido
STAb	Ligante ativado de curto prazo
SUPERPAVE	Superior Performing Asphalt Pavements
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande

## RESUMO

Nos dias atuais é crescente na pavimentação os estudos sobre a reutilização de material fresado, proveniente da reciclagem dos revestimentos asfálticos, como procedimento para diminuir os custos com a produção e os danos causados ao meio ambiente. Para a reutilização desse material é fundamental entender sobre os mecanismos de interação entre o ligante envelhecido do RAP e o ligante novo. Para isso, existe alguns parâmetros como o Degree of Binder Activity (DoA) e o Degree of Blending (DoB). O primeiro representa quanto do ligante envelhecido ficará disponível para a nova mistura sendo uma propriedade intrínseca de cada RAP. O DoB indica o grau de mistura entre os ligantes envelhecido e novo e depende de fatores externos, como os parâmetros de usinagem, sendo por isso um desafio conseguir quantificá-lo. Esse trabalho buscou estabelecer um modelo preditivo para quantificar o DoB com base no ensaio de Módulo Dinâmico e no ensaio de FTIR. Para atingir os objetivos foram feitos esses ensaios em misturas com quatro RAPs diferentes, usando cinco teores de RAP e cinco temperaturas de usinagem. Além disso, em cada RAP foi quantificado o DoA e feito uma análise estatística para verificar se as variáveis independentes foram significativas para o resultado do módulo dinâmico. Após essa etapa foram realizadas quatro modelagens e escolhida aquela que além de possuir as variáveis independentes significativas apresentou o maior valor do  $R^2$  predito. O modelo escolhido foi validado e apresentou pequenas variações para o DoB encontrado por meio da equação gerada. Logo, conclui-se que a modelagem do DoB, realizada nesse estudo, mostrou que as temperaturas de usinagem e teor de RAP influenciam em fatores como o DoA, módulo dinâmico, FTIR e, conseqüentemente, no DoB, mostrando que com maiores quantidades de ligante envelhecido disponível é possível alcançar maiores valores de DoB. Além disso, foi mostrada a praticidade do modelo que conseguiu de maneira satisfatório prever o DoB com o uso de um único ensaio mecânico e um químico.

**Palavras-chave:** Grau de Mistura, Material fresado, Módulo Dinâmico, FTIR.

## ABSTRACT

Over the years, paving has been studying the milled material, from the recycling of asphalt coatings, as a procedure to reduce production costs and the damage caused to the environment. The reuse of this material can happen in several ways and it is essential to understand the mechanisms of interaction between the aged RAP binder and the new binder. For this, there are some parameters such as the Degree of Binder Activity (DoA) and the Degree of Blending (DoB). The first represents how much of the aged binder will be available for the new mixture, being an intrinsic property of each RAP. The DoB indicates the degree of mixing between the old and new binders and depends on external factors, such as the machining parameters, so it is a challenge to be able to quantify it. Therefore, this work sought a predictive model to quantify the DoB based on the Dynamic Module test and FTIR. To achieve this model, these tests were performed in mixtures with four different RAPs, using five RAP contents and five machining temperatures. In addition, in each RAP, the DoA was quantified and a statistical analysis was performed to verify if the independent variables were significant for the result of the dynamic module. The SEM will still be performed to analyze the morphological characteristics of the mixtures. So far, most of the input variables were significant ( $p < 0.05$ ) and the results showed higher modulus results for temperatures where the DoA was 100%, indicating a trend towards a higher degree of mixing, which will be defined more precisely after the FTIR is performed.

**Keywords:** Degree of Blending, Milled Material, Dynamic Module, FTIR.

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	21
1.1	Justificativa .....	22
1.2	Objetivos .....	24
1.2.1	Objetivo Geral .....	24
1.2.2	Objetivos Específicos .....	24
1.2.3	Hipótese.....	25
1.2.4	Organização da tese.....	25
2	REVISÃO BIBLIOGRAFICA .....	27
2.1	Desempenho de pavimentos.....	27
2.2	Reciclagem de misturas asfálticas.....	29
2.3	Reclaimed Asphalt Pavement (RAP).....	36
2.4	Dosagem de misturas asfálticas recicladas a quente.....	40
2.5	Fenômeno de interação entre o ligante do RAP e o ligante novo .....	45
2.5.1	DoA .....	50
2.5.2	DoAv .....	52
2.6	Grau de mistura (DoB).....	53
2.6.1	Fatores que influenciam o grau de mistura (DoB) .....	55
2.6.2	Estudos de modelos de previsão do DoB .....	56
2.6.3	DoB em procedimentos de projeto de mistura .....	61
2.7	Técnicas para elaboração do modelo preditivo.....	63
2.7.1	Análise em Componentes Principais (ACP) .....	64
2.7.2	Geoestatística.....	65
2.7.3	Regressão linear múltipla .....	65
2.8	Considerações finais .....	67
3	MATERIAS E MÉTODOS .....	69
3.1	Materiais .....	70
3.1.1	Agregados e Ligante asfáltico .....	70
3.1.2	RAP .....	74
3.2	Metodologia .....	81
3.2.1	Cálculo DoA.....	81
3.2.2	Dosagem das misturas asfálticas .....	84
3.3	Modelo de previsão .....	93

3.3.1	Módulo Dinâmico.....	93
3.3.2	Regressão Linear Múltipla e Análise Estatística.....	94
3.3.3	Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR).....	98
3.3.4	Modelagem do DoB .....	100
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	103
4.1	Módulo Dinâmico ....	103
4.1.1	RAP 01 .....	103
4.1.2	RAP 02 .....	110
4.1.3	RAP 03 .....	117
4.1.4	RAP 04 .....	124
4.2	Regressão linear múltipla.....	131
4.2.1	RAP 01 .....	131
4.2.2	RAP 02 .....	134
4.2.3	RAP 03 .....	138
4.2.4	RAP 04 .....	141
4.3	FTIR .....	145
4.4	Modelo de previsão do DoB .....	152
4.5	Considerações finais .....	162
5	CONCLUSÕES.....	164
5.1	Sugestões para trabalhos futuros.....	166
	REFERÊNCIAS .....	167

## 1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a engenharia da pavimentação tem estudado procedimentos e materiais alternativos capazes de diminuir, de maneira simultânea, os custos de produção e os danos provocados ao meio ambiente associados à construção e manutenção de pavimentos asfálticos (JIANG *et al.*, 2018). Uma dessas práticas é a reciclagem de materiais asfálticos. Nos Estados Unidos, o material asfáltico fresado, oriundo de pavimentos deteriorados, também chamado de RAP (do inglês, *Reclaimed Asphalt Pavement*). Este é o material que possui a maior taxa de reciclagem do país em relação à construção civil, onde mais de 99% do que é produzido é reutilizado em novos pavimentos ao invés de serem depositados em aterros. De acordo com dados da *National Asphalt Pavement Association* (NAPA) isso gerou uma economia em torno de 3,85 milhões de toneladas de ligante asfáltico novo e 72 milhões de toneladas de agregados virgens no país durante o ano de 2017, gerando uma economia de mais de US\$ 2 bilhões (WILLIAMS *et al.*, 2018).

A reutilização desse material pode acontecer de diferentes maneiras, onde a mais comum é no uso em bases e sub-bases de material granular ou estabilizado, porém quando este é adicionado na camada de rolamento possui o potencial para substituir os materiais de maior custo (COPELAND, 2011; ZAUMANIS *et al.*, 2014; ZHANG *et al.*, 2020; ROCHISHNU *et al.*, 2021). Entretanto, para que isso ocorra nos processos de reciclagem, à quente e morna, é necessário que o ligante asfáltico envelhecido presente no RAP seja remobilizado, ou ativado, de maneira que ocorra a interação com os novos materiais durante o processo de reciclagem. Na reciclagem à frio, como o material fresado não é aquecido, o ligante permanece enrijecido agindo como parte dos agregados (ZAUMANIS & MALLICK, 2015).

A falta de entendimento sobre os mecanismos envolvidos na interação entre o ligante existente no RAP e o ligante virgem é um dos principais entraves à utilização de quantidades elevadas desse material em misturas asfálticas recicladas (LO PRESTI *et al.*, 2016). O ideal é que todo o ligante existente no RAP seja ativado e fique disponível para a mistura com o novo ligante, porém, na prática, uma parte do ligante antigo permanece inativo, e os dois ligantes podem não formar um filme asfáltico homogêneo recobrando os agregados, sobretudo para teores maiores de RAP, o que pode influenciar negativamente o comportamento da mistura (SOLEYMANI *et al.*, 2000; HUANG *et al.*, 2005; BOWERS *et al.*, 2014; SREERAM *et al.*, 2018; ZHANG *et al.*, 2020).

De acordo com Lo Presti *et al.* (2019) o processo de reaproveitamento do ligante presente no RAP pode ser dividido em três etapas: a transição para uma fase menos viscosa, a sua mistura com o ligante asfáltico virgem e o ligante final obtido. A primeira e segunda etapa são chamadas

de ativação do ligante oxidado, procedimento pelo qual parte do ligante fica disponível para interação com os novos materiais, por meio do aquecimento e conseqüentemente diminuição da viscosidade. A terceira etapa está relacionada à interação entre o ligante novo e o ligante envelhecido, que foi ativado e ficou disponível ao fim da primeira etapa. Embora, haja uma relação complexa entre essas etapas, essa divisão é importante já que as duas primeiras estão mais ligadas às características intrínsecas do RAP, enquanto a terceira é mais influenciada por fatores externos. Dessa maneira, é interessante analisar de maneira separada as propriedades do material fresado e a influência dos parâmetros de usinagem.

Trabalhos recentes como o de Kasser *et al.* (2018) e Abdalfattah *et al.* (2021) também realizam essa divisão e utilizam os termos *Degree of Binder Activity* (DoA) e *Degree of Blending* (DoB) para se referir ao grau de ativação do ligante (existente no RAP) e ao grau de interação entre os ligantes, respectivamente. Ainda não há um consenso sobre como avaliar e quantificar estes dois parâmetros presentes nas misturas asfálticas recicladas, sobretudo em relação ao DoB.

O desafio atualmente é quantificar o grau com que estes fenômenos de ativação e interação acontecem, tendo em vista que a ativação do ligante envelhecido e a interação entre os dois ligantes estão relacionadas com as características dos materiais envolvidos e também com as condições em que a usinagem é realizada. Com esse conhecimento, será possível analisar a necessidade de adotar medidas que incentive a ativação do ligante presente no RAP e a interação entre os ligantes, ou também meios que compensem eventuais prejuízos ao desempenho das misturas asfálticas recicladas provocadas pela baixa eficácia do processo (VASSAUX *et al.*, 2018).

Portanto, este trabalho buscou aumentar a compreensão sobre o Grau de Mistura (DoB) considerando fatores que influenciam no grau de mistura como a variabilidade do RAP, a quantidade de material fresado utilizado e a temperatura de usinagem da mistura asfáltica reciclada. Além disso, o presente estudo teve o objetivo de alcançar uma formulação que quantificou o DoB por meio de um teste mecânico, o ensaio de Módulo Dinâmico, e um teste químico, o ensaio de FTIR, e correlacionou com a influência dos fatores supracitados.

## **1.1 Justificativa**

A demanda por técnicas eficientes aplicadas aos projetos de construção, manutenção e restauração de pavimentos é uma realidade e a busca por alternativas que sejam economicamente sustentáveis ganha mais aceitação a cada dia. Nesse contexto está inserida a técnica de reciclagem de pavimentos. Órgãos de infraestrutura rodoviária têm-se atentado ao uso de materiais que antes eram descartados e considerados como resíduos na produção de novas misturas asfálticas e/ou como estabilizantes granulométricos de camadas granulares do pavimento (ORETO *et al.*, 2021).

Diversos países, como Estados Unidos, Alemanha, e outros países da Europa, fazem a reciclagem da camada asfáltica para produção de novas camadas de rolamento. A aplicação da técnica tem sido discutida com o objetivo de estabelecer o uso deste material fresado, que se trata de um material de potencial nobre, garantindo assim soluções sustentáveis e economicamente viáveis, aplicadas à pavimentação (PINHEIRO, 2021).

De acordo com Al- Ghalibi e Mohamad (2021) existem vantagens no uso da técnica e entre elas merece destaque a redução nos custos de construção, conservação de agregados e ligantes, preservação da geometria do pavimento existente, manutenção das condições de drenagem, proteção do meio ambiente, economia de energia, homogeneização estrutural, readequação estrutural e rápida liberação da pista. Além dessas vantagens o uso dessa técnica visa diminuir o material fresado que seria descartado e/ou empilhado na natureza e também diminuir o uso de novos materiais. Com isso, é natural que se deseje incluir quantidades cada vez mais elevadas deste material nas misturas asfálticas recicladas (BRESSI *et al.*, 2015).

Contudo, ainda existem limitações para o uso das misturas recicladas com alto teor de RAP: pouca informação sobre o desempenho de longo prazo e durabilidade; falta de diretrizes/políticas e especificações de agências rodoviárias para a produção e controle de qualidade; questões técnicas relacionadas à complexidade da própria formulação e às capacidades das usinas de asfalto. Em alguns países a quantidade de RAP nas camadas de rolamento é limitada em 10-30% (Hungria, Suécia, Polônia) ou mesmo proibida (República Tcheca, Espanha), enquanto em outros países o RAP pode ser usado em até 100% (Alemanha, Noruega, Dinamarca) (MOLLENHAUER *et al.*, 2010; PARTL *et al.*, 2013; VASSAUX *et al.*, 2019). No Brasil, existe a norma do DNIT – ES 033/2021 que especifica a sistemática a ser empregada na execução de camada do pavimento por meio da produção de misturas asfálticas recicladas em usina a quente. Essa norma estabelece os requisitos concernentes a materiais, equipamentos, execução, condicionantes ambientais, controle da qualidade dos materiais usados, além de conformidade, não conformidade e medição dos serviços.

Um dos principais motivos para a dificuldade em se aumentar a quantidade de RAP nas misturas asfálticas recicladas é a falta de conhecimento acerca das características do material fresado e dos mecanismos envolvidos na interação entre o ligante asfáltico presente no RAP e o ligante asfáltico novo. Assumir, por exemplo, que o ligante do RAP irá se misturar completamente com o ligante novo adicionado, ainda é uma prática comum no momento da dosagem das misturas recicladas à quente (VASSAUX *et al.*, 2019). No entanto, supor essa condição pode acarretar ao projetista a adotar uma quantidade insuficiente de ligante a ser adicionado na nova mistura, proporcionando uma mistura mais suscetível ao trincamento por fadiga precoce ou à desagregação

da massa asfáltica. Apesar de adotar essa condição total de interação, sabe-se que a interação acontece de maneira parcial, porém, não existe uma metodologia consensual que permita determinar de forma precisa esse grau de interação (PINHEIRO, 2021).

Atualmente, os pesquisadores vêm empregando diferentes métodos para investigar os mecanismos envolvidos no fenômeno de interação. Dentre os métodos (SHIRODKAR *et al.*, 2011; BOOSHEHRAN *et al.*, 2013; MOHAJERI *et al.*, 2014; BOWERS *et al.*, 2014b; GOTTUMUKKALA *et al.*, 2018; YU *et al.*, 2018; GASPAR *et al.*, 2020; AL- GHALIBI & MOHAMAD, 2021) para estudar o grau de mistura (DoB) uma das técnicas mais usadas é a extração por partes de mistura asfáltica reciclada com uso de solvente, seguida da recuperação do ligante asfáltico de cada uma dessas etapas (ZHAO *et al.*, 2015). Nesse cenário, Hettiarachchi *et al.* (2020) indicam que o FTIR é uma boa opção para analisar o DoB em diferentes temperaturas e tempos de mistura. Todos os estudos supracitados não consideraram o comportamento mecânico da mistura reciclada e com isso, tem-se que o módulo Dinâmico pode proporcionar análises em uma longa faixa de frequência e temperatura.

Dessa maneira, o presente trabalho buscou estabelecer uma equação que possa analisar o grau de mistura entre o material fresado e os novos materiais na nova mistura asfáltica reciclada. Para isso foram considerados fatores que influenciam de maneira direta essa interação, como o tipo e a quantidade de RAP adicionados e a temperatura de usinagem.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo Geral**

O presente trabalho teve o objetivo de analisar a aplicabilidade de um ensaio mecânico e um químico para quantificar o parâmetro de Grau de Mistura (DoB) de misturas asfálticas recicladas.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- analisar a influência de diferentes tipos de RAP nas propriedades mecânicas da mistura asfáltica reciclada;
- avaliar o efeito da temperatura de usinagem nas propriedades finais das misturas asfálticas recicladas;
- determinar a composição química dos ligantes com a variação da temperatura de usinagem, diferentes tipos e teores de RAP, por meio do ensaio de FTIR;

- utilizar resultados do ensaio de Módulo Dinâmico e FTIR para produzir um modelo preditivo capaz de quantificar o DoB e alcançar uma formulação para esse parâmetro.

### **1.2.3 Hipótese**

A justificativa desse trabalho tratou de como a técnica de fresagem é amplamente adotada nas operações de conservações de pavimentos asfálticos. Ela gera grandes quantidades de material fresado que ocasiona problemas ambientais como o acúmulo e o descarte inadequado. Logo, para o aumento do uso de misturas asfálticas recicladas na indústria da pavimentação, sobretudo com adição de grandes quantidades de material fresado, é necessário compreender como funciona a interação dos materiais novos com os materiais fresados que sofrem a influência de vários de fatores, como o tipo de RAP, o seu teor e a temperatura de usinagem.

Portanto, nesta tese pretende-se verificar a validação das seguintes hipóteses:

Hipótese 1: Nas misturas asfálticas recicladas, o parâmetro grau de mistura (DoB) sofre influência da temperatura de usinagem, do tipo de material fresado e da quantidade deste adicionada na nova mistura.

Hipótese 2: é possível quantificar o DoB por meio de um teste mecânico e químico, o ensaio de Módulo Dinâmico e o FTIR, que considere a variação do tipo e teor de material fresado, além da sua temperatura de usinagem.

Dentro desse contexto, foram necessários ensaios laboratoriais para avaliação das hipóteses e a formação de um banco de dados do ensaio de Módulo Dinâmico e FTIR para a formulação do DoB mediante a exploração de várias configurações de equações.

### **1.2.4 Organização da tese**

Essa tese é composta de cinco capítulos, sendo apresentada a seguir uma breve descrição dos assuntos abordados em cada um deles

- Capítulo 1 – formado por introdução, justificativa, objetivos, hipóteses e organização do trabalho;
- Capítulo 2 – compreende a fundamentação teórica, onde foram abordados assuntos mais relevantes ao desenvolvimento deste trabalho, tais como: desempenho dos pavimentos, reciclagem de misturas asfálticas, RAP, dosagem das misturas asfálticas recicladas a quente, fenômenos de interação entre o ligante envelhecido

do RAP e o ligante virgem. Além disso, foram abordados o grau de mistura (DoB) e as técnicas para elaboração de modelos preditivos;

- Capítulo 3 – consiste na descrição dos métodos experimentais e/ou procedimentos de ensaios utilizando, assim como os materiais e equipamentos necessários ao alcance dos objetivos da pesquisa;
- Capítulo 4 – são apresentados os resultados obtidos com as devidas análises realizadas durante a fase experimental;
- Capítulo 5 – são apresentadas as conclusões encontradas para esta pesquisa com sugestões para futuras pesquisas.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA**

Neste capítulo foram abordados assuntos relevantes ao tema para desenvolvimento e entendimento desta pesquisa. Para isso, foram introduzidas noções do desempenho de pavimentos, assim como foi feita uma fundamentação a respeito da reciclagem de misturas asfálticas, do RAP e da dosagem das misturas recicladas à quente. Além disso, foi abordada a interação existente entre os materiais novos e o fresado na nova mistura asfáltica reciclada, analisando parâmetros como o DoA e o DoAv.

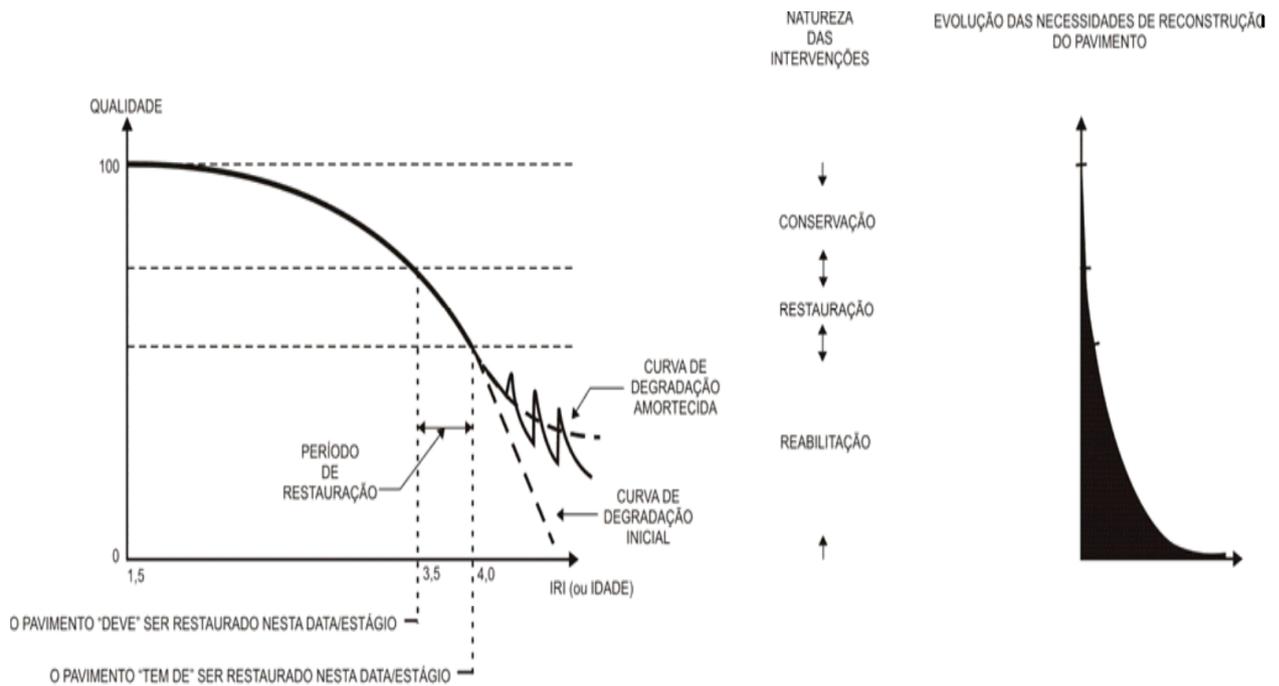
O capítulo é finalizado com informações a respeito do Grau de Mistura (DoB) como por exemplo, quais os fatores que influenciam esse parâmetro, os estudos existentes que tentam prever o seu comportamento e como ele se mostra nos procedimentos de mistura.

### **2.1 Desempenho de pavimentos**

O pavimento é projetado para durar por um período de tempo, determinado de vida útil. No começo dessa vida útil, o pavimento apresenta a sua melhor condição e com o decorrer do tempo, o tráfego e as condições climáticas este pavimento deteriora-se. Com isso, o desempenho do pavimento é justamente essa variação da serventia ao longo do tempo (COSTA, 2022).

De acordo com Soncin (2011) o desempenho é a mudança de serventia que o pavimento oferece aos usuários, no decorrer no tempo, ou logo após uma quantidade determinada de aplicações de cargas do tráfego. Dessa maneira, a serventia do pavimento é a habilidade funcional do pavimento oferecer qualidade de rolamento em qualquer condição de tráfego no período de sua vida útil. A Figura 1 mostra o fundamento da qualidade do pavimento em função da sua idade (ou índice internacional de irregularidades, IRI).

**Figura 1 - Curva de degradação do pavimento**



Fonte: Costa, 2022.

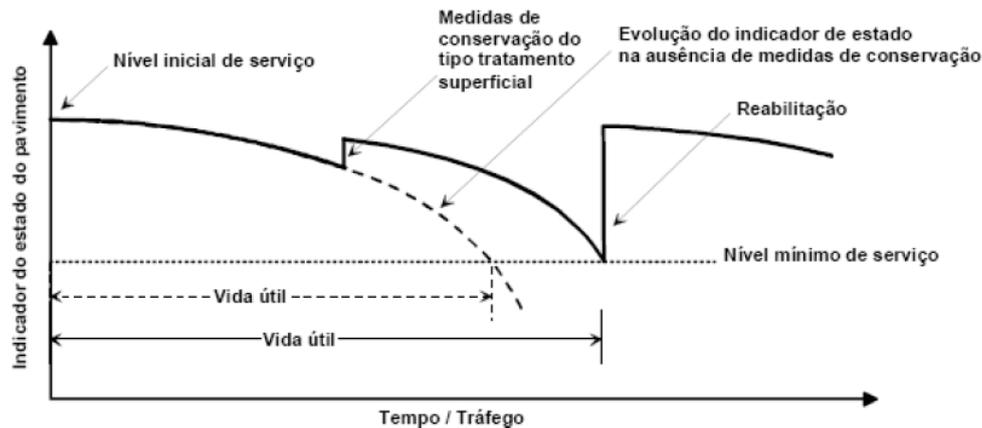
Alguns parâmetros influenciam no desempenho de um pavimento e, de acordo com Batista (2004), pode-se destacar os seguintes:

- magnitude e frequência do tráfego;
- características dos materiais componentes;
- heterogeneidade dos materiais componentes;
- frequência e práticas de manutenção;
- condições de drenagem;
- características ambientais.

Com todos os desgastes que os pavimentos sofrem devido à ação do tráfego e das condições no decorrer do tempo, estabelecer uma metodologia com o objetivo de subsidiar as decisões de intervenção é imprescindível para o acompanhamento da evolução do pavimento a fim de recuperar sua qualidade. Para tal, alguns indicadores podem ser usados para quantificar o desempenho de um pavimento, variando desde aqueles que caracterizam a sua condição funcional até aqueles que consistem do registro dos defeitos de superfície. Assim, o pavimento pode ser analisado por meio de avaliações funcionais ou avaliações estruturais. No Brasil, a avaliação funcional é a mais abordada (MARTINS, 2014).

A Figura 2 ilustra que no início da vida útil do pavimento ele apresenta um determinado nível máximo de serviço, caracterizado por altos níveis de segurança, conforto e economia. Esse nível decai ao decorrer do tempo e perde suas características iniciais, conseqüentemente também há uma redução no nível de serviço.

**Figura 2** - Evolução do estado de um pavimento



**Fonte:** Batista, 2004.

Ainda de acordo com a Figura 2, o uso adequado de previsões relacionados a restaurações aumenta a vida útil do pavimento. Nessa situação, medidas conservativas simples, como o tratamento superficial, pode dá uma sobrevida menor ao pavimento, no entanto, há uma redução nos custos. A intervenção necessária para se alcançar um nível mínimo de serviço será mais intensa e onerosa, e em algumas situações, será necessário a remoção total da camada de rolamento. Dessa maneira, as intervenções em um pavimento podem ser feitas de acordo com as propriedades que se pretendem beneficiar, podendo ser a melhoria da qualidade funcional do pavimento que havia sido reduzida reabilitando o nível da segurança, conforto e economia ou pode ser a melhora da qualidade estrutural, restaurando a capacidade de suporte do pavimento com o objetivo da reabilitação (BATISTA, 2004; COSTA *et al.*, 2023). Uma das técnicas usadas para intervir no pavimento e realizar manutenções e intervenções é a fresagem, um método de remoção total e/ou parcial das camadas do pavimento, produzindo o material fresado que pode ser reciclado e utilizado em novas misturas asfálticas, como será mostrado nos itens seguintes.

## 2.2 Reciclagem de misturas asfálticas

A estrutura de um pavimento perde, ao decorrer do tempo, a sua capacidade estrutural e/ou funcional devido a ação do tráfego e das variações climáticas e com isso necessita ser reabilitada.

De acordo com a *Asphalt Recycling and Reclaiming Association* (ARRA, 2017) existem diferentes maneiras de reabilitação e recuperação desse pavimento:

- *Cold Planning* – fresagem com/sem recomposição: é o processo que remove parte da superfície do revestimento asfáltico até uma determinada profundidade, a depender do desgaste da camada de revestimento. Essa técnica é normalmente usada antes da aplicação de novos materiais e remove defeitos da superfície como ondulações, trincas, escorrimentos e afundamentos da trilha de rodas, bem como corrige a inclinação transversal e realiza operações para ajustar a frisos do meio-fio. Esta pode ser usada para regularizar ou texturizar o pavimento com o objetivo de acabar com o escorregamento e recuperar a resistência à derrapagem. A superfície texturizada (Figura 3) torna os pavimentos ásperos, restaurando o atrito e permitindo sua utilização imediata, pode também, ser tratada posteriormente com um dos outros métodos de reciclagem ou deixado como uma superfície de texturização.

**Figura 3** - Textura após a fresagem



**Fonte:** Torres, 2020

- *Hot recycling in asphalt plant* – reciclagem a quente em usina: nessa metodologia, o RAP é misturado com agregados virgens e ligante asfáltico, ou agente de reciclagem, para confeccionar novas misturas asfálticas quentes. Normalmente, esse método é optado quando há necessidade de remoção total da camada de revestimento, ou grande parte dela. As usinas gravimétricas e as volumétricas podem ser usadas para fabricar misturas asfálticas recicladas, que depois de produzidas são transportadas,

aplicadas e compactadas com equipamentos convencionais. Nenhuma técnica especial é necessária para deposição e compactação, mas a mistura reciclada é frequentemente aplicada em temperaturas mais altas do que as utilizadas convencionalmente. O RAP é normalmente obtido por meio da fresagem de pavimento, ou também por operação de trituração. As vantagens dessa técnica é que as misturas recicladas terão um desempenho igual, ou melhor, em comparação com as misturas convencionais e possuem a capacidade de corrigir a maioria dos defeitos de superfície, deformação e trincas.

- *Hot in-place recycling (HIR)* – reciclagem a quente no local: o processo consiste no aquecimento do pavimento a ser extraído, permitindo a fresagem até a profundidade especificada, que geralmente varia de 2 a 5 cm, embora alguns equipamentos possam tratar até 7,5 cm. O RAP resultante é então misturado e compactado utilizando o equipamento de pavimentação para o CA convencional. Todo o processo é executado in-situ e devido a isso, essa técnica usa uma série de equipamentos, como pré-aquecedores, aquecedores, fresadoras, misturadores, pavimentadoras de asfalto e rolos. Conseqüentemente, os equipamentos combinados se estendem por uma distância considerável e é conhecido popularmente como um “trem”, como mostra a Figura 4. Nesse método também são adicionados novos materiais e/ou agentes de reciclagem ou outros aditivos.

**Figura 4** - Equipamentos combinados para realização de HIR.



Fonte: Torres, 2020

- *Cold in-place recycling (CIR)* – reciclagem a frio no local: esse é um método de reabilitação que reutiliza materiais de pavimentos presentes sem a aplicação de calor,

exceto para o agente rejuvenecedor se for utilizado. Normalmente, a profundidade do tratamento é de 7,5 a 10 cm. Todo o processo é feito enquanto o pavimento é fresado e frequentemente não é preciso o transporte de materiais, com exceção do aditivo que for utilizado, onde a emulsão é o mais usado, porém podem-se ser usados outros agentes rejuvenecedores. Existem alguns casos em que podem ser acrescentados agregados virgem ao material fresado com o objetivo de otimizar as propriedades do RAP. As vantagens dessa técnica incluem tratamento estrutural significativo da maioria dos danos do pavimento, melhoria na qualidade da via, transporte mínimo de materiais, redução de emissão de gases e capacidade de alargamento da via pavimentada.

- *Full depth reclamation (FDR)* – recuperação profunda do pavimento: essa técnica de reciclagem usa toda a seção do revestimento asfáltico e uma quantidade pré-fixada de material subjacente é uniformemente retirada e misturada com aditivos para confeccionar uma camada de base estabilizada. Em determinadas situações, a porção do material presente no local não é suficiente para alcançar a espessura desejada da camada de base tratada e com isso é necessário o uso de novos materiais para aumentar a espessura. A aplicação de um tratamento superficial ou revestimento asfáltico é realizada como uma operação separada no final do período de cura. As vantagens dessa técnica são que a maioria dos defeitos são tratados, conservação de recursos não renováveis, poucas peças de equipamentos são necessárias, os custos de transporte são minimizados, deficiências de subleito podem ser corrigidas por estabilização, produz camadas espessas e unidas que são homogêneas e melhorias estruturais significativas podem ser feitas.
- *Cold Central Plant recycling (CCPR)* – esse é um 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. Os materiais asfálticos são fresados, processados e então novamente utilizados usando práticas tradicionais. A espessura da camada típica varia de 7,5 a 15 cm e normalmente são usadas emulsões asfálticas ou agentes rejuvenecedores. Essa técnica 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 pugmil, uma tremonha para armazenamento temporário e carregamento de caminhões de transporte.

As seis metodologias supracitadas podem ser usadas em combinação ou separadas. Para a seleção do melhor método é preciso considerar: as condições locais e os defeitos existentes no pavimento em questão; a identificação das possíveis causas dos defeitos com base em análises laboratoriais e de campo; as informações do projeto original e o histórico de execução e intervenções de conservação; os custos iniciais e de manutenção; o histórico de desempenho; as restrições provenientes da geometria da via; as condições ambientais e o tráfego (DNIT, 2021). O Quadro 1 apresenta as recomendações da ARRA (2017) para a seleção da metodologia de reabilitação do pavimento asfáltico de acordo com os defeitos apresentados no pavimento.

**Quadro 1** - Métodos de reabilitação de pavimentos asfálticos

<b>Tipos de defeitos</b>	<b>Fresagem e recomposição</b>	<b>Reciclagem a quente em usina</b>	<b>Reciclagem a quente no local</b>	<b>Reciclagem a frio</b>	<b>Recuperação profunda</b>
<b>Defeitos superficiais</b>					
Desagregação	X	X	X		
Exsudação	X	X	X		
Escorregamento	X	X	X		
<b>Deformação</b>					
Corrugação/ondulação	X	X	X		
Afundamento de trilha raso	X	X	X		
Afundamento de trilha profundo		X		X	X
<b>Trincamento (associado ao carregamento)</b>					
Jacaré		X		X	X
Longitudinal		X	X	X	X
Bordo		X		X	X
Derrapagem		X	X		
<b>Trincamento (não associado ao carregamento)</b>					
Bloco		X		X	X
Longitudinal		X	X		
Transversal (térmico)		X		X	X

<b>Reflexão de trincas</b>		X		X	X
<b>Reparos de Manutenção</b>					
Spray		X		X	X
Recapeamento		X		X	X
Buraco/Panela		X		X	X
Reparo profundo		X		X	X
<b>Problemas de base/sub base</b>					X
<b>Irregularidade</b>					
Generalizada	X	X	X		
Depressões locais	X	X	X		X
Pontos altos	X	X	X		X

**Fonte:** Adaptado de ARRA, 2017.

Todos os diferentes métodos de reciclagem oferecem alguns pontos positivos diante das metodologias convencionais de reabilitação, e a escolha de uma determinada técnica deve ser baseada sobretudo no tipo de defeito mostrado pelo pavimento existente. No entanto, como pode ser visto no Quadro 1, a reciclagem a quente em usina é a alternativa que abrange a maior flexibilidade de correção das várias patologias no pavimento. Cunha (2010) resume as vantagens e desvantagens de cada método (Quadro 2).

**Quadro 2 – Vantagens e desvantagens das técnicas de reciclagem de pavimentos flexíveis**

<b>Vantagens e desvantagens dos métodos de reciclagem de pavimentos flexíveis</b>			
<b>Técnica de reciclagem</b>	<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>	
<b>Reciclagem In-situ</b>	<b>A frio</b>	<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 rigor 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>
	<b>A quente</b>	<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>
<b>Reciclagem em usina</b>	<b>A frio</b>	<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. Necessita de zonas de descarte</li> <li>3. Necessita de uma camada de sobreposição</li> </ol>
	<b>A quente</b>	<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>
	<b>Morna</b>	<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:** Cunha, 2010.

### 2.3 Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)

Ao chegar no fim da sua vida de serviço, o pavimento é removido por meio do processo de fresagem até uma determinada cota (EDDHAHAK-OUNI *et al.*, 2012). A fresagem é uma operação de corte por meio de um equipamento, fresador, de uma camada ou da totalidade do revestimento asfáltico de um trecho de via ou, ainda, pode englobar outra camada do pavimento, como maneira de restauração da qualidade da pista de rolamento ou como forma de melhorar a capacidade de suporte.

O material proveniente do corte do revestimento asfáltico é chamado de RAP que em português é denominado de pavimento asfáltico recuperado (ZUBARAN, 2014). Segundo a NCHRP (2001) o RAP é o antigo pavimento moído, tirado da faixa de rolamento. Esse material pode ser utilizado em novas misturas asfálticas proporcionando uma diminuição da quantidade de material novo que precisa ser adicionado à mistura asfáltica e, com isso pode produzir uma economia de recursos naturais e financeiros. Para Yang *et al.* (2018) as principais vantagens na reutilização do RAP, são: diminuição da demanda de ligante e agregado virgem, redução de aplicações em aterro e diminuição dos custos envolvidos.

Segundo o INIR (2015) a reciclagem é mais uma opção de recuperação dos pavimentos desgastados. Esta técnica não deve ser relacionada somente às questões ecológicas, pois ela é tecnicamente adequada além de, possuir vantagens econômicas, tanto para as empresas da área como para os órgãos administrativos da rodovia.

De acordo com Specht *et al.* (2013) os principais benefícios do uso de material fresado são:

- redução nos custos de construção;
- conservação de agregados e ligantes asfálticos;
- preservação da geometria do pavimento asfáltico atual;
- manutenção da drenagem;
- preservação do meio ambiente;
- conservação de energia;
- homogeneização estrutural;
- readequação estrutural;
- liberação da pista rápida.

No Brasil, mesmo com a existência de casos bem-sucedidos, não há dados precisos sobre a produção e a reutilização de material fresado, já que a reciclagem asfáltica ainda não é uma prática de rotina, porém a norma DNIT 033/2021 especifica o serviço dos concretos asfálticas

reciclados usinados à quente. Um dos pontos positivos da reciclagem está na condição de que todo o material fresado por ser reutilizado, evitando o armazenamento de resíduos no meio ambiente. Porém, para o Manual de Pavimentação do DNIT (2006) a escolha o tipo de reciclagem depende de diversos fatores como:

- estudo das patologias do pavimento;
- reconhecimento das possíveis causas das patologias, fundamentado em análises de laboratório e em campo;
- informes de projetos e antecedentes das ações de conservação;
- custos;
- históricos do desempenho do pavimento;
- limitações diante à geometria horizontal e vertical da rodovia;
- questões ambientais;
- tráfego.

Segundo *et al.* (2016) a fresagem de pavimentos asfálticos é um método aplicado de maneira constante como segmento do procedimento de recuperação de pavimentos danificados. A fresagem, ainda de acordo com os autores, possui o objetivo de solucionar entaves tradicionalmente urbanos como, por exemplo, o alteamento de calçadas e de drenagem pluvial, além da diminuição da propagação de trincas por fadiga.

A técnica de fresagem começou na década de 1970, idealizada para reduzir a quantidade de materiais asfálticos disponíveis e pela crise econômica internacional da época. No Brasil, esse método foi, de início, utilizado na década de 1980 com o uso de uma fresadora norte-americana na manutenção da Via Anchieta, no estado de São Paulo (BONFIM, 2011).

Segundo Bonfim (2011) existem três tipos de fresagem:

- fresagem superficial: também denominada de fresagem de regularização e seu principal objetivo é a reparação dos defeitos existentes no revestimento asfáltico e não é necessário o recapeamento da pista subsequente, pois a textura obtida assegura o rolamento, porém com uma redução do conforto.
- fresagem rasa: esse método é usado nas camadas superiores dos pavimentos e em algumas situações pode alcançar a camada de ligação, com um corte intermediário em torno de 5 cm. Essa técnica é muito utilizada na recuperação de patologias funcionais e com correções superficiais.

- fresagem profunda: nessa técnica, o corte atinge níveis relevantes e pode até alcançar as camadas mais inferiores do pavimento, como a sub-base. Ela é utilizada em reparações que possuem como objetivo o panorama estrutural, seja por reorganização da estrutura do pavimento ou pelo acréscimo dos materiais de revestimento à camada de base.

De acordo com Ali *et al.* (2016) alguns dos benefícios da fresagem é a funcionalidade e velocidade na execução dos serviços. O método também possibilita a manutenção dos greides das pistas, pois impede que estes subam depois da aplicação de um novo revestimento. A fresagem também possui vantagens de auxiliar na correção ou alteração da inclinação da pista, além da, nivelção dos tampões de ferro. Essa técnica também é mostrada como a melhor para diminuir o peso das estruturas que sofreram diversos recapeamentos, sem ser fresada a mistura anterior, como é o caso de pontes e viadutos (COSTA *et al.*, 2023).

Apesar de todas as vantagens mostradas, a reciclagem do RAP é reduzida, pois o teor de material fresado depende do procedimento e projeto de mistura; do agente rejuvenescedor; processo de fabricação (tipo de usina, temperatura de produção, tempo de mistura e temperatura de aplicação); desempenho esperado; fonte e propriedades do RAP (YU *et al.*, 2023). Além disso, o processo também depende do envelhecimento do ligante asfáltico que, ao decorrer da sua aplicação, perde diversas de suas propriedades originais, resultantes dos procedimentos de oxidação e volatilização (SABAHFAR; HOSSAIN, 2016). A qualidade do material reciclado vai depender do tipo de equipamento de fresagem, velocidade de fresagem e profundidade de recuperação (KERKHOF, 2012).

Na prática, a limitação é necessária porque a falta de cuidado na técnica de fresagem, no tratamento e armazenamento do RAP e na dosagem da mistura reciclada, assim como no processamento inadequado do material fresado na usina, podem facilmente resultar na deterioração prematura do revestimento asfáltico. Por outro lado, com a devida atenção dada a todos esses fatores, uma mistura asfáltica com grande quantidade de RAP pode mostrar desempenho igual, ou até superior às misturas tradicionais (ZAUMANIS; MALLICK, 2015).

De fato, para serem consideradas soluções sustentáveis, sejam elas obtidas com processo quente, morno ou meio quente, as misturas recicladas devem atender pelo menos às mesmas especificações válidas para as misturas tradicionais (LIU *et al.*, 2023). Porém, o material fresado é muito complexo, que se diferencia, sobretudo em termos de variabilidade, dos componentes tradicionais utilizados nas misturas asfálticas. O RAP é na verdade um conjunto de materiais que ainda estão sendo estudados e caracterizados para fornecer recomendações para sua classificação

(TEBALDI *et al.*, 2018), assim como um projeto mais confiável e previsão de desempenho das misturas recicladas.

Dentre todas as limitações listadas anteriormente, as principais são: granulometria e propriedades físicas do RAP; propriedades mecânicas das misturas recicladas e interação entre o ligante envelhecido e o ligante virgem (ZAUMANIS *et al.*, 2014).

As propriedades dos RAPs usados nas misturas asfálticas variam durante as operações de fresagem e processamento envolvidas na sua obtenção. Esse procedimento produz uma quantidade elevada de agregados finos e dificulta o controle das propriedades volumétricas da mistura final, sobretudo quando grandes quantidades de RAP são acrescentadas em novas misturas. Essa porção mais fina do RAP possui uma maior quantidade de ligante em relação a fração mais grossa devido ao aumento da área superficial, complicando o controle de volume de vazios na mistura (SABAHFAR; HOSSAIN, 2016) Além disso, o material reciclado pode segregar quando for armazenado.

Bonfim (2011) analisou dois trechos experimentais localizados na mesma pista. O primeiro encontrava-se mais desgastado do que o outro, com trincas por fadiga. Essas áreas foram fresadas em três profundidades de corte diferentes – 3, 5 e 8 cm – concordadas com três velocidades de avanço da fresadora – 3, 6 e 10 m/min – para o posterior estudo da granulometria do material obtido. Também foram feitos testes com e sem a extração do ligante asfáltico.

Bonfim (2011) verificou, em relação as composições granulométricas encontradas no estudo, que a fresagem gera um deslocamento das curvas granulométricas quando comparada às curvas antes de processo. A curva granulométrica alcançada com a extração de ligante asfáltico, ou seja, após a fresagem, é deslocada para cima, gerando uma granulometria mais fina, pois os agregados têm os seus tamanhos máximos nominais reduzidos devido as quebras que ocorrem durante o processo de fresagem. O inverso acontece com as curvas granulométricas do material fresado que não passaram pelo processo de extração do ligante. Nessa situação, o material ainda possui os grumos e ocorre um aumento no tamanho máximo nominal dos agregados, dessa maneira a percentagem de fresado passante em cada peneira é diminuída. Com a ausência de finos a curva resultante é abaixo da curva original e esse fato é acentuado com o acréscimo da velocidade de avanço da fresadora.

Pesquisas (ZAUMANIS; MALLICK, 2015; HOSSAIN *et al.*, 2016) mostraram que o efeito do ligante envelhecido se torna mais pronunciado na proporção que a quantidade de RAP aumenta na mistura. O acréscimo de até 30% de material fresado à mistura tem um efeito insignificante nas propriedades da mistura, enquanto 40% de RAP influenciam de maneira mais eficiente as propriedades mecânicas. Ainda de acordo Zaumanis e Mallick (2015) para a adição de

percentagens mais altas desse material não existe especificações Superpave, pois o alto teor de finos do RAP impede alcançar os parâmetros volumétricos determinados por essa metodologia, com isso há uma limitação de 40 a 50% de RAP nas novas misturas asfálticas.

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

A utilização de RAP em revestimentos asfálticos é benéfico ao meio ambiente e pode ser uma oportunidade para a diminuição de custos, porém ainda sofre resistência de alguns órgãos rodoviários, construtoras e concessionárias que apontam o desempenho das misturas recicladas como maior empecilho (FRIGIO *et al.*, 2017). Por outro lado, diversos pesquisadores (MCDANIEL *et al.*, 2000; NEWCOMB *et al.*, 2007; BOWERS *et al.*, 2014b; LO PRESTI *et al.*, 2016; GASPAR, 2019; ZHANG *et al.*, 2020) reconhecem que misturas asfálticas com uso de RAP podem mostrar desempenho equiparável, ou ainda superior, que misturas feitas somente com material virgem, desde que sejam projetadas e dosadas de maneira adequada. A dificuldade para proporcionar um bom desempenho está relacionada à utilização de técnicas de dosagem tradicionais, na sua adaptação para adicionar o material fresado e nas suas propriedades, que podem ser muito variáveis. Assim como os materiais novos, o RAP pode alterar muito a depender de sua origem. Por esse motivo, a escolha e caracterização apropriada dos materiais é importante, assim como o tratamento adequado do RAP (GASPAR, 2019).

A dosagem de misturas asfálticas recicladas objetiva alcançar parâmetros volumétricos e propriedades mecânicas consideradas necessárias para um bom desempenho, tal qual as misturas asfálticas convencionais (COSTA, 2022). Quando adequadamente dosada, a mistura reciclada pode ter propriedades e comportamento similares ao de misturas compostas por apenas materiais virgens. Em misturas com a adição do RAP, é importante que o teor e as propriedades do ligante asfáltico presente nele sejam consideradas, assim como as propriedades de seus agregados, uma vez que a combinação do material fresado e dos agregados novos deve estar em conformidade com os critérios da dosagem (MCDANIEL *et al.*, 2000). A mesma consideração serve para a combinação do ligante presente no RAP e do agente de reciclagem (AR), como o ligante asfáltico virgem (LO PRESTI *et al.*, 2019).

O procedimento de envelhecimento que acontece no ligante asfáltico do RAP resulta em um aumento substancial de sua viscosidade, já que, geralmente, é exposto por longos períodos de intempéries e ação do tráfego (DEVULAPALLI *et al.*, 2019). Mesmo que esse aumento possa melhorar o desempenho do ligante e da mistura em elevadas temperaturas de serviço, é o aumento da rigidez e diminuição da resistência à fadiga do RAP que precisa ser considerado na nova mistura asfáltica (OBAID *et al.*, 2019).

O ligante existente no RAP deve ser recuperado e analisado para o conhecimento das suas propriedades (MIKHAILENKO *et al.*, 2019; WAKEFIELD *et al.*, 2018). Se esse ligante for muito rígido, ou se for usado um teor elevado de RAP na nova mistura, a alta consistência do ligante do material fresado precisa ser considerada no projeto da mistura (LO PRESTI *et al.*, 2019). Para isso, o uso de agentes de reciclagem (AR) é necessário, podendo ser um ligante menos viscoso e/ou agentes rejuvenescedores. No entanto, devido à complexidade e heterogeneidade do RAP é preciso cautela em seu uso.

O aumento de RAP em novas misturas acarreta uma maior variabilidade dos resultados alcançados a partir dos ensaios volumétricos e/ou mecânicos devido a heterogeneidade do RAP e dos procedimentos de mistura (Figura 5) (GENNESSEAU, 2015; TEBALDI *et al.*, 2012).

**Figura 5** - Possíveis composições do material particulado de RAP



**Fonte:** Gaspar, 2019

A determinação da curva granulométrica do material fresado antes e após a extração do ligante asfáltico também é importante. A granulometria após a extração do ligante oferece um indicativo de como a granulometria irá variar à medida que o ligante asfáltico do RAP for ativado. Isso porque, como mostrado na Figura 5, uma parte significativa dos agregados presentes nos materiais fresados são grumos formados por ligante asfáltico e partículas menores de agregados. Quando o material é aquecido, durante a reciclagem, os grumos se desfazem e a granulometria do RAP é alterada (COPELAND 2011).

Ainda existem outros pontos que limitam o seu emprego como a escassez de normas de caracterização do RAP e de determinação das propriedades do ligante; a necessidade de readaptação dos métodos de dosagem; e a falta de entendimento sobre alguns mecanismos envolvidos durante a mistura juntamente com o agente de reciclagem (COPELAND, 2011; LO PRESTI *et al.*, 2019).

Nas últimas décadas, diversos países utilizaram diferentes métodos para a determinação da dosagem das misturas asfálticas recicladas. Nos Estados Unidos, a metodologia Superpave foi elaborada na década de 1990 sem mostrar orientações sobre o uso de RAP nas misturas asfálticas à quente. Além disso, a metodologia sugere a utilização de distribuições granulométricas mais graúdas e estabeleceu critérios volumétricos que eram dificilmente obtidas com altas quantidades de RAP (COPELAND, 2011). Após alguns anos depois, a *Federal Highway Administration* publicou uma série de recomendações para auxiliar na dosagem de misturas com RAP usando a metodologia Superpave com base em uma pesquisa anterior realizada por Kandhal e Fool (1997), sobretudo na escolha do ligante asfáltico virgem a ser acrescentado, com variadas abordagens a depender da quantidade de RAP desejada (MCDANIEL *et al.*, 2000).

Dentre as recomendações, o órgão indica que para teores de até 15% de RAP, o ligante asfáltico novo não necessitaria ser mudado, já que a influência do ligante presente no material fresado seria mínima, independente das suas propriedades. Para os teores entre 15% e 25%, o órgão recomenda que seja usado ligante asfáltico com PG um nível abaixo, tanto na temperatura de alta do PG como na sua temperatura de baixa. Para as misturas asfálticas com quantidades de RAP acima de 25% é sugerido que o projetista recorra aos *blending charts*, ou seja, determinar a temperatura alta de PG do ligante presente no material fresado (após a extração e recuperação) e do ligante desejado para a mistura final, e obter, por meio de um gráfico, uma relação linear entre a variação deste parâmetro e a proporção de RAP na mistura. Dessa maneira, seria possível presumir o efeito do ligante envelhecido sobre o ligante virgem, de acordo com as propriedades de cada um e a proporção entre eles, e definir o ligante virgem ideal para a mistura (LO PRESTI *et al.*, 2019).

Os *blending charts* já eram usados rotineiramente para projetar misturas com alto teor de RAP mesmo antes da implantação da metodologia Superpave, no entanto, usava-se a viscosidade dos ligantes como parâmetro, ao invés da temperatura de PG (WEST *et al.*, 2013).

Essas recomendações foram seguidamente adicionadas na norma AASHTO M323-07, que especifica a dosagem de misturas asfálticas pelo método Superpave, assim como recomendações adicionais para o manuseio e a caracterização do RAP em laboratório. Na versão mais atualizada, AASHTO M 323-17 a escolha do ligante asfáltico foi revisada, e o critério usado não é mais a porcentagem de RAP em relação à massa total da mistura, mas sim o parâmetro RBR (RAP Binder Ratio), que indica a proporção de ligante proveniente do RAP em relação ao total de ligante asfáltico na mistura. Para RBR abaixo de 25%, o ligante virgem não deve ser alterado, caso contrário deve-se recorrer aos *blending charts* ((LO PRESTI *et al.*, 2019).

Nos países europeus, o conceito é semelhante ao americano, porém é usada a penetração e o ponto de amolecimento como parâmetros para a caracterização dos ambos os ligantes. A norma 13108-1/2016 indica que sejam usadas equações para estimar os parâmetros do ligante resultante, segundo a proporção em massa de cada ligante na mistura, ao invés dos blending charts (COSTA *et al.*, 2023). Caso a quantidade de RAP seja inferior que 10% para camadas de revestimento ou 20% para camadas de ligação, o ligante asfáltico virgem deve ser o mesmo considerado na mistura sem o material reciclado. Essa normativa permite que os países membros façam uso do RAP somente em novas misturas, porém as agências rodoviárias podem estabelecer critérios específicos para a utilização de RAP (ANTUNES *et al.*, 2019).

De maneira geral, cada país define como critério a utilização de percentagens iguais de RAP que as permitidas pela norma europeia. No entanto, os requisitos estabelecidos para as propriedades do material reciclado serão os mesmos aplicados aos materiais virgens, que seriam destinados àquela camada, caso faça uso de grandes quantidades de material fresado (acima de 25%) (GASPAR, 2019). O Quadro 3 mostra exemplos de países, com suas especificações, diante ao uso de RAP em novas misturas.

**Quadro 3** - Limites e requisitos da adição de RAP em alguns países da Europa

Países	Uso de RAP
Áustria	<p>Não existe limitação em relação ao uso do RAP. São estabelecidas as exigências:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• As propriedades de agregados RAP necessitam atender os requisitos de agregados virgens;</li><li>• A interação dos ligantes deve atender as propriedades do ligante final estipulado e, com isso, vários tipos de ligantes virgens podem ser usados;</li><li>• Acréscimo de requisitos para misturas modificadas com polímeros são especificados em relação a recuperação elástica dos ligantes misturados;</li><li>• Não é permitido a utilização de RAP nas camadas muito finas.</li></ul>
Alemanha	<p>As normas permitem o uso de grandes quantidades de RAP em camadas superficiais, com os seguintes requisitos:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Os agregados do RAP devem atender aos requisitos de agregado virgem para a camada;</li><li>• O limite máximo de RAP permitido é definido segundo o teor de ligante, o ponto de amolecimento e a percentagem em massa das frações de agregados de 0/0,063mm, 0,063/2 mm e 2/máximo</li><li>• A utilização de RAP não é permitida para SMA ou OGA.</li></ul>
França	<p>Notas circulares, normativas, guias de aplicação e/ou convenções de acordos voluntários, funcionam como medidas de incentivo ou mesmo imposição para uso do RAP e dos métodos de reciclagem. De acordo com a EM 13108-1 (2016):</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Camada de rolamento, especifica-se teores de 0 a 40% de RAP;</li><li>• Camada de ligação ou camada de base, especificam teores de 10 a 40%;</li><li>• Quantidades maiores são possíveis, a depender das propriedades de cada um dos componentes (ligante e agregados).</li></ul>
Holanda	<p>A especificação possibilita a utilização de grandes quantidades de RAP em camadas de superfície. Porém, as misturas devem atender aos requisitos das misturas densas destinadas ao revestimento. A utilização de RAP não é permitida para SMA ou OGA.</p>
Reino Unido	<p>A especificação possibilita a utilização de até 10% de RAP em camadas asfálticas de superfície; as misturas devem, contudo, cumprir os requisitos de performance das misturas novas. É permitido o uso de 10% de RAP em misturas do tipo SMA.</p>
Portugal	<p>A especificação possibilita o uso de RAP em diferentes camadas. As percentagens são definidas segundo a camada em que serão aplicadas. Os seguintes requisitos são usados:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• O material contaminante deve ser avaliado, o qual deve ser inferior a 1% para a camada superficial e inferior a 5% para as demais camadas. A presença de madeira, plástico ou materiais sintéticos deve ser inferior a 0,1%;</li><li>• As propriedades do ligante do RAP devem ser avaliadas;</li><li>• A quantidade de RAP máxima admissível é definida de acordo com as propriedades e modificações do ligante do RAP, assim como o tipo de camada e a presença de material contaminante;</li><li>• A quantidade máxima de umidade deve ser de 5% e o tamanho máximo de RAP das partículas deve ser menor que 32 mm;</li><li>• Percentagens da adição de até 100% são permitidas no caso de misturas semi-mornas contendo RAP de alta qualidade (bitado e peneirado).</li></ul>

**Fonte:** Adaptado Gaspar, 2019

Na Austrália e no Japão os blending charts também são usados, entretanto adotando outros parâmetros para a caracterização. A norma australiana da Austroads AGPT-T193/15 utiliza a

viscosidade dos ligantes asfálticos, já os japoneses usam, além da penetração dos ligantes, os resultados do ensaio de resistência à tração em amostras de mistura asfáltica feitas em laboratório (WEST; COPELAND, 2015).

## 2.5 Fenômeno de interação entre o ligante do RAP e o ligante novo

De acordo com Gaspar *et al.* (2020) é fundamental compreender como o ligante asfáltico novo interage com o ligante envelhecido presente no RAP, pois com isso é possível obter uma melhor compreensão do comportamento das novas misturas asfálticas recicladas com grandes quantidades de RAP e conseqüentemente realizar uma dosagem mais adequada para essa mistura. De acordo com Ding *et al.* (2016) existem três possíveis situações para caracterizar a maneira como a interação acontece (Figura 6).

**Figura 6** - Situações possíveis para interação entre ligantes no processo de reciclagem



Fonte: Gaspar, 2019.

Uma das possibilidades é que os dois ligantes se misturem de maneira completa, indicando uma interação total, chamada também de *full blending*. Esse é o cenário onde é permitido a maior economia de ligante asfáltico novo, e por isso é comumente adotado na etapa de projeto da mistura asfáltica reciclada. Quando isso ocorre é adicionada na mistura asfáltica nova a diferença entre o teor de ligante total necessário e o teor de ligante já presente no RAP (SHIRODKAR *et al.*, 2011).

Outra situação que pode acontecer é completamente oposta ao primeiro cenário apresentado, ou seja, é suposto que o ligante existente no material fresado não interage de forma nenhuma com o novo ligante, e com isso, ele se apresenta como parte dos agregados. Nessa situação, o RAP é chamado de agregado negro, ou *black rock*, e a dosagem da mistura nova irá depender somente do ligante novo, sem sofrer nenhum efeito do ligante presente no RAP (MCDANIEL *et al.*, 2000). Ao adotar essa situação como verídica, é ignorada a possibilidade de que o ligante asfáltico do RAP seja mobilizado, ou ativado. Dessa maneira, além de perder a

chance de economizar no ligante asfáltico novo, parte do ligante existente no RAP pode ser ativado e acabar por provocar um excesso de ligante asfáltico na nova mistura reciclada. Soleymani *et al.* (2000) compararam misturas reais com estes dois cenários mostrados (*full blending e black rock*) e concluíram que este último é a situação mais distante da realidade.

Um terceiro cenário pressupõe que a mistura entre os ligantes acontece de maneira parcial (*partial blending*), e é o que melhor retrata o que ocorre na realidade de acordo com algumas pesquisas (SOLEYMANI *et al.*, 2000; HUANG *et al.*, 2005; BOWERS *et al.*, 2014a; DING *et al.*, 2016; YU *et al.*, 2018). Segundo o estudo desenvolvido por Soleymani *et al.* (2000) foi observado que 50% das misturas usadas na prática se apresentaram de maneira diferente das que indicaram os casos de *full blending e black rock*, sugerindo que a interação entre os ligantes acontece parcialmente. Essa situação fica ainda mais evidente quando a quantidade de material fresado é muito grande, não sendo possível garantir que 100% do ligante existente no RAP seja ativado e se misture com o ligante virgem. Essa suposição pode ser prejudicial no desempenho da mistura se, na hora da dosagem, for considerada a interação total dos ligantes. Wellner *et al.* (2015) sugeriram uma interação na ordem de 60% e 100% de ativação do ligante do material fresado para que se obtenha resultados satisfatórios de desempenho.

As situações citadas são resultantes da ação de dois mecanismos diferentes (LO PRESTI *et al.*, 2019; KASSER; MARTIN, 2019). O primeiro deles é a ativação do ligante existente no material fresado, ou seja, a diminuição da sua viscosidade de maneira que ele fique à disposição para interagir com o ligante novo adicionado. Caso não tenha ligante do RAP ativado, ou disponível, não terá interação entre os ligantes, levando ao cenário do *black rock*. Também é possível que, mesmo que todo o ligante do RAP seja ativado e se torne disponível, isso não garante que os dois ligantes irão interagir completamente e produzir um filme asfáltico homogêneo, já que essa interação depende de diversos fatores externos como tempo e temperatura de usinagem. Entretanto, quanto maior for a quantidade de ligante do material reciclado ativado, maior a chance de que ele se dissipe de maneira uniforme diante da presença do ligante virgem. Assim, os dois mecanismos dependem um do outro de uma maneira complexa, por isso não se deve estudá-los de forma completamente isolada (GASPAR *et al.*, 2020).

Lo Presti *et al.* (2019) apontam a importância da separação entre os dois mecanismos relacionados no fenômeno de interação – o grau de ativação ou *Degree of Binder Activity* (DoA) e o grau de interação ou *Degree of Blending* (DoB) – discernindo a quantidade de ligante disponível existente no RAP da eficácia de interação deste com o agente de reciclagem, e como ambos podem alterar a dosagem das misturas asfálticas recicladas.

Essas nomenclaturas são utilizadas no âmbito do RILEM, em que um grupo de pesquisadores do comitê técnico TC 264-RAP TG5 possuem o objetivo de compreender fundamentalmente a ativação do ligante do RAP e com isso ajudar no desenvolvimento de metodologias de dosagem para materiais com melhor desempenho em serviço e maior resiliência ao ciclo de vida (GASPAR, 2019).

Na prática, existem técnicas que podem ser usadas na investigação desse fenômeno de interação que acontece nas misturas asfálticas recicladas com uso de RAP. Xu *et al.* (2018) juntaram as metodologias de Microscopia de Força Atômica e extração por etapas de ligante com utilização de solvente e repararam que a interação ocorre de maneira parcial e não-homogênea entre os ligantes virgem e residual, onde os maiores níveis de interação aconteceram nas camadas de ligantes mais externas. A metodologia de extração por etapas é definida como a remoção parcial do ligante da mistura reciclada, por meio de dois ou mais estágios, e é um instrumento importante nas análises do fenômeno de blending (HUANG *et al.*, 2005; BOWERS *et al.*, 2014a; GASPAR *et al.*, 2017; GASPAR *et al.*, 2020).

Xu *et al.* (2018) também observaram a dependência significativa da temperatura de mistura no desempenho dessa interação. Outras pesquisas utilizaram técnicas de espectroscopia por energia dispersiva (do inglês, *Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy* ou EDS), espectroscopia ATR-FTIR e GPC, e todas indicaram: a não homogeneidade; a dificuldade em acessar a interação completa entre compostos e a influência da temperatura, na qual os materiais são condicionados e misturados (GAITAN, 2012; NAVARO *et al.*, 2012; RAD, 2013; RINALDINI *et al.*, 2014; BOWERS *et al.*, 2014a; BOWERS, 2015; YU *et al.*, 2017; SREERAM *et al.*, 2018; XU *et al.*, 2019). Mohajeri *et al.* (2014) salientam a relevância de análises mais pertinentes matemática e estaticamente, onde uma quantidade grande de ensaios seja levada em consideração para amostras e condições similares.

Outras pesquisas consideraram as propriedades reológicas dos ligantes para análise dessa interação. Bowers *et al.* (2014b) recomendaram uma abordagem usando propriedades reológicas e distribuições de peso molecular, obtidas por meios de testes com DSR e GPC, respectivamente, para estudar a influência do tempo e temperatura de mistura na capacidade da interação do ligante existente no RAP. De acordo com os autores, as mudanças no tempo possuem pouca ou até mesmo nenhuma influência da interação, no entanto, com o aumento da temperatura, o índice de interação (chamado em inglês de *blend ratio*) tende a aumentar, variando de 59%, na temperatura de 130°C, para 70% na temperatura de 180°C.

Gottumukkala *et al.* (2018) verificam a influência dos ensaios de penetração, ponto de amolecimento e do parâmetro reológico  $G^*/\text{sen}\delta$ , na estimativa do grau de interação e observaram

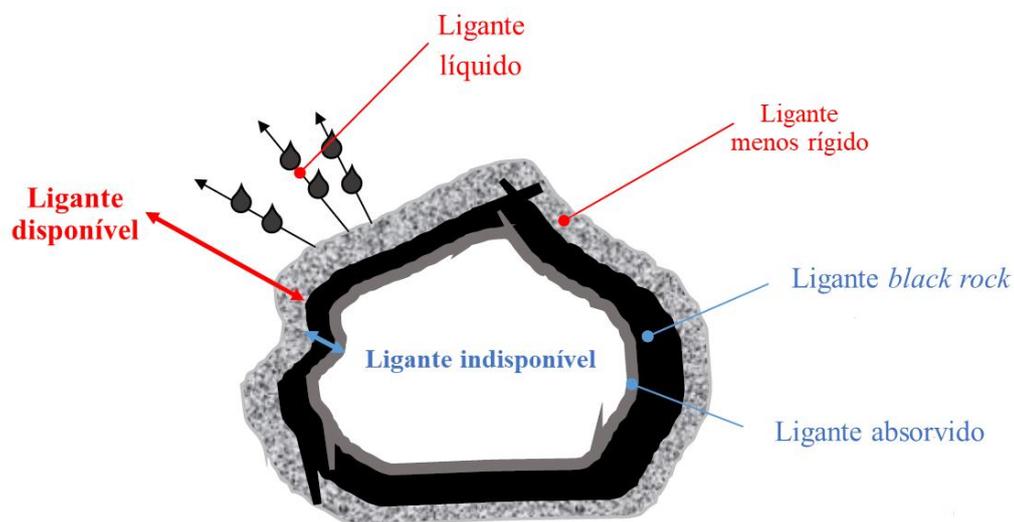
menores taxas de interação quanto maiores fossem a quantidade de RAP adicionada e a rigidez do AR.

Para melhor entendimento do fenômeno de interação, Lo Presti *et al.* (2019) dividem esse processo em dois cenários: apenas RAP e RAP + agente de reciclagem, pois segundo os autores, a presença do agente de reciclagem afeta diretamente o fenômeno de ativação e interação. No primeiro cenário, formado apenas pelo material fresado, o ligante envelhecido é apresentado em duas fases distintas: disponível e indisponível (Figura 7). Assim, o ligante disponível é igual ao ligante ativo e é definido como a quantidade mínima de ligante envelhecido, que em determinadas condições de temperatura de mistura (T) e tempo (t), pode ser considerada como disponível/ativo na produção de novas misturas asfálticas. Esse ligante ativo/disponível é formado por dois componentes (Equação 1):

$$L_{ativado}(\text{tipo de RAP}, t, T) = L_{líquido} + L_{menos\ rígido} \quad (\text{equação 1})$$

Onde  $L_{líquido}$  apresenta a porção do ligante do RAP líquido que se move de uma partícula para outra do RAP ou dos agregados virgens e  $L_{menos\ rígido}$  apresenta a camada de ligante envelhecido que não se move das partículas do RAP, mas se torna menos rígido e age como uma cola.

**Figura 7** - Exemplo dos ligantes que compõem o RAP



**Fonte:** Adaptado Lo Presti *et al.*, 2019.

Ainda segundo os autores, a quantidade de ligante presente no RAP, que não pode ser considerada disponível para a nova mistura asfáltica, é definida como o ligante indisponível/inativo (Figura 7). Essa quantidade é composta por dois componentes:

- ligante do RAP *black rock* – a quantidade de ligante envelhecido que se tornou tão rígido e quebradiço que é considerado parte do agregado do material fresado, não apresentando alteração no comportamento físico-químico e nas propriedades do RAP.
- ligante do RAP absorvido – a quantidade de ligante envelhecido que foi absorvida pelo agregado da mistura e não é considerada eficaz como filme asfáltico.

Portanto, dentro do cenário com apenas RAP, a quantidade total de ligante ( $L_{total}$ ) e ligante envelhecido disponível ( $L_{disponível}$ ) para uma nova mistura são dadas pelas Equações 2 e 3:

$$L_{total} = L_{ativado} + L_{inativado} = L_{líquido} + L_{menos\ rígido} + L_{black\ rock} + L_{absorvido} \quad (\text{equação 2})$$

$$L_{disponível}(\text{cenário apenas RAP}) = L_{ativado}(\text{tipo de RAP, } t, T) \quad (\text{equação 3})$$

Onde o  $L_{líquido}$  é a quantidade de ligante líquido presente no RAP,  $L_{menos\ rígido}$  é a quantidade de ligante menos rígido,  $L_{black\ rock}$  é a quantidade de ligante no RAP que se tornou uma rocha negra e  $L_{absorvido}$  é a quantidade de ligante que foi absorvida pelos agregados.

O segundo cenário é aquele que possui, além do RAP, o agente de reciclagem. Estes são definidos como o conjunto de aditivos que são adicionados dentro do processo de fabricação das novas misturas contendo o material reciclado (GASPAR *et al.*, 2020). Eles possuem dois objetivos, o primeiro é o rejuvenescimento da mistura a um nível desejado com a restauração das propriedades do ligante envelhecido; e o segundo objetivo é lubrificação, facilitando o processo de produção de mistura, permitindo temperaturas de fabricação mais baixas, portanto, uso de maior quantidade de RAP. Segundo Lo Presti *et al.* (2019) quando qualquer um desses agentes de reciclagem é adicionado à mistura, as quantidades de ligante disponíveis e indisponíveis podem variar por conta de outras atividades que são proporcionais à eficiência da combinação das condições de processamento e do agente de reciclagem, como segue:

- ligante ativado de curto prazo (STAb): a atividade de curto prazo acontece quando o agente de reciclagem entra em contato com o ligante envelhecido em condições de processamento fixas e resulta em uma redução do *black rock* e possivelmente do ligante absorvido.
- ligante ativado de longo prazo (LTAAb): a atividade de longa duração acontece devido a uma eventual difusão do agente de reciclagem no ligante do RAP ao longo do tempo. Isso pode resultar em uma redução ainda maior do ligante indisponível.

A ativação de uma determinada quantidade de ligante asfáltico do *black rock* e do ligante asfáltico absorvido devido ao efeito do agente de reciclagem, tempo e temperatura, faz com que o ligante ativado seja definido pela Equação 4:

$$L_{ativado}(agente\ de\ reciclagem, tipo\ de\ RAP, t, T) = L_{STAb} + L_{LTAb} \quad (\text{equação 4})$$

Analisando os dois cenários (apenas RAP e RAP + AR) ocorre uma grande mudança com o acréscimo do agente de reciclagem. Se este for eficaz na ativação de uma parte de ligante envelhecido indisponível, a parte do ligante disponível aumentará devido às ativações de curto e longo prazo (GASPAR, 2019). Portanto, o ligante do RAP inativo pode ser definido como a quantidade de ligante envelhecido que só pode ser parcialmente ativado pelo efeito combinado do tempo, da temperatura e de um agente de reciclagem. Além disso, a quantidade total de ligante nesse cenário ( $L_{total}$ ), como na Equação 5, aumentará exatamente pela quantidade de agente de reciclagem que irá contribuir para a formação do ligante ativado e possivelmente permanecerá na mistura como um componente residual ( $L_{AR\ residual}$ ). A Equação 6 apresenta a formulação da quantidade disponível de ligante, considerando as propriedades intrínsecas e o efeito do agente de reciclagem (LO PRESTI *et al.*, 2019).

$$L_{total} = L_{líquido} + L_{menos\ rígido} + L_{STAb} + L_{LTAb} + L_{black\ rock} + L_{absorvido} + L_{AR\ residual} \quad (\text{equação 5})$$

$$L_{disponível}(RAP + AR) = L_{ativado}(tipo\ de\ RAP, t, T) + L_{ativado}(AR, tipo\ de\ RAP, t, T) \quad (\text{equação 6})$$

Onde  $L_{STAb}$  é a quantidade de ligante do RAP ativado de curto prazo,  $L_{LTAb}$  é a quantidade de ligante ativado no longo prazo,  $L_{black\ rock}$  é a quantidade de ligante que se juntou ao agregado e formou uma rocha negra,  $L_{absorvido}$  é a quantidade de ligante absorvido e  $L_{AR\ residual}$  é a quantidade residual de um agente de reciclagem.

### 2.5.1 DoA

O processo da mistura é diretamente influenciado pelas condições de pré-processamento do material fresado: temperatura e tempo de mistura, teor de RAP, tipo de RAP e o agente de reciclagem aplicado. Na literatura, é comumente encontrado estudos onde o material fresado é misturado com um agente de reciclagem. Este é o cenário mais comum encontrado na prática, podendo até ser considerado o único até o momento, e com isso é necessária uma classificação adequada desse agente de reciclagem, visto que a quantidade de ligante disponível e/ou ativado presente no RAP pode variar independentemente da adição desses agentes de reciclagem (DING *et al.*, 2018).

Assim, para facilitar a caracterização e classificação do material fresado, bem como para realizar um processo de mistura mais completo, Lo Presti *et al.* (2019) acreditam que os conceitos de disponibilidade do ligante do material reciclado também deve estar ligado a uma propriedade intrínseca apenas do RAP introduzido. Dessa maneira, o grau de atividade do ligante (DoA) é definido como a quantidade mínima de ligante asfáltico ativo que um projetista pode considerar para o material fresado (COSTA *et al.*, 2023).

Esse parâmetro é tratado como uma propriedade intrínseca a cada material fresado que não está relacionado com a presença de agentes de reciclagem e sofre variação a depender do tipo de material fresado e de suas condições de processamento. A partir dele, é possível ter um indicativo de quanto o ligante asfáltico presente no material reciclado está, ou não, sendo ativado em função da temperatura e do tempo de mistura (LIU *et al.*, 2023). Em relação a ativação do ligante presente no material fresado, quanto maior for o grau de ativação do ligante, menor é a necessidade de adição do agente de reciclagem, já que o ligante envelhecido possui uma viscosidade elevada, em função da alta temperatura, e se torna mais suscetível ao processo de interação (LO PRESTI *et al.*, 2019).

O DoA ainda pode ser definido, com base nos dois cenários apresentados (somente RAP e RAP + AR), como a razão entre a quantidade mínima de ligante envelhecido que pode ser considerada ativa para a formulação das novas misturas asfálticas recicladas (ligante ativo) e o ligante envelhecido na sua totalidade (COSTA, 2022). Portanto como já mencionado, DoA é considerado uma propriedade intrínseca de cada material fresado e irá variar mudando o tipo de RAP e o processamento, independentemente da adição de agentes de reciclagem antes e/ou durante a fabricação das misturas asfálticas recicladas (GASPAR *et al.*, 2020).

Esse parâmetro tem como objetivo caracterizar a quantidade mínima de ligante envelhecido que pode ser considerada disponível nas novas misturas (LO PRESTI *et al.*, 2019). O DoA pode ser expresso da seguinte forma (Equação 7):

$$DoA = \frac{L_{ativado}(tipo\ de\ RAP,t,T)}{W_{total}} \times 100\% \quad (\text{equação 7})$$

Onde  $L_{ativado}$  é a quantidade de ligante ativo sem influência do agente de reciclagem e  $W_{total}$  é a quantidade total de ligante no RAP de acordo com os padrões de extração de ligante (ASTM 2172-17, 2017; EN-12697-1: 2012, 2012) A definição do DoA é considerada uma quantidade necessária para melhorar a classificação da família de materiais RAP no que diz respeito ao seu uso na produção de misturas asfálticas à quente e morna (CAVALLI *et al.*, 2017).

Pires (2018) desenvolveu um método laboratorial com objetivo de criar um procedimento simples para classificar diferentes RAPs de acordo com a facilidade ou dificuldade observada para ativar e mobilizar o ligante asfáltico oxidado presente neles, usando equipamentos de laboratórios convencionais. Além disso, o autor buscava eliminar a necessidade de extração e recuperação do ligante para caracterizar o RAP. A ideia era conseguir usar o procedimento para estimar a quantidade de ligante asfáltico do RAP que pode ser considerada ativa, de acordo com a temperatura ao qual ele é submetido durante a usinagem. Dessa forma, é possível eliminar/reduzir a influência de fatores como a umidade do RAP, o tempo de mistura e a aplicação de agentes rejuvenescedores, por exemplo.

O procedimento consistiu em submeter amostras 100% RAP ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral, moldadas com o material condicionado em diferentes temperaturas. Assim, o ganho de resistência do material com o aumento da temperatura fornece um indicativo da quantidade de ligante asfáltico que foi ativada. O autor calcula o DoA (%) de acordo com a Equação 8, onde ele relaciona o valor de RT (Resistência à Tração) obtido em cada temperatura do ensaio ( $RT_{X^{\circ}C}$ ) com o valor obtido para a temperatura máxima do ensaio ( $RT_{máx^{\circ}C}$ ).

$$DoA = 100 \times \frac{RT_{X^{\circ}C}}{RT_{máx^{\circ}C}} \quad (\text{equação 8})$$

No estudo de Pires (2018) ele considerou que a temperatura máxima era 170°C e que nela era possível alcançar uma ativação de 100% do ligante asfáltico presente no RAP, já que na análise dos resultados, essa temperatura foi a que alcançou o valor máximo de RT. Porém estudos como o de Gaspar (2019) e Pinheiro (2021) mostraram que nem sempre a máxima resistência é atingida na temperatura de 170°C, sendo então usado o valor máximo de RT obtido para toda a faixa de temperatura analisada.

### 2.5.2 DoAv

Quando se tem apenas o RAP disponível, sem o uso de algum agente de reciclagem, o ligante disponível é igual ao ligante ativo, portanto, não há necessidade de especificar qualquer outra quantidade. No entanto, quando um agente de reciclagem é adicionado, acredita-se que a quantidade de ligante disponibilizada para fins de projeto de mistura muda e a extensão da mudança depende das propriedades do ligante envelhecido e do agente de reciclagem, bem como de uma série de outros fatores que serão mencionados adiante (GASPAR *et al.*, 2020). Portanto, Lo Presti *et al.* (2019) sugerem que o ligante disponível seja formado pelo ligante ativo juntamente

com uma quantidade residual do agente de reciclagem. Consequentemente, o Grau de Disponibilidade do Ligante (DoAv) será provavelmente maior do que o DoA e sua estimativa pode ser prevista de acordo com a Equação 9:

$$DoAv = \frac{L_{disponível(RAP+AR)}}{W_{total}} \times 100\% \quad (\text{equação 9})$$

Assumir o DoA/DoAv de maneira correta para um RAP selecionado é fundamental para obter misturas asfálticas em conformidade com padrões de projeto específicos. Na verdade, as metodologias de projeto de mistura normalmente visam estimar o teor ideal de ligante de uma determinada mistura asfáltica, portanto, o risco é a dosagem possuir ligante insuficiente ou em excesso. Isso irá fornecer misturas asfálticas recicladas com alto teor de RAP e com desempenho inferior às misturas tracionais (COFFEY *et al.*, 2013) e, por sua vez, irá afetar o projeto e vida útil do pavimento (NORTON *et al.*, 2014; KASEER *et al.*, 2019). Também é importante considerar as diferenças dentro do projeto de misturas asfálticas que irão adicionar o RAP, uma vez que o ligante e o agente de reciclagem podem estar disponíveis em diferentes estágios e o envelhecimento do ligante pode ter um papel importante nesse quadro. Em seguida será destinado um tópico exclusivamente para o DoB que é o foco principal desta pesquisa.

## 2.6 Grau de mistura (DoB)

O DoB é um índice que permite determinar o quanto o ligante envelhecido existente no RAP contribui nas propriedades finais, físicas ou reológicas, da combinação entre ligante novo e reciclado da nova mistura asfáltica (LO PREST *et al.*, 2019). Enquanto o DoA refere-se a uma quantidade de ligante do RAP que pode ser considerada nas dosagens de misturas asfálticas recicladas, o DoB indica quão bem, em termos de propriedades de ligante e/ou mistura, o ligante presente no RAP interage com os demais materiais novos. No entanto, mesmo que o ligante existente no RAP possua uma ativação completa, sua interação pode não ser total, sem a formação de uma película de ligante asfáltico homogênea, a depender de fatores como tempo e temperatura de usinagem. Outras condições também podem influenciar o fenômeno de *blending*, como o tipo e teor de RAP e o agente de reciclagem adicionado à mistura, além de outros que serão abordados mais adiante (GASPAR *et al.*, 2020). Assim, esforços significativos de pesquisa têm sido direcionados a fim de quantificar ou qualificar o grau de mistura entre o RAP e os materiais virgens (ORESKOVIC *et al.*, 2020)

Apesar de ser conceitualmente definido, a formulação do DoB apresenta ainda certos obstáculos relacionados às diferentes hipóteses de interação (*black rock*, *partial blending* e *full*

*blending*) e à incerteza na seleção da propriedade do ligante ou da mistura. Alguns estudos (SHIRODKAR *et al.*, 2011; COFFEY *et al.*, 2013; NORTON *et al.*, 2014; STIMILLI *et al.*, 2015; DING *et al.*, 2018; VASSAUX *et al.*, 2019) chegaram a diferentes formulações que serão mais detalhes adiante. Dentre esses estudos, a utilização de medidas reológicas, mecânicas e químicas, a nível de ligante, foram as mais utilizadas para concepção do DoB (LO PRESTI *et al.*, 2019).

O conceito desse fenômeno de mistura já está difundido na comunidade científica, porém, os profissionais ainda não chegaram a um consenso sobre os termos relacionados ao fenômeno de mistura. Para Shirodkar *et al.* (2011) o grau de mistura apresenta a quantidade de ligante presente no RAP que estará disponível para a mistura com o ligante virgem. Segundo Coffey *et al.* (2013) o grau de mistura é a porcentagem de ligante existente no RAP que é efetivamente mobilizado dentro da mistura. De acordo com Norton *et al.* (2014) o grau de mistura é a quantidade de ligante residual ativo em uma mistura. Stimilli *et al.* (2015) denominam o grau de mistura de ligante reativado, e ele representa um ligante envelhecido parcialmente derretido que reveste a fração do RAP e interage com o ligante virgem, contribuindo para o desempenho geral da mistura asfáltica reciclada resultante. Ashtiani *et al.* (2018) denominam esse parâmetro de contribuição do ligante, indicando que ele descreve a quantidade de ligante no RAP que participa como ligante eficaz no projeto de misturas asfálticas recicladas.

Ding *et al.* (2018) identificam esse parâmetro como taxa de mobilização e definem como sendo a porcentagem de ligante existente no RAP que pode ser mobilizada durante o processo de mistura e disponibilizado para misturas com agente de reciclagem. Gottumukkala *et al.* (2018) intitulam o parâmetro como proporção de mistura e é definido como a proporção do peso do ligante presente no RAP misturado com o ligante virgem para o peso total do ligante na mistura asfáltica reciclada. Para Vassaux *et al.* (2019) essa mistura apresenta a capacidade de dois componentes criarem um produto homogêneo onde a composição química é idêntica em todos os lugares na escala de observação do estudo. Embora existam todas essas terminologias a mais utilizada é o grau de mistura (AL-QADI *et al.*, 2009; STEPHENS *et al.*, 2011; NAVARO *et al.*, 2012; MOGAWER *et al.*, 2012; COFFEY *et al.*, 2013; GAITAN *et al.*, 2013; SHIRODKAR *et al.*, 2013; BOOSHEHRIAN *et al.*, 2013; KRIZ *et al.*, 2014; RINALDINI *et al.*, 2014; LIPHARDT *et al.*, 2015; CASTORENA *et al.*, 2016; CAVALLI *et al.*, 2017; PARTL & POULIKAKOS, 2017).

Essas definições criam confusão e sobreposição que, em última análise, resultam em problemas de comunicação entre os profissionais, mas também destaca a falta de um consenso geral sobre os mecanismos teóricos relacionados aos fenômenos de mistura. Isso também se deve ao fato que o fenômeno que ocorre quando um RAP é aquecido e misturado a um agente de reciclagem é bastante complexo e diversos fatores influenciam nesse resultado.

### 2.6.1 Fatores que influenciam o grau de mistura (DoB)

O grau de mistura por ser um fenômeno muito complexo sofre influência de diversos fatores, onde alguns desses estão relacionados ao projeto e fabricação da mistura asfáltica reciclada. Entre esses fatores a temperatura de usinagem é um que afeta diretamente, pois se a temperatura de usinagem for alta o suficiente o ligante existente no RAP deve se tornar menos rígido, ou até mesmo fluído, tornando-o disponível para a mistura (CAMPHER, 2012; BOWERS *et al.*, 2014b; LO PRESTI *et al.*, 2015; ZHAO *et al.*, 2015; DING *et al.*, 2016; HE *et al.*, 2016; CAVALLI *et al.*, 2017).

De acordo com Kaseer *et al.* (2019) o tempo de condicionamento também interfere no DoB pois se ele for prolongado o suficiente, o processo de mistura pode resultar no aumento da mistura nova e do ligante presente no RAP.

Se o tempo de mistura se for prolongado, pode fazer com que as partículas de RAP comecem a interagir umas com as outras aumentando a quantidade de ligante envelhecido disponível (OLIVER, 2001; BOWERS *et al.*, 2014b; GAITAN *et al.*, 2013; NAHAR *et al.*, 2013; NAVARO *et al.*, 2012; RAD *et al.*, 2014; ZHANG *et al.*, 2015; ZHAO *et al.*, 2016).

Estudos (MCDANIEL *et al.*, 2000; OLIVER, 2001; BOOSHEHRIAN *et al.*, 2013; GOTTUMUKKALA *et al.*, 2018; HUANG *et al.*, 2014; KRIZ *et al.*, 2014; SHIRODKAR *et al.*, 2011; STIMILLI *et al.*, 2015; ZHANG *et al.*, 2015; ZHAO *et al.*, 2015) mostraram que se a quantidade de RAP for muito elevada, maior energia é necessária para ativar o ligante envelhecido presente nele.

Além disso, as características dos novos materiais vão influenciar no resultado da mistura asfáltica reciclada. A forma do agregado virgem é uma dessas características, pois para aqueles que possuem alta angularidade será mais fácil de liberar o ligante envelhecido das partículas do RAP em comparação com o agregado mais arredondado (ZHAO *et al.*, 2015). Os agregados com alta porosidade e conseqüentemente alta absorção irão absorver um agente de reciclagem, reduzindo a quantidade ativa desse material que é considerada durante a fase de projeto da mistura (AL-QADI *et al.*, 2009). A textura da superfície desses agregados virgens também influencia pois o agente de reciclagem pode preencher as partes convexas dos grãos antes que ocorra a mistura com o ligante envelhecido, reduzindo a quantidade projetada do agente de reciclagem (CAVALLI *et al.*, 2016). Além da influência dessas características dos agregados, caso exista uma quantidade elevada de partículas de fíler, elas irão absorver o agente de reciclagem antes de recobrir o RAP e começar o amolecimento do ligante envelhecido disponível (STIMILLI *et al.*, 2015).

As propriedades do ligante virgem também afetam, já que se este possuir uma menor viscosidade, conseguirá recobrir as partículas do RAP mais facilmente, facilitando a interação da

mistura (BOOSHEHRIAN *et al.*, 2013; HOFKO *et al.*, 2016). Ainda existe a influência do reaquecimento sucessivo do RAP que pode aumentar o processo de difusão melhorando o DoB.

Além da influência dos fatores relacionados com o projeto e produção das misturas novas nas propriedades do DoB, existem aqueles provenientes do próprio material fresado. O primeiro fator é a própria heterogeneidade desse material, visto que sua alta variabilidade pode contribuir para uma distribuição desigual de agregados e ligante envelhecido, gerando vários DoB dentro de uma única mistura asfáltica reciclada (NORTON *et al.*, 2014; CAVALLI *et al.*, 2016).

O tamanho das frações do RAP também estão ligados devido ao aumento da área de superfície específica com redução do tamanho das partículas, a quantidade de ligante envelhecido será maior, implicando com mais ligante disponível para a mistura (CASTORENA *et al.*, 2016). A textura da superfície e a não homogeneidade micro geométrica do agregado do RAP influencia pois se o agregado do material fresado não for geometricamente homogêneo, o ligante envelhecido ficará preso em partes convexas dos grãos e possivelmente não será capaz de ser liberado durante a fase da mistura (CAVALLI *et al.*, 2017).

As propriedades do ligante do RAP estão diretamente relacionados com o DoB pois com o aumento da rigidez do material fresado será mais difícil a interação da mistura (BOOSHEHRIAN *et al.*, 2013; NAHAR *et al.*, 2013; KASEER *et al.*, 2019). A espessura do filme do ligante do RAP por mais que seja mais espesso, haverá mais ligante que pode ser ativado e misturado durante a fase de mistura aumentando o DoB (LIPHARDT *et al.*, 2015; CAVALLI *et al.*, 2016)

Para He *et al.* (2016) o tempo e/ou temperatura de condicionamento do RAP por tempo prolongado, em altas temperaturas operatórias, parece ser benéfico para amolecer ligante envelhecido do material fresado. Segundo Zhang *et al.* (2015) o teor de umidade do RAP influencia uma vez que o tempo de mistura é limitado durante a fase de produção da mistura, o aquecimento do RAP com grande teor de umidade causará primeiramente a liberação de água, e não o amolecimento do ligante envelhecido.

Para realizar uma estimativa do DoB um modelo preditivo pode ser uma alternativa para estimar esse parâmetro. Como descrito nesse tópico, existe diversos fatores que influenciam o DoB e por isso, há uma dificuldade em prever e quantificá-lo. No item 2.6.2 fica em evidência essa dificuldade, pois são apresentados modelos que tentam quantificar esse parâmetro, com diferentes metodologias.

### **2.6.2 Estudos de modelos de previsão do DoB**

A presença de um agente de reciclagem não mudará o ligante ativo, mas provavelmente afetará o ligante disponível do RAP selecionado. A extensão deste efeito, por sua vez, irá afetar

de maneira significativa as propriedades convencionais/reológicas do ligante final e as propriedades mecânicas da mistura asfáltica reciclada. Portanto, o DoB pode ser um indicador que descreve em que medida o ligante presente no material fresado contribui para as propriedades finais da mistura asfáltica reciclada. Esta definição permite focar a atenção na eficácia da mistura analisando as propriedades finais da mistura reciclada e não na quantidade de ligante (LO PRESTI *et al.*, 2019).

A formulação do DoB é fundamental para adaptar o procedimento de projeto da mistura, porém como ainda não está definida e consolidada no meio científico as formulações existentes dificultam o processo da mistura e provocam alguns problemas, como a incerteza na seleção das propriedades do ligante/mistura e a hipótese de mistura total-parcial-nula.

As pesquisas de (HUANG *et al.*, 2005; SHIRODKAR *et al.*, 2011; BOWERS *et al.*, 2014b; YU *et al.*, 2017; YU *et al.*, 2018; PINHEIRO, 2019; GASPAR *et al.*, 2020) tentaram formular o DoB com abordagens diferentes e, geralmente, quatro abordagens principais são propostas para alcançar esse objetivo, que incluem abordagens mecânicas, químicas, mecanicistas e de visualização (ORESKOVIC *et al.*, 2020). A abordagem mecânica é geralmente a usada para identificar e/ou quantificar o grau de mistura por meio de testes mecânicos de misturas de ligantes e RAP sendo também possíveis usar testes reológicos no ligante asfáltico recuperado da mistura do RAP para estimar a eficiência da mistura (LIPHARDT *et al.*, 2015; ABED *et al.*, 2018)

A abordagem mecanicista geralmente usa resultados de testes de desempenho para estimar indiretamente o grau de mistura, imputando os dados em modelos de previsão (MOGAWER *et al.*, 2012; BOOSHEHRAN *et al.*, 2013). Essa abordagem foi proposta por Bonaquist (2007) como um método qualitativo para avaliar o grau de misturas com RAP comparando a curva mestra do módulo dinâmico medido em laboratório com a curva prevista de Hirsch Model analisando o ligante extraído e recuperado do corpo de prova testado.

A abordagem de visualização utiliza microscopia para entender as misturas observando diferentes pontos dentro da zona da mistura. Técnicas microscópicas capturam e analisam a micromorfologia da mistura que podem ser correlacionadas com as atuações das misturas com RAP (ABDALFATTAH *et al.*, 2021). A primeira observação direta da morfologia da mistura entre o RAP e o ligante virgem foi feita por Nahar *et al.* (2013). A microscopia de força atômica foi usada para investigar a mudança de propriedades microestruturais na área do ligante dentro da mistura. Este estudo concluiu que a análise por microscopia é uma ferramenta valiosa que pode ser usada para explorar esse grau de mistura e, além disso, identificar como as propriedades mecânicas e microestruturais dos ligantes asfálticos estão relacionadas.

Huang *et al.* (2005) fizeram uma mistura de RAP com agregados virgens com o objetivo de descobrir a extensão em que o ligante envelhecido das partículas do RAP se mistura com o agregado novo. Eles também tentaram determinar a viscosidade do RAP misturado com um ligante asfáltico novo realizando extrações em etapas, para isso essa mistura foi mergulhada em tricloroetileno em etapas e a solução foi recuperada. Os autores chegaram à conclusão que a viscosidade do ligante da mistura aumentava à medida que passava das camadas externas para internas.

Essas análises, que necessitam da extração do ligante, podem sofrer influência do solvente usado para a extração do ligante envelhecido e apresentarem resultados não confiáveis. Além disso, alguns deles forçam a mistura entre um agente de reciclagem e um ligante envelhecido, o que também pode interferir na confiabilidade dos resultados.

O estudo de Shirodkar *et al.* (2011) teve o objetivo de fornecer uma metodologia sobre como determinar o DoB com misturas de alto teor de RAP, para isso eles utilizaram misturas com 25% e 35% de material fresado. Eles utilizaram dois ligantes asfálticos novos (PG 70-28 e PG 58-28). Como ponto de partida, para obter uma estimativa mais realista do grau de mistura, foi realizada uma mistura dos agregados novos com o RAP sem a adição de ligante virgem para avaliar quanto do ligante do RAP mobilizou e revestiu os agregados virgens durante o processo de mistura sem um novo ligante. Para chegar à uma formulação (Equação 10) identificaram primeiro as propriedades da mistura na condição black rock.

$$\text{Grau de mistura} = \frac{|A(\text{virgem}_{agg})_{\text{ligante misturado}} - A(\text{RAP}_{agg})_{\text{ligante misturado}}|}{|A_{\text{ligante virgem}} - A_{\text{RAP black rock}}|} \quad (\text{equação 10})$$

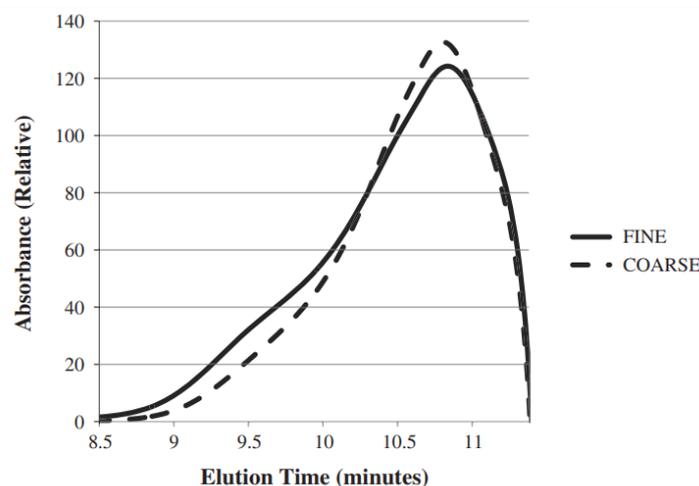
Onde  $A(\text{virgem}_{agg})_{\text{ligante misturado}}$  é igual a propriedade do ligante “A”, como  $G^*/\text{sen}\delta$  do ligante misturado revestindo os agregados virgens;  $A(\text{RAP}_{agg})_{\text{ligante misturado}}$  é igual a propriedade do ligante “A”, como  $G^*/\text{sen}\delta$  do ligante misturando revestindo os agregados do RAP;  $A_{\text{ligante virgem}}$  é a propriedade do ligante asfáltico virgem “A”, como  $G^*/\text{sen}\delta$ ;  $A_{\text{RAP black rock}}$  é propriedade do ligante “A”, como  $G^*/\text{sen}\delta$ , do RAP e do ligante virgem que estão revestindo o RAP, considerando o cenário *black rock*.

Para a determinação do grau de mistura, a pesquisa indicou que se houver uma mistura total, as propriedades do ligante em torno dos agregados virgens serão semelhantes aos do ligante em torno do RAP. Além disso, apesar de conseguirem encontrar o grau de mistura para as quantidades de RAP estudadas, eles concluíram que por esse parâmetro depender de muitos fatores (propriedade do ligante do RAP e do ligante virgem, granulometria, tempo de mistura, etc.) essa formulação não deve ser generalizada, sendo necessário analisar as propriedades mecânicas.

A pesquisa de Bowers *et al.* (2014b) teve o objetivo de investigar os efeitos da temperatura de usinagem, tempo de mistura e adição de aditivos para chegar a uma formulação do grau de mistura. Para ajudar a determinar o DoB foram analisadas as propriedades reológicas e moleculares da mistura asfáltica reciclada. Para isso foram feitas misturas asfálticas recicladas usando o RAP, ligante novo PG 64-22, agregados virgens e agente de reciclagem. Após a produção da mistura reciclada foi realizada a extração do ligante para geração das curvas mestras utilizando um DSR.

Os autores realizaram a Cromatografia de Permeação em Gel (GPC) e a distribuição do peso molecular do ligante asfáltico. Essa distribuição foi separada em três diferentes frações principais: Grande Tamanhos Moleculares (LMS), Tamanhos Moleculares Médios (MMS) e Pequenos Tamanhos Moleculares (SMS). Como nenhuma pesquisa até o momento encontrou correlação entre as propriedades do ligante asfáltico e o MMS e SMS, os autores utilizaram apenas o LMS que de acordo com Zhao *et al.* (2014) e Kim *et al.* (2006) possui correlação. Um exemplo de cromatograma é apresentado na Figura 8.

**Figura 8** - Cromatograma do ligante recuperado dos agregados graúdos X o ligante do RAP dos agregados finos



Fonte: Bowers *et al.*, 2014

Os ligantes dos agregados grossos e finos foram recuperados e, então, produzidas as curvas mestras. Os resultados mostraram que existem uma diferença significativa entre as curvas do ligante virgem e do ligante existente no RAP. Para a GPC os resultados indicaram que o ligante do RAP possui um LMS significativamente maior (cerca de 10%) que o ligante virgem. Os autores verificaram que se o LMS, para o ligante recuperado do agregado graúdo, que possui aumento no número de moléculas grandes presentes, é equivalente ao do ligante recuperado do agregado fino, que está diminuindo à medida que o ligante virgem interage com o ligante presente no RAP, então

uma mistura completa foi alcançada. Os autores propuseram uma formulação para esse grau de mistura (Equação 11).

$$\text{Grau de mistura} = \frac{LMS\%_{\text{agregado graúdo}}}{LMS\%_{\text{agregado fino}}} \quad (\text{equação 11})$$

O estudo de Kaseer *et al.* (2018) também chegou a uma formulação que obteve a equação 12 para o grau de mistura:

$$PGH_{\text{mistura}} = (RAP_{\text{teor ligante}} \times PGH_{RAP}) + (RAS_{\text{teor ligante}} \times PGH_{RAS}) + (B_{\text{teor ligante}} \times PGH_{\text{base}}) \quad (\text{equação 12})$$

Onde o  $PGH_{\text{mistura}}$  é a temperatura PG de alta do ligante misturado, resultante da mistura do ligante presente no RAP e o ligante envelhecido;  $RAP_{\text{proporção de ligante}}$  é a proporção de ligante do RAP;  $PGH_{RAP}$  é a temperatura PG de alta do ligante presente no RAP;  $RAS_{\text{teor de ligante}}$  é a razão RAS (se usado);  $PGH_{RAS}$  é a temperatura PG de alta de RAS (se for usado);  $B_{\text{teor de ligante}}$  é o teor de ligante virgem;  $PGH_{\text{base}}$  é a temperatura PG de alta do ligante novo. As pesquisas de Yu *et al.* (2017) e Yu *et al.* (2018) formularam uma equação para encontrar o DoB, apresentada na Equação 13.

$$\text{Grau de mistura} = \frac{\ln(R'_c) - \ln(R_v)}{\ln(R_p) - \ln(R_v)} \times 100\% \quad (\text{equação 13})$$

Onde  $R'_c$  indica parâmetros de propriedades específicas para um ligante de mistura graúda,  $R_v$  são os parâmetros de propriedades específicas para o ligante virgem e  $R_p$  são parâmetros de propriedade de ligante específicos para o ligante resultante da mistura entre o envelhecido e o novo. Abed *et al.* (2018) também chegaram à uma equação para o DoB, mostrada na Equação 14.

$$DoB\% = \frac{ITSM_{50\% RAP}}{ITSM_{\text{controle}}} \times 100\% \quad (\text{equação 14})$$

Onde o  $ITSM_{AC-50\% RAP}$  é o módulo de rigidez de misturas asfálticas recicladas com 50% de RAP e  $ITSM_{\text{controle}}$  é a rigidez de uma mistura de controle.

Outra pesquisa que tenta quantifica o DoB é a de Hettiarachchi *et al.* (2020) onde utilizaram o FTIR para investigar o efeito de fatores como o método de mistura, temperatura de usinagem, duração da mistura e teor de RAP sobre o grau de mistura. Primeiramente, os autores analisaram os picos de carbonila e sulfóxido para avaliar a interação, pois no ligante novo ambos os picos são de menores intensidades e no ligante envelhecido eles aumentam. Os picos dos ligantes asfálticos reciclados caem entre os picos dos ligantes novo e envelhecido. Dessa maneira, é possível calcular suas áreas para então alcançar os índices de carbonila e sulfóxido.

De acordo com os autores, com esses índices é possível mensurar o grau de mistura, pois os seus aumentos indicam que houve uma melhor interação entre os materiais envolvidos. Os resultados indicaram que o método de mistura, a temperatura de usinagem e a duração da mistura tem uma influência significativa no grau de mistura. Nesse caso, as durações de misturas prolongadas e temperaturas elevadas podem melhorar o grau de interação entre os materiais novos e envelhecidos. A quantidade de RAP na mistura tem pouca influência no grau de mistura.

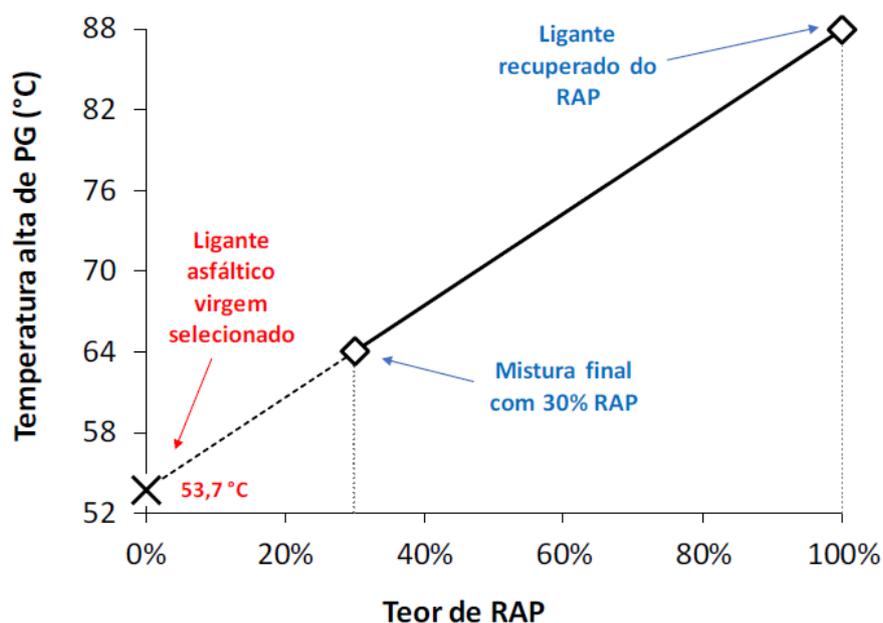
Os resultados das pesquisas supracitadas corroboraram que as abordagens usadas pelos estudiosos são diferentes e a maioria utiliza o ligante asfáltico para medir as propriedades reológicas. Devido a essa complexidade, a identificação de uma fórmula para descrever o DoB é importante. Para Lo Presti *et al.* (2019) essa formulação não deve se restringir apenas a testes com ligantes e incluir ensaios de mastiques e misturas. Além disso, para os autores é interessante que se considere a influência dos fatores que afetam o processo de mistura e consequentemente o DoB.

### **2.6.3 DoB em procedimentos de projeto de mistura**

Nos dias atuais, com a engenharia de pavimentação utilizando uma abordagem de projeto baseada na vida útil, considerar as propriedades finais da mistura asfáltica reciclada é de extrema importância. Como já mencionado, de acordo com a especificação AASTHO M323-17 (2017) se o teor de RAP estiver entre 15% e 25%, um ligante virgem mais fluido deve ser usado, enquanto que se mais de 25% de RAP for adicionado à mistura é recomendado o uso de tabelas encontradas na norma supracitada (SOLEYMANI *et al.*, 2000).

Por meio de gráficos de mistura é possível determinar o teor de RAP que deve satisfazer certas propriedades do ligante. A Figura 9 é um exemplo desse tipo de gráfico de mistura relacionando a quantidade de RAP com a temperatura PG alta. Vincular o DoB às propriedades finais da mistura asfáltica reciclada, é, portanto, fundamental. No entanto, ainda não está estabelecido quais propriedades de fato devem ser consideradas.

**Figura 9** - Gráfico de mistura indicando a temperatura crítica com base na alta temperatura do PG



Fonte: Adaptado Gaspar, 2019.

Outra observação importante para a formulação do DoB é que esta quantidade deve ser alinhada com o DoA/DoAv. Na verdade, as propriedades finais (mecânicas, químicas, físicas) de uma mistura podem ser previstas corretamente usando gráficos de mistura, apenas se estiverem relacionadas com a quantidade real de ligante ativo/disponível do RAP e, eventualmente, agente de reciclagem. Em apoio a isso, o estudo de Shirodkar *et al.* (2013) mostrou que os gráficos de combinação linear têm limitações quando altos teores de RAP são usadas (>25%). Os autores concluíram que os gráficos de misturas propostos por AASHTO M 323-17 pressupõem que as propriedades da mistura do ligante variam linearmente à medida que a percentagem de RAP aumenta, porém não é certo se esse será o caso devido à incerteza na quantidade de ligante ativo e fornecido pelo RAP.

Outros estudos (AL-QADI *et al.*, 2007; STEPHENS *et al.*, 2011; HAJI *et al.*, 2012) chegaram à conclusão semelhante de que os gráficos de mistura, que são baseados na suposição da mistura total, podem ser inválidos se o ligante novo e envelhecido não interagirem. Uma vez que o cenário de mistura total não significa necessariamente que toda a quantidade de ligante presente no RAP seja misturado com o agente de reciclagem.

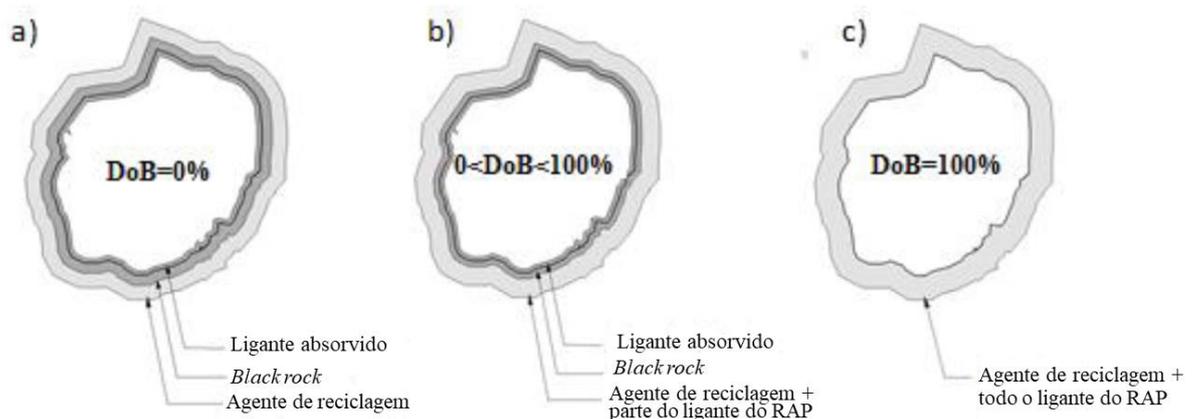
Jiménez *et al.* (2015) e Lo Presti *et al.* (2016) sugeriram modificar a metodologia da mistura considerando a incerteza do DoB com o objetivo de superar o problema supracitado. Os autores verificaram que os resultados permitem verificar se a qualidade dos agentes de reciclagem

selecionados é adequada para obter uma mistura final atingindo as propriedades desejadas levando em consideração o efeito do DoB.

Com base nessas evidências e considerando que as práticas atuais consideram principalmente a abordagem de mistura total, é importante redefinir o conceito de mistura total-parcial-nula, incluindo a ligação entre DoA, DoAv e DoB (LO PRESTI *et al.*, 2019):

- DoB = 0% ou mistura nula – é possível apenas quando o ligante presente no RAP não está ativo (DoA = DoAv = 0%), então não existe ligante envelhecido disponível para modificar as propriedades físicas/mecânicas da mistura (Figura 10a).
- $0% < \text{DoB} < 100%$  ou mistura parcial – apresenta o caso quando apenas uma determinada quantidade de ligante envelhecido é ativado dentro da mistura ( $0% < \text{DoA} < \text{DoAv} < 100%$ ), portanto, contribui apenas parcialmente para a mudança nas propriedades de mistura (Figura 10b).
- DoB = 100% ou mistura total – é um cenário ideal onde toda a quantidade de ligante ativo no RAP interage perfeitamente com os agentes de reciclagem, portanto as propriedades finais da mistura são proporcionais à quantidade de teor de ligante do RAP sobre a quantidade total de ligante na mistura. É importante ressaltar que um cenário de combinação completa também pode acontecer sem um cenário de disponibilidade total ( $0% < \text{DoA} < \text{DoAv} < 100%$ ) (Figura 10c).

**Figura 10** - Conceitos de combinação total-parcial-nula, incluindo o DoB, DoA e DoAv



Fonte: Adaptado Lo Presti *et al.*, 2019.

## 2.7 Técnicas para elaboração do modelo preditivo

Para desenvolver um modelo preditivo confiável é preciso identificar e quantificar fontes de erros que possam interferir nos resultados. A análise estatística desempenha esta função, ao estimar a incerteza associada ao resultado final das medições. A qualidade de um modelo preditivo

é geralmente determinada pelas propriedades estatísticas dos dados que ele produz (MENEZES, 2013).

De acordo com Barbetta *et al.* (2015) a estatística envolve métodos para coletar, organizar, descrever, analisar e interpretar dados provenientes de experimentos ou vindos de estudos observacionais. Paiva (2009) afirma que, na análise da geotecnia, a estatística descritiva permite uma visão ampla dos seus aspectos. Essa análise está baseada na obtenção da distribuição de frequência de dados, das medidas de tendência central e das medidas de dispersão.

Além da estatística descritiva para análise de dados, pode-se usar a estatística inferencial que possui o objetivo de fornecer informações sobre uma característica da população a partir de informações coletadas de uma amostra dessa mesma população (MORETTIN; BUSSAB, 2017). Para Norberto *et al.* (2020) a análise inferencial proporciona testes de hipóteses para concluir sobre causas e efeitos entre os parâmetros estudados. Fontelles (2012) ainda indica que, é o teste de hipóteses feito com uso de métodos estatística que permite a medida de precisão sobre a veracidade ou não da afirmação, visto que a inferência estatística sem uma medida de confiabilidade, é algo que não difere de uma simples adivinhação. Existem diferentes técnicas e neste item será abordada aquelas mais utilizadas em problemas de engenharia.

### **2.7.1 Análise em Componentes Principais (ACP)**

A Análise em Componentes Principais (ACP) é uma ferramenta estatística de análise multivariada que transforma linearmente um conjunto original de variáveis, inicialmente correlacionadas entre si, em um conjunto menor de variáveis não correlacionadas de mesma dimensão (componentes principais) que possuem a maioria das informações do conjunto original (HONGY; SANDANIELO; OLIVEIRA JÚNIOR, 2015).

A ACP tem o objetivo de redistribuir a variação observada nos eixos originais de maneira a alcançar um conjunto de eixos ortogonais não correlacionados, o que proporciona a produção de índices e agrupamento de indivíduos. Dessa forma, a concentração de indivíduos está relacionada segundo suas variâncias (comportamento dentro da população) (VARELLA, 2008). Para Paiva (2009) esse método ainda busca analisar as correlações entre as variáveis analisadas, verificar a importância de cada parâmetro de entrada e promover a eliminação daquele parâmetro que influencia pouco, em termos de variação no grupo de indivíduos estudadas e construir índices das variáveis analisadas. Lyra *et al.* (2010) afirmam que, a ideia dessa transformação é possibilitar que todas as variáveis possam exercer influências igualitárias nos resultados além de torna-las adimensionais.

### 2.7.2 Geoestatística

Esse método estatístico é definido com a análise de fenômenos que variam no espaço com o objetivo de construir um modelo matemático capaz de descrever quantitativamente variações espaciais de um fenômeno natural (LANDIM, 2006). Essa ferramenta possui o intuito de realizar a caracterização espacial de uma variável de interesse por meio do estudo de sua distribuição e variabilidade espacial, com determinação das incertezas relacionadas. A Geoestatística trata as variáveis como regionalizadas, ou seja, distribuídas no espaço para representar um fenômeno natural, que podem ser contínuas ou discretas (YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

O estudo desse método estatístico começa com a realização de uma amostragem de dados que possibilita inferir sobre as propriedades de uma população ou fenômeno espacial de interesse. Em seguida a amostragem, pode ser feito um delineamento experimental para análises laboratoriais, finalizando com a determinação do método adequado para prever o valor de uma variável em locais não amostrados (MALTAURO, 2018).

### 2.7.3 Regressão linear múltipla

A regressão linear múltipla pode ser considerada uma ferramenta poderosa para obter uma relação entre dados que estão sendo analisadas. Normalmente, é usada com objetivo de resolver problemas que envolve conjunto de variáveis dentre as quais existem alguma relação inerente. Dessa maneira, é conveniente que essa relação seja definida a partir de um método de predição, isto é, um procedimento para estimar o valor de uma dada informação de interesse, chamada de variável dependente, em detrimento de uma ou mais variáveis, chamadas de variáveis independentes (GIVEHCHI *et al.*, 2016). Tais modelos de predição são simplificações de processos ou fenômenos complexos ou desconhecidos, ou seja, a regressão múltipla pode ser usada no intuito de melhorar o modelo desenvolvido para explicar o comportamento das variáveis do banco de dados que estão sendo estudados (WALPOLE *et al.*, 2012).

Segundo Givehchi *et al.* (2016) a regressão linear múltipla é uma técnica multivariada cuja finalidade principal é obter uma relação matemática entre uma das variáveis estudadas (variável dependente ou resposta) e o restante das variáveis que descrevem o sistema (variáveis independentes ou explicativas), e reduzir um grande número de variáveis para poucas dimensões com o mínimo de perda de informação, permitindo a detecção dos principais padrões de similaridade, associação e correlação entre as variáveis. Sua principal aplicação, após encontrar a relação matemática, é produzir valores para a variável dependente quando se têm as variáveis independentes (cálculo de valores preditos). Ou seja, ela pode ser usada na predição de resultados, por meio da regra estatística dos mínimos quadrados.

Neste tipo de análise, a variável determinada é aquela que tenha correlação significativa com a variável prevista. A variável está no centro das análises e deve ser identificado o seu impacto coletivo, assim como a contribuição de cada variável separada para o efeito geral da variável preditora (REIS, 2018). Logo, o objetivo principal desse método é estabelecer uma equação linear que possa ser utilizada para prever valores de  $y_i$  (variável dependente), a partir das variáveis independentes  $x_i$ , sendo  $i$  o coeficiente para o  $i$ -ésimo termo de um conjunto de  $n$  dados. De acordo com Montgomery *et al.* (2012) o modelo de regressão linear múltipla com  $k$  variáveis de regressão pode ser representado pela Equação 15 para  $i = 1, 2, \dots, n$ .

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i,1} + \beta_2 x_{i,2} + \dots + \beta_j x_{i,j} + \varepsilon_i \quad (\text{equação 15})$$

Onde  $\beta_0$  representa a constante de regressão,  $x_{i,j}$  representa o valor da  $i$ -ésima observação da  $j$ -ésima variável independente, de um total de  $n$  dados com  $k$  variáveis independentes,  $\beta_j$  representa o valor do coeficiente de regressão associada à  $j$ -ésima variável independente,  $y_i$  representa o valor da variável dependente analisada na  $i$ -ésima observação, e  $\varepsilon_i$  um valor aleatório (ou resíduo) do erro associado a equação no  $i$ -ésimo exemplo.

A estimação dos coeficientes  $\beta_j$  é a etapa principal da regressão linear múltipla, pois com esses coeficientes é possível estimar qualquer novo valor de saída a partir de qualquer novo exemplo de entrada. A solução mais comum tem como base o método dos mínimos quadrados, onde busca-se uma forma de minimizar a soma dos quadrados das diferenças entre os valores estimados e os valores reais – essa diferença também pode ser chamada de resíduo (MONTGOERY *et al.*, 2012). A equação 16 mostra o resultado do método no formato matricial.

$$\beta = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (\text{equação 16})$$

Onde as matrizes  $\beta$ ,  $X$  e  $Y$  são definidas, respectivamente pelas Equações 17, 18 e 19.

$$\beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_j \end{bmatrix} \quad (\text{equação 17})$$

$$X = \begin{bmatrix} 1 & x_{1,1} & x_{1,2} & \dots & x_{1,j} \\ 1 & x_{2,1} & x_{2,2} & \dots & x_{2,j} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_{n,1} & x_{n,2} & \dots & x_{n,j} \end{bmatrix} \quad (\text{equação 18})$$

$$Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} \quad (\text{equação 19})$$

### **2.7.3.1 Avaliação dos modelos de regressão**

Dentre os avaliadores estatísticos é possível descrever inicialmente a obtenção do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) que indica o grau de associação entre duas variáveis quantitativas, ou seja, o quanto a variável dependente pode ser explicada pelo modelo de regressão analisado. O  $R^2$  varia de 0 a 1 (ou 0% a 100%), dessa maneira, quanto maior o valor do coeficiente, melhor será o ajuste do modelo aos dados. Porém, é necessário de outros parâmetros para melhor analisar o modelo.

Para a Silva (2016) também é fundamental a análise de variância (ANOVA) que consiste em um método adequado para verificação da significância do modelo. Nessa análise, são agrupadas informações em uma tabela, como a soma dos quadrados dos resíduos (SQR), graus de liberdade (g.l), o quadrado médio (Qméd) e o Teste-F (estatística de Fisher). Na SQR quanto menor for o valor encontrado entre os modelos indica que determinado modelo se ajusta melhor aos dados observados.

Para verificar se um modelo é adequado Morettin e Bussab (2017) afirmam que, é preciso também investigar o comportamento do modelo por meio da análise dos resíduos, utilizando um conjunto de dados observados em conjuntos com os valores ajustados por este, por meio de representações gráficas ou de testes. A análise de resíduos passa pela obtenção dos resíduos brutos e resíduos padronizados. As representações gráficas dos resíduos podem ser nos seguintes formatos: ideal (nulo), não linear, elemento atípico, heterocedasticidade e de não normalidade.

O diagnóstico de normalidade dos resíduos, segundo Rodrigues (2012), pode ser realizado por meio de métodos gráficos ou de testes específicos. Os processos gráficos podem ser obtidos pelo gráfico P-P plot dos resíduos (distribuição de probabilidades) e histograma dos resíduos padronizados (forma simétrica e unimodal da distribuição normal). Entre os testes aplicados para análise de resíduos, pode ser citado o teste de Kolmogorov-Smirnov e o teste de Shapiro-Wilk. Araújo Neto (2016), ainda sugere a utilização de dois outros diagnósticos para análise dos resíduos, são eles, o teste de homoscedasticidade, onde os erros devem ter variância constante; e o de independência, onde se realiza o teste de Durbin-Watson para verificar a presença de autocorrelação (dependência) entre os resíduos.

## **2.8 Considerações finais**

A análise das pesquisas permitiu perceber que existem avanços na engenharia da pavimentação, com o desenvolvimento de novos materiais e novas técnicas para melhorar a qualidade dos pavimentos. Nesse cenário ocorreram avanços também no uso de materiais fresados

para reciclar misturas asfálticas. Esses materiais são resultados da fresagem de pavimentos que ao decorrer da sua vida útil sofreram desgastes e precisaram ser retirados.

Entretanto, nesse capítulo ficou evidente que esse processo é complexo, e isso ocorre principalmente pelo reduzido conhecimento a respeito da interação entre os materiais novos e o RAP, sobretudo os ligantes novo e envelhecido. Essa análise é fundamental, por exemplo, na dosagem das misturas recicladas visto que pode ocorrer de novas misturas serem produzidas com quantidades insuficientes ou em excesso de ligante asfáltico, prejudicando o seu desempenho final e, conseqüentemente, o surgimento precoce de defeitos no pavimento.

Para a compreensão dessa interação existem alguns parâmetros importantes, e.g. DoA e DoAv que estão relacionados com a quantidade e disponibilidade de ligante envelhecido que pode ser ativado no processo de reciclagem, e também existe o DoB que está relacionado com o grau de mistura desses materiais na nova mistura. A revisão da literatura evidenciou a escassez de estudos que analisem o DoB e isso acontece, em grande parte, pelos diversos fatores que influenciam esse grau de mistura dos materiais novos e envelhecido, tornando-o complexo.

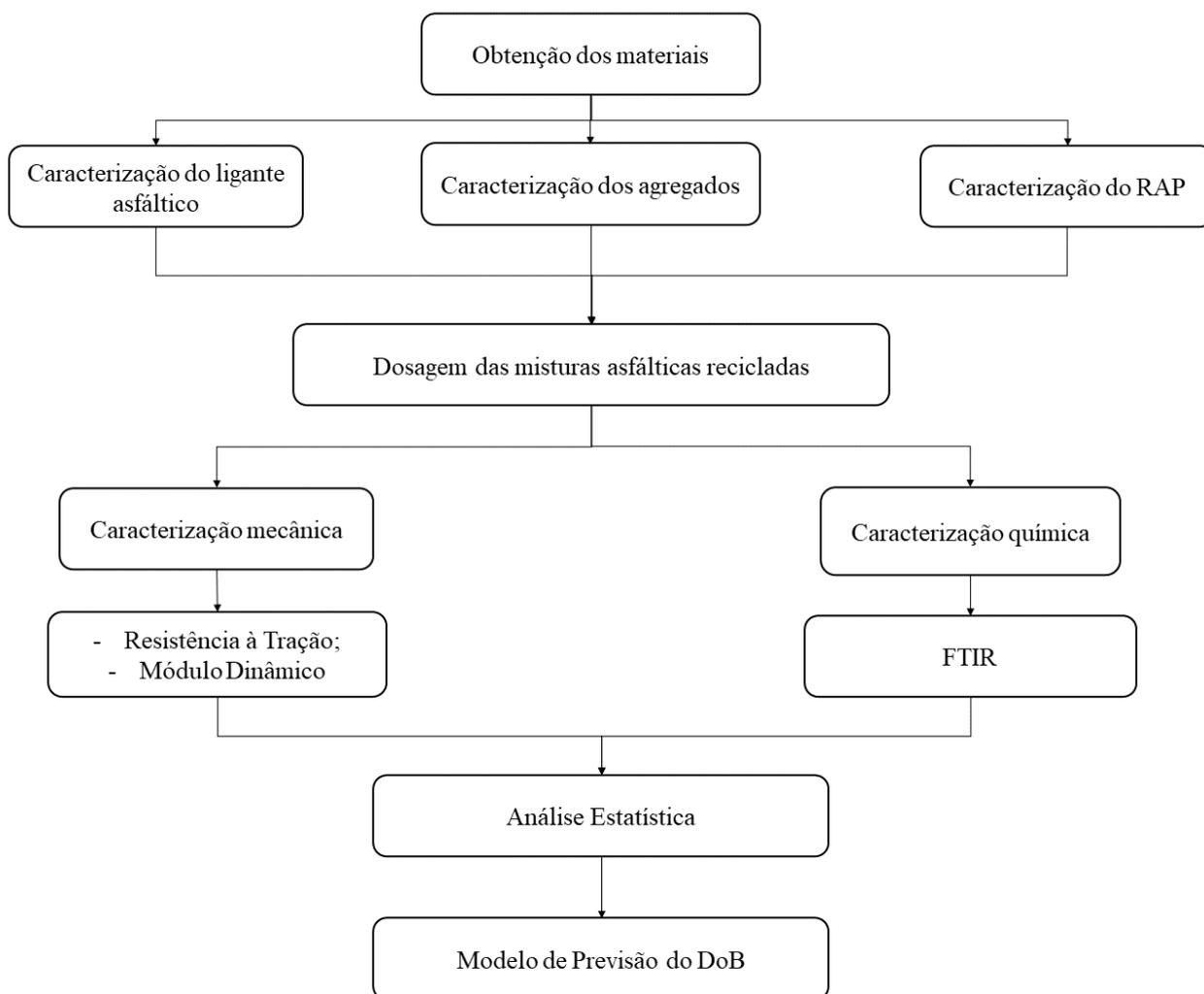
Como ainda não existe um consenso na comunidade científica a respeito do DoB, também não há um consenso em como prevê-lo e quantificá-lo. Na revisão foi mostrado alguns estudos que alcançaram uma formulação para esse parâmetro, porém eles não convergem entre si, ou seja, cada um seguiu um caminho diferente para estabelecer um modelo desse parâmetro.

Dessa maneira, este estudo espera determinar um modelo possível de prever o grau de mistura entre os materiais novos e fresados das novas misturas asfálticas recicladas por meio de um ensaio mecânico permitindo assim um melhor entendimento do processo e conseqüentemente o uso de quantidades cada vez maiores de RAP.

### 3 MATERIAS E MÉTODOS

O programa experimental desta pesquisa consistiu na determinação de um modelo preditivo capaz de prever a interação dos ligantes por meio do ensaio de Módulo Dinâmico e FTIR, utilizando amostras com diferentes tipos e teores de RAP e variação da temperatura de usinagem. Na Figura 11 é apresentado um fluxograma geral da metodologia utilizada na pesquisa.

**Figura 11** - Fluxograma geral da metodologia da pesquisa



**Fonte:** Autor próprio (2023)

Foram verificadas as propriedades mecânicas das misturas asfálticas recicladas nessas diferentes condições, além disso também foram realizados testes físicos e reológicos com o ligante asfáltico extraído das misturas asfálticas recicladas. Os corpos de provas foram moldados seguindo os critérios do método SUPERPAVE.

### 3.1 Materiais

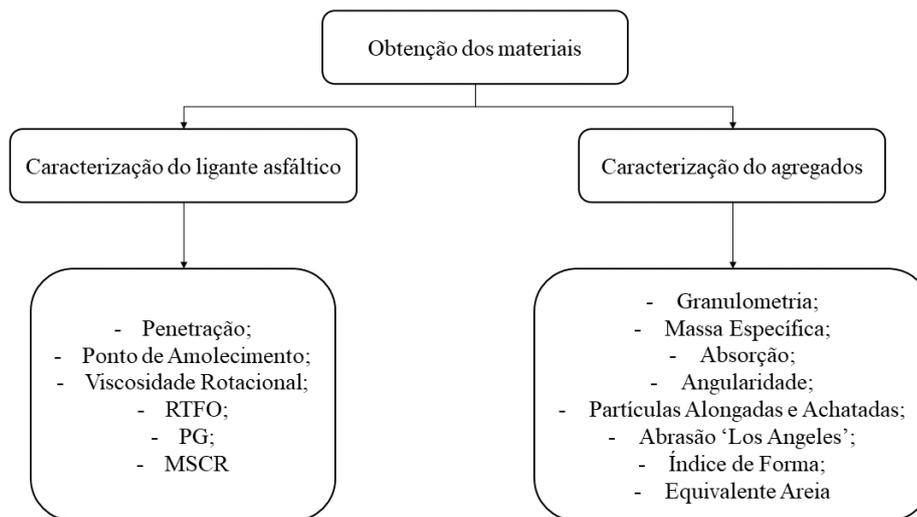
Os ensaios, dosagem e moldagem dos corpos de prova foram realizados no Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP), na Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

O ligante asfáltico utilizado nesta pesquisa foi o ligante convencional (CAP 50/70), oriundo de doação da Construtora Rocha Cavalcante localizada na cidade de Campina Grande, Paraíba. Os agregados usados nessa pesquisa foram: Brita 19, Brita 12,5” e Pó de Pedra, adquiridos junto à Britatec Indústria e Comércio de Britas localizada na cidade de Campina Grande, Paraíba, e Areia adquirida junto ao comércio local. Foram usados quatro tipos de RAP provenientes de locais diferentes da BR- 230 e com idades distintas, onde dois foram doados pela empresa JBR Engenharia LTDA, um pela empresa Concremat Engenharia e Tecnologia e um pela empresa Tecvia.

#### 3.1.1 Agregados e Ligante asfáltico

Para a caracterização dos agregados e do ligante asfáltico foram realizados os ensaios apresentados no fluxograma da Figura 12.

**Figura 12** - Fluxograma de caracterização dos materiais virgens: agregados e ligante asfáltico



**Fonte:** Autor próprio (2023)

##### 3.1.1.1 Ligante asfáltico

Nesta pesquisa foi utilizado o ligante asfáltico convencional (CAP 50/70) adquirido junto à Construtora Rocha Cavalcante na cidade de Campina Grande, Paraíba. O resultado da caracterização física e reológica do ligante asfáltico está apresentada na Tabela 1.

**Tabela 1** - Caracterização física e reológica do ligante asfáltico usado na pesquisa

ENSAIO		NORMA	LIMITE	RESULTADO
Penetração (0,1 mm)		ABNT NBR 6576	50 a 70	50
Penetração retida (%)			Mín, 55	65,3
Ponto de amolecimento (°C)		ABNT NBR 6560	Mín, 43	49
Variação do ponto de amolecimento (°C)			+8	+5
Índice de Susceptibilidade Térmica		DNIT-ME 095/2006	-1,5 a +0,7	-1,5
Viscosidade rotacional (cP)	135°C	ABNT NBR 15184	Mín, 274	422,5
	150°C		Mín, 112	205,0
	177°C		57 a 285	76,5
RTFO - Perda de massa (%)		ASTM D 2872	0,5	0,042
Performance Grade (°C)		AASTHO M 320	-	64
MSCR	R <sub>0,1</sub> (%)	AASHTO TP 70	-	1,95
	R <sub>3,2</sub> (%)		-	0,52
	Jnr <sub>0,1</sub> (kPa <sup>-1</sup> )		-	2,1
	Jnr <sub>3,2</sub> (kPa <sup>-1</sup> )		-	2,6
	Jnr <sub>diff</sub> (%)		-	6,48

**Fonte:** Autor próprio (2023)

Os resultados encontrados na caracterização dos ligantes apontam qualidade satisfatória do ligante asfáltico e estão dentro dos exigidos pelas normas supracitadas e pela Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), de acordo com a Resolução n° 19/2005.

### 3.1.1.2 Agregados

Os agregados usados nesta pesquisa (Brita 19”, Brita 12,5” e Pó de Pedra) são do tipo granítico e foram adquiridos juntamente com a Britatec Indústria e Comércio de Britas na cidade de Campina Grande, Paraíba. Além disso, também foi utilizada Areia adquirida no comércio local. A caracterização dos agregados graúdos está apresentada na Tabela 2.

**Tabela 2** - Caracterização dos agregados graúdos utilizados na pesquisa

ENSAIO	NORMA	LIMITE	AMOSTRA	
			Brita 19”	Brita 12,5”
Determinação do índice de forma	DNIT – ME 086/94	Mín, 0,5	0,89	0,70
Massa específica real (g/cm <sup>3</sup> )	DNIT – ME 081/98	-	2,668	2,665
Massa específica aparente (g/cm <sup>3</sup> )		-	2,636	2,616
Absorção (%)		-	0,460	0,706
Abrasão “Los Angeles” (%)	DNIT – ME 035/98	Máx, 50	25,74	22,15
Partícula alongada e achatada (%)	ASTM D 4791	Máx, 10	6,52	7,14
Adesividade ao ligante asfáltico	DNIT-ME 078/94	-	Insatisfatória	Insatisfatória

Fonte: Autor próprio (2023)

Os resultados encontrados foram satisfatórios atendendo aos critérios usados pela metodologia Superpave, assim como os parâmetros do DNIT. A adesividade entre as britas e o ligante asfáltico não foi satisfatória, portanto, é preciso o melhoramento do ligante asfáltico por meio da adição de dope. No entanto, nesta pesquisa optou-se por não realizar essa adição, já que a adição do dope pode influenciar a viscosidade do ligante. Os resultados da caracterização dos agregados miúdos são mostrados na Tabela 3.

**Tabela 3** - Caracterização dos agregados miúdos utilizados na pesquisa

ENSAIO	NORMA	LIMITE	AMOSTRA	
			Pó de Pedra	Areia
Massa específica real (g/cm <sup>3</sup> )	DNIT – ME 084/95	-	2,513	2,626
Massa específica aparente (g/cm <sup>3</sup> )		-	2,475	2,481
Absorção (%)		-	0,60	0,24
Equivalente areia (%)	DNIT – ME 054/97	Mín, 55	65	61
Angularidade de agregado miúdo (%)	AASHTO T 304	Mín, 40	42,15	45,62

Fonte: Autor próprio (2023)

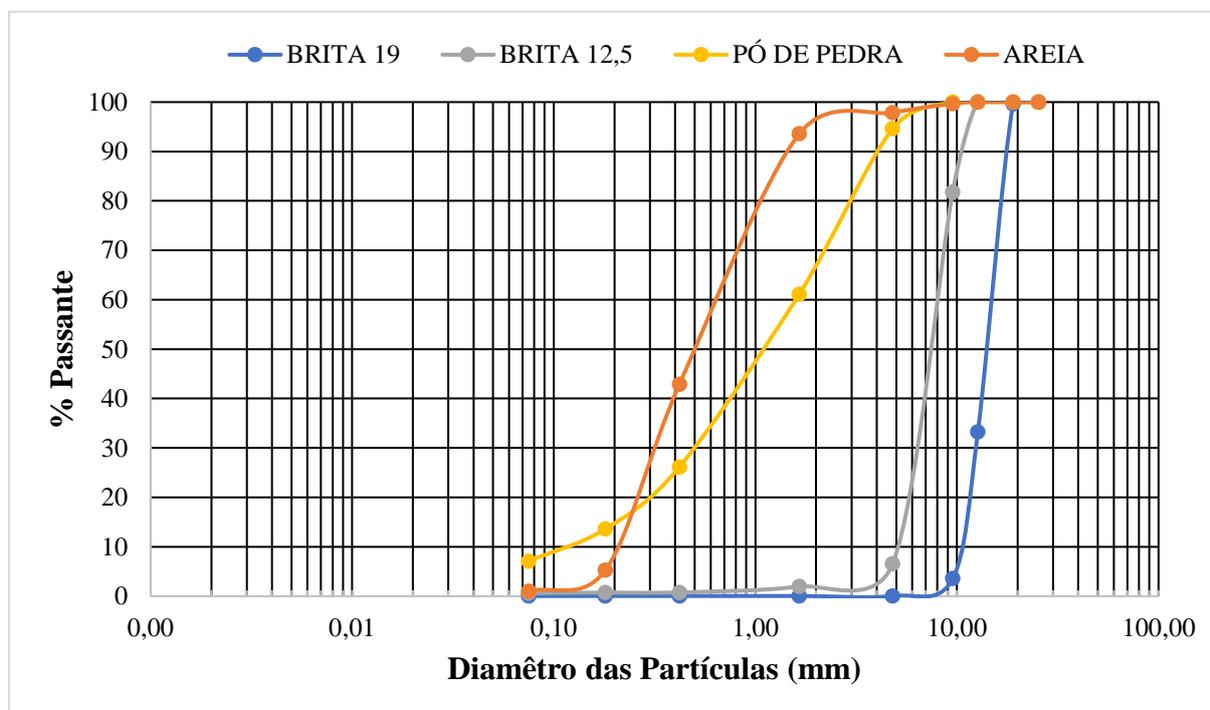
Os agregados miúdos atenderam aos critérios técnicos exigidos por suas respectivas normas e metodologia Superpave. Para a determinação da granulometria de todos os agregados usados na pesquisa foi usada a norma DNIT-ME 412/2019. A Tabela 4 mostra os resultados das análises granulométricas e a Figura 13 apresenta as curvas granulométricas.

**Tabela 4 - Análise granulométrica dos agregados**

PENEIRA		PERCENTAGEM PASSANTE EM MASSA (%)			
Nº	Mm	Brita 19"	Brita 12,5"	Pó de Pedra	Areia
1 1/2"	38,1	100	100	100	100
1"	25,4	100	100	100	100
3/4"	19,1	99,60	100	100	100
1/2"	12,7	33,23	100	100	100
3/8"	9,5	3,57	81,76	100	99,65
Nº 4	4,8	0,04	6,56	94,60	97,85
Nº 10	1,65	0,04	1,97	61,09	93,57
Nº 40	0,42	0,04	0,77	26,16	42,87
Nº 80	0,18	0,03	0,73	13,58	5,24
Nº200	0,08	0,03	0,61	7,10	0,99

Fonte: Autor próprio (2023)

**Figura 13 - Distribuição granulométrica dos agregados**



Fonte: Autor próprio (2023)

### 3.1.2 RAP

Na presente pesquisa foram utilizados 4 RAP oriundos de diferentes localidades da BR 230 e com diferentes idades, todos provenientes de revestimentos asfálticos que se encontravam deteriorados e passaram por manutenção, adquiridos por meio de doação. A nomenclatura atribuída a cada um deles é apresentada na Tabela 5, assim como a rodovia de origem e a empresa fornecedora de cada um deles.

**Tabela 5** - Dados dos RAPs usados na pesquisa

<b>NOMENCLATURA</b>	<b>ORIGEM</b>	<b>EMPRESA</b>
RAP 01	BR 230/PB, Km 420	Tecvia
RAP 02	BR 230/PB, Unidade em Santa Rita/PB	JBR
RAP 03	BR 230/ PB, Km 15	JBR
RAP 04	BR 230/PB, Km 37	Concremat

**Fonte:** Autor próprio (2023)

Não foi possível obter informações detalhadas sobre as misturas asfálticas que originaram todos estes RAPs. O RAP 01 foi obtido de uma obra de recapeamento realiza no km 420 da BR 230 que se situa em torno da cidade de Sousa – PB, no sertão paraibano, as únicas informações adquiridas com a empresa é de que esse material foi oriundo da fresagem de 7 cm e que o projeto foi do tipo CBUq para tráfego pesado. O RAP 02 (Figura 14) foi gerado por operações de fresagem do quilômetro 42 da BR 230 e sua espessura de fresagem foi de 5 cm. O projeto do trecho em questão tinha um período de 10 anos, para um mínimo de operações do eixo padrão de  $9,37 \times 10^7$  com revestimento do tipo CBUq.

**Figura 14** - Pilha da qual foi coletada as amostras do RAP 02

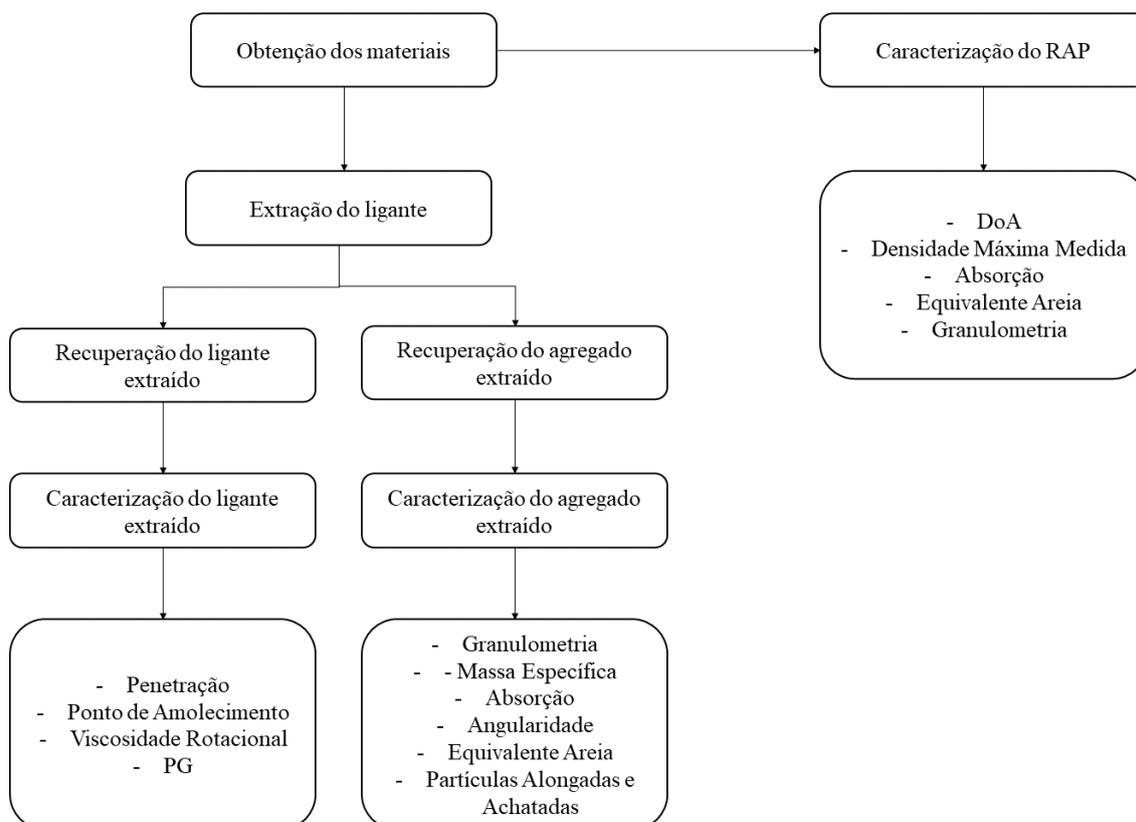


**Fonte:** Autor próprio (2023)

As informações fornecidas pelo DNIT para o RAP 03 indicam que o material é uma composição de mistura asfáltica usinada à quente (MAUQ) e microrrevestimento com ligante modificado com polímero. Este se encontrava acondicionado na Unidade Local do DNIT, localizado no município de Santa Rita/PB, em pilhas expostas às ações do clima. O RAP 04 de acordo com a Concremat trata-se de uma mistura de concreto betuminoso usinado à quente, onde o pavimento original possuía uma espessura de 12 cm. O material coletado foi proveniente dos primeiros 7 cm do revestimento correspondente a capa e os outros 5 cm eram formados pela camada de binder.

As amostras coletadas foram levadas ao laboratório, onde foram homogêneas e reduzidas por quarteamento a amostras menores para caracterização, de acordo com o procedimento DNIT-PRO 199/96. Foi realizada a caracterização dos RAPs, seguindo o fluxograma mostrado na Figura 15. Vale destacar que visto a heterogeneidade dos materiais fresados para cada ensaio realizado foram ensaiadas três amostras para poder obter uma média dos resultados.

**Figura 15** - Fluxograma de caracterização do RAP



**Fonte:** Autor próprio (2023)

Na Tabela 6 são apresentadas a caracterização física dos RAP 01, 02, 03 e 04.

**Tabela 6** - Caracterização dos RAPs

ENSAIO	NORMA	LIMITE	RESULTADO			
			RAP 01	RAP 02	RAP 03	RAP 04
Densidade Máxima Medida (g/cm <sup>3</sup> )	ASTM D 2041	-	2,373	2,465	2,341	2,401
Absorção (%)		-	0,48	0,50	0,42	0,38
Equivalente Areia (%)	DNIT-ME 054/97	Mín, 55	70,42	86,59	69,95	75,24

**Fonte:** Autor próprio (2023)

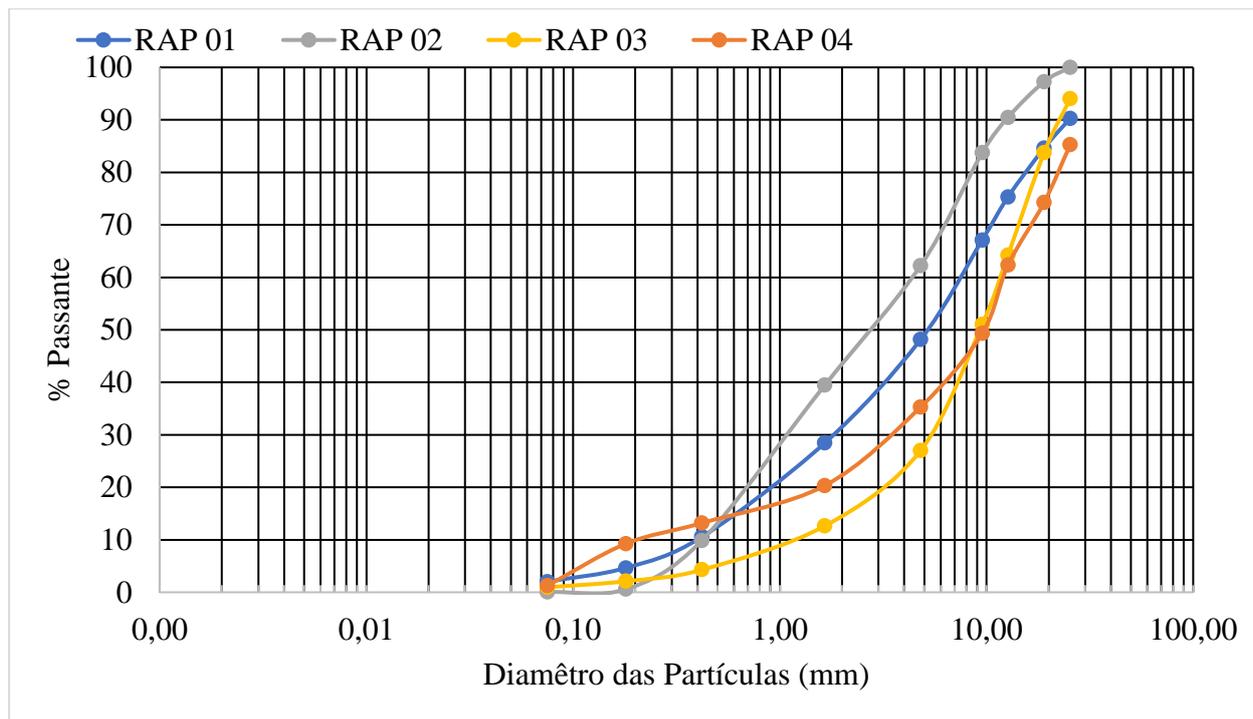
Embora não haja limites em norma para o material fresado, este atende aos parâmetros normativos para os agregados convencionais. No entanto, é preciso observar que o resultado de equivalente areia indica um aumento das partículas finas. Este acréscimo pode ser compreendido pelas condições de armazenamento dos RAPs antes da coleta, assim como da própria condição de realização da fresagem e da presença de resíduos contaminantes no pavimento. A Tabela 7 mostra o resultado da análise granulométrica antes da extração do ligante realizada segundo a norma do DNIT-ME 412/2019 e a Figura 16 apresenta as curvas granulométricas.

**Tabela 7** - Análise granulométricas dos RAPs antes da extração

PENEIRA		PERCENTAGEM PASSANTE EM MASSA (%)			
Nº	Mm	RAP 01	RAP 02	RAP 03	RAP 04
1 1/2"	38,1	100,00	100,00	100,00	100,00
1"	25,4	90,29	100,00	94,02	85,26
3/4"	19,1	84,63	97,27	83,75	74,26
1/2"	12,7	75,31	90,47	64,21	62,32
3/8"	9,5	67,08	83,73	51,01	49,30
Nº 4	4,8	48,15	62,24	27,00	35,28
Nº 10	1,65	28,44	39,45	12,63	20,32
Nº 40	0,42	10,56	9,86	4,29	13,20
Nº 80	0,18	4,65	0,58	2,11	9,25
Nº200	0,08	2,01	0,06	0,95	1,26

**Fonte:** Autor próprio (2023)

**Figura 16 - Distribuição granulométrica dos RAPs**



Fonte: Autor próprio (2023)

### 3.1.2.1 Caracterização do ligante recuperado

Para realizar a extração do ligante asfáltico foi usada a norma do DNIT 053/94, sendo possível determinar o teor de ligante presente nos RAPs. Foram realizadas 3 extrações de ligante asfáltico para cada tipo de RAP usando tricloroetileno. A Tabela 8 mostra os resultados dos teores de ligante de cada RAP obtido pela média das 3 extrações realizadas.

**Tabela 8 - Teor de ligante dos RAPs**

AMOSTRA	TEOR DE LIGANTE
RAP 01	4,8%
RAP 02	5,5%
RAP 03	4,5%
RAP 04	5,0%

Fonte: Autor próprio (2023)

Após a extração do ligante asfáltico da mistura asfáltica realizada no Rotarex foi necessário realizar um procedimento para a recuperação do ligante e sua posterior análise. Essa recuperação foi realizada usando um evaporador rotativo (Rotovap), e utilizou as recomendações das normas ASTM D5404 e AASTHO T 319. Na Figura 17 é apresentado o evaporador rotativo usado durante a recuperação do ligante asfáltico.

**Figura 17** - Evaporador rotativo para recuperação de ligante asfáltico



**Fonte:** Arruda (2021)

Depois de feita a recuperação do ligante com o evaporador rotativo, as amostras foram coletadas em estufa a vácuo em três ciclos de extração. O primeiro ciclo teve 6 horas à uma temperatura de 60°C e 60 mmHg, seguido de mais um tempo de 2 horas a 85 °C e 60 mmHg e, para finaliza, mais um período de 2 horas a 100°C a 60 mmHg. A execução dessa etapa teve como propósito retirar o tricloroetileno residual que ainda poderia estar presente no ligante asfáltico recuperado. Na Figura 18 é apresentada a estufa a vácuo e uma das amostras durante a realização do procedimento de recuperação do ligante.

**Figura 18** - Estufa a vácuo usada na recuperação do ligante envelhecido



**Fonte:** Arruda (2021)

Os resultados obtidos da caracterização física e reológica dos ligantes asfálticos recuperados são mostrados na Tabela 9.

**Tabela 9** - Caracterização física e reológica dos ligantes asfálticos recuperados

ENSAIO		NORMA	RESULTADOS			
			RAP 01	RAP 02	RAP 03	RAP 04
Penetração (0,1 mm)		ABNT NBR 6576	20,0	23,2	16,0	25,2
Ponto de amolecimento (°C)		ABNT NBR 6560	69,5	65,0	71,0	58,0
Viscosidade rotacional (cP)	135°C	ABNT NBR 15184	2530,0	3050,0	2250,0	2045,0
	150°C		1042,0	1261,0	1030,0	1326,0
	177°C		410,5	553,0	372,5	658,2
Performance Grade (°C)		AASHTO M 320	94	78	106	78

Fonte: Autor próprio (2023)

Com os dados apresentados é possível destacar a baixa penetração em comparação com o ligante asfáltico novo e grau de desempenho e viscosidades elevados. Não há uma definição estabelecida sobre esses parâmetros para o ligante asfáltico recuperado presente no material fresado. Apesar de não ter sido realizado o ensaio de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) para garantir que todo o solvente foi extraído da amostra do ligante envelhecido, os resultados analisados não são distantes dos encontrados em outras pesquisas que também usaram RAP e realizaram o ensaio de FTIR (GENNESSEAU, 2015; UNGER FILHO, 2019; WANG *et al.*, 2020).

### 3.1.2.2 Caracterização dos agregados recuperados

Os resultados dos agregados recuperados estão apresentados na Tabela 10.

**Tabela 10** - Caracterização dos agregados recuperados

ENSAIO	NORMA	RESULTADOS			
		RAP 01	RAP 02	RAP 03	RAP 04
Massa específica real (g/cm <sup>3</sup> )	DNIT – ME 084/95	2,383	2,466	2,365	2,423
Massa específica aparente (g/cm <sup>3</sup> )		2,312	2,379	2,298	2,361
Absorção (%)		0,62	0,89	0,60	0,72
Partícula alongada e achatada (%)	ASTM D 4791	6,58	9,34	8,35	8,23
Equivalente areia (%)	DNIT – ME 054/97	62,40	68,58	70,26	72,23
Angularidade de agregado miúdo (%)	AASHTO T 304	40,18	45,43	42,15	41,58

Fonte: Autor próprio (2023)

No ensaio de Equivalente Areia realizado nos agregados recuperados dos RAPs é possível observar a presença de finos, que estão dentro dos parâmetros normativos (mínimo de 55%), assim como foi visto nas amostras antes da extração dos ligantes asfálticos. A Tabela 11 mostra os

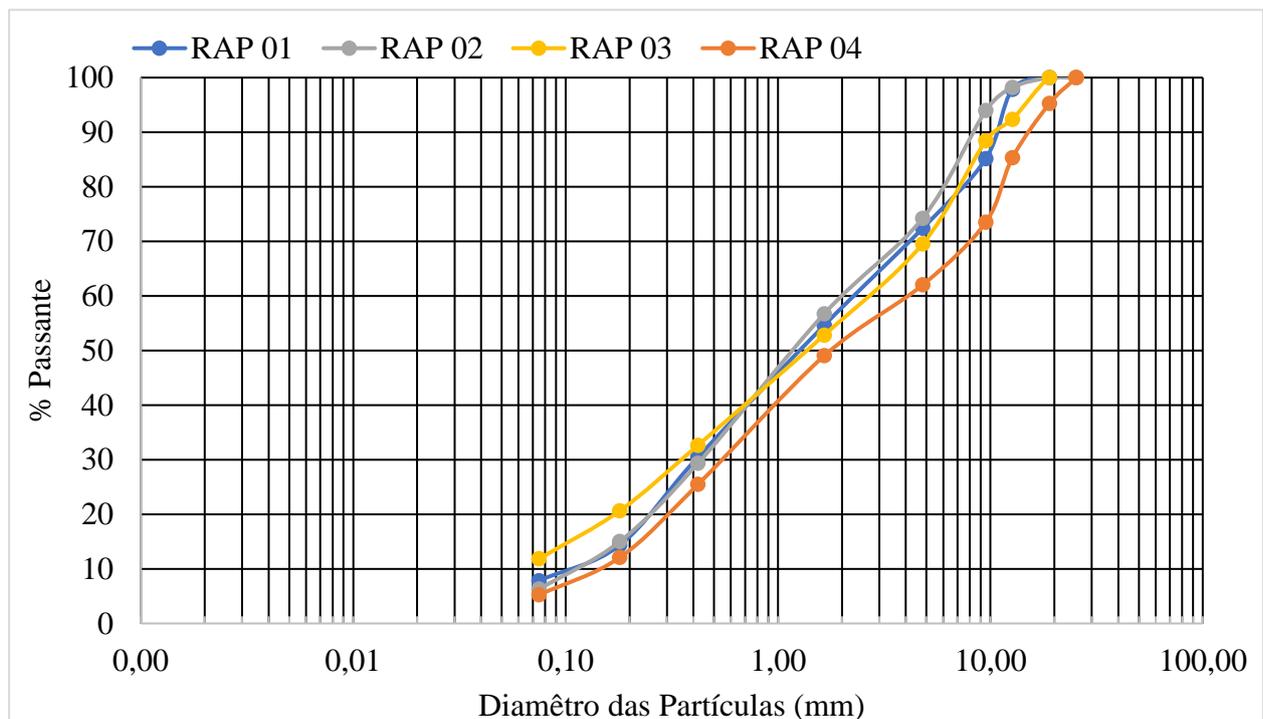
resultados das análises granulométricas dos agregados recuperados e na Figura 19 são apresentadas suas respectivas curvas granulométricas.

**Tabela 11** - Análise granulométrica dos agregados recuperados

PENEIRA		PERCENTAGEM PASSANTE EM MASSA (%)			
Nº	Mm	RAP 01	RAP 02	RAP 03	RAP 04
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	95,26
1/2"	12,7	97,85	100,00	92,36	85,32
3/8"	9,5	85,16	93,97	88,44	73,52
Nº 4	4,8	72,41	74,24	69,55	62,02
Nº 10	1,65	54,62	56,73	52,82	49,03
Nº 40	0,42	30,48	29,33	32,65	25,47
Nº 80	0,18	14,35	15,01	20,65	12,09
Nº200	0,08	7,85	6,28	11,84	5,23

Fonte: Autor próprio (2023)

**Figura 19** - Distribuição granulométrica dos agregados recuperados



Fonte: Autor próprio (2023)

## **3.2 Metodologia**

### **3.2.1 Cálculo DoA**

O método laboratorial usado para a determinação do DoA foi desenvolvido por Pires (2018) e usado também por Gaspar (2019). Essa técnica usa o ensaio de resistência à tração por compressão diametral para estimar a quantidade de ligante asfáltico do RAP que pode ser considerada ativa, de acordo com a temperatura ao qual ele é submetido durante a usinagem.

No procedimento as amostras com 100% RAP foram submetidas ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral em diferentes temperaturas e assim, o ganho de resistência do material com o aumento de temperatura fornece um indicativo da quantidade de ligante asfáltico ativo. Primeiramente, esta pesquisa seguiu o proposto pela metodologia de Gaspar (2019), que para eliminar a influência de fatores como a umidade do RAP e o tempo de mistura, realizou a preparação das amostras de acordo com as etapas descritas a seguir.

Primeiramente, o RAP foi colocado em estufa a 40°C por 48 horas para secagem e após esse processo, para a confecção dos corpos de prova as amostras foram condicionadas em estufa por 4 horas nas temperaturas de usinagem.

A temperatura de 40°C usada na etapa de secagem foi selecionada por meio do estudo de Gaspar (2019) tendo em vista que temperaturas maiores poderiam influenciar na ativação prematura do ligante asfáltico. As temperaturas de usinagem também foram escolhidas segundo a metodologia de Gaspar (2019) onde foram usadas as temperaturas de 140°C, 150°C, 160°C, 170°C e 180°C. Foram moldados 3 corpos de prova para cada temperatura. Vale ressaltar que todo esse processo foi realizado para cada tipo de RAP.

Após compactadas foi determinado o volume de vazios dos corpos de prova (Tabela 12) e, em seguida, foi executado o ensaio de resistência à tração que determina a tensão máxima suportada pela mistura asfáltica antes da sua ruptura. Os corpos de prova possuíam alturas entre 55 a 70 mm e diâmetros de  $100 \pm 2$  mm e foram ensaiados na Servopulser Servo Dynamic-Systems (EHF-E Series).

**Tabela 12** - Volume de vazios das amostras usadas para cálculo do DoA

<b>Temperatura de usinagem (°C)</b>	<b>Corpo de prova</b>	<b>Volume de vazios</b>
140	CP 01	4,02
	CP 02	4,06
	CP 03	4,03
150	CP 01	3,93
	CP 02	4,01
	CP 03	3,95
160	CP 01	4,05
	CP 02	4,03
	CP 03	4,08
170	CP 01	4,00
	CP 02	4,04
	CP 03	4,05
180	CP 01	3,98
	CP 02	4,03
	CP 03	4,05

**Fonte:** Autor próprio (2023)

O procedimento do ensaio seguiu a norma DNIT – ME 136/10:

- obteve-se a média de altura (H) e diâmetro (D) dos corpos de prova;
- estabilizou-se a temperatura do ensaio em 25°C, por no mínimo 4 horas;
- posicionou-se os corpos de prova em suporte do tipo Lobo Carneiro e, em seguida, coloca-se o conjunto (suporte + corpo de prova) na prensa EHF-E Series;
- aplicou-se a carga progressivamente, com uma velocidade de deslocamento de 0,80 ± 0,01 mm/segundo, até a ruptura do corpo de prova;
- com o valor obtido da carga de ruptura (P) foi calculada a resistência à tração por meio da Equação 20.

$$RT = \frac{2P}{100 \pi D H} \quad (\text{equação 20})$$

Onde:

RT = Resistência à tração (MPa);

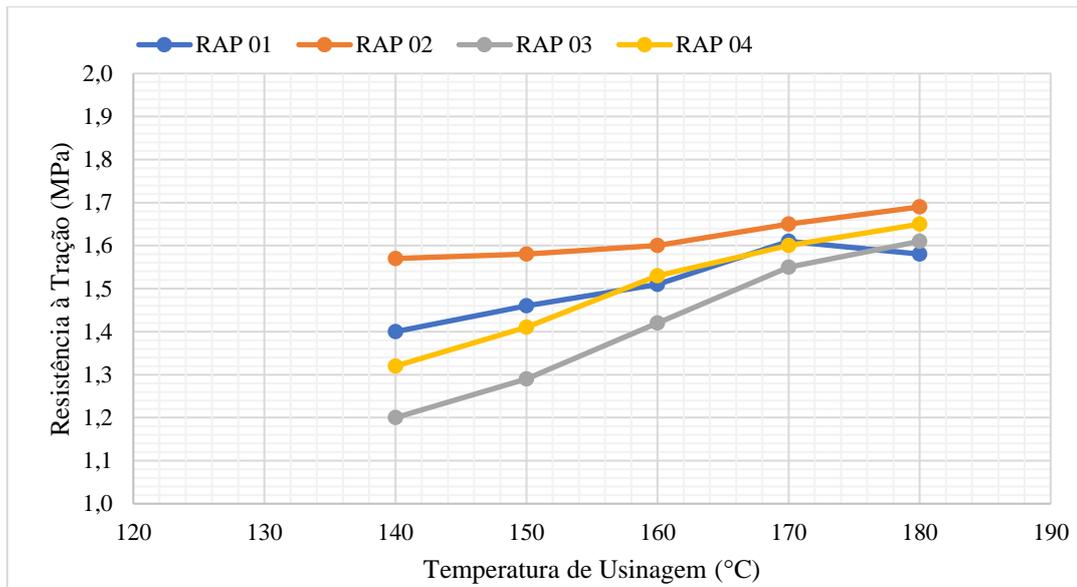
P = Carga de ruptura (N);

D = Diâmetro do corpo de prova (cm);

H = Altura do corpo de prova (cm)

A Figura 20 apresenta os valores das RTs para os RAPs usados nessa pesquisa.

**Figura 20** – Resistência à Tração para os RAPs

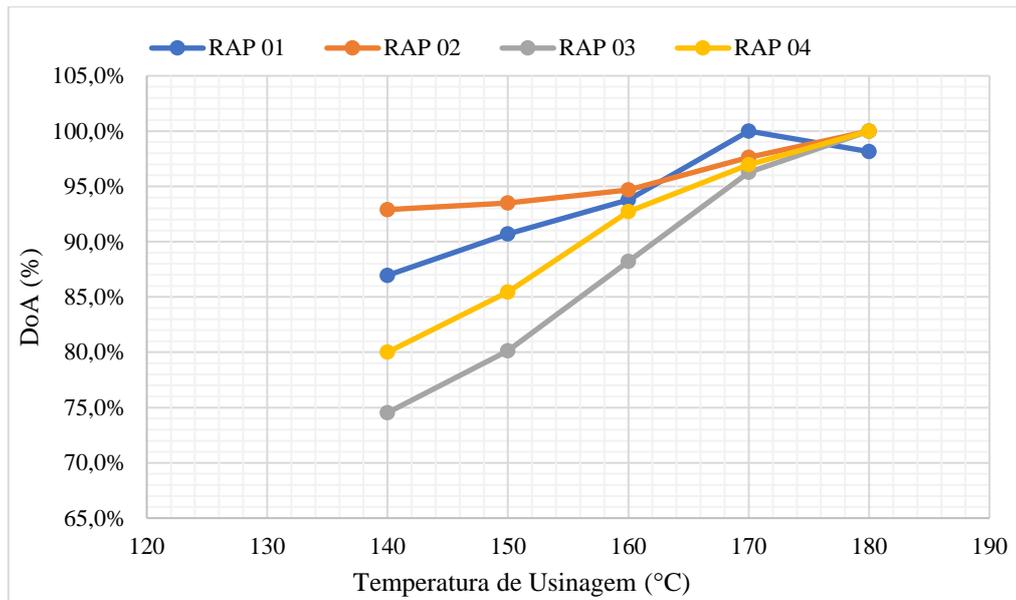


**Fonte:** Autor próprio (2023)

Os resultados de RT dos RAP 02, 03 e 04 mostram uma tendência de aumento da resistência com o aumento da temperatura de condicionamento. Esse aumento significa que as amostras condicionadas em temperaturas mais elevadas se romperam com cargas máximas maiores. De acordo com Gaspar, Vasconcelos e Bernucci (2016) esse aumento é indicador do grau de ativação do ligante, já que representam o ganho de resistência com o aumento da temperatura. O RAP 01 apresentou uma tendência diferente, onde eles atingiram o pico de resistência já na temperatura de 170°C e em seguida sofre uma queda de resistência, sendo esse mesmo comportamento observado em alguns dos materiais estudados por Gaspar (2019).

Segundo Gaspar *et al.* (2020) temperaturas muito elevadas podem provocar outros efeitos além da ativação do ligante, como a oxidação. Além disso, caso exista componentes poliméricos estes podem influenciar no resultado dos ensaios. Na situação da oxidação, consequentemente o aumento da rigidez do ligante faz com que o material resista a picos de tensão mais altos, no entanto, acontece também uma diminuição da resposta viscosa do material que pode influenciar de maneira diferente a resistência residual deste após o pico de carregamento. A partir dos resultados de RT obtidos foi calculado o parâmetro DoA usando a Equação 8. A Figura 21 mostra os resultados encontrados para o DoA.

**Figura 21** - DoA para os RAPs



Fonte: Autor próprio (2023)

O objetivo desse parâmetro é indicar a quantidade de ligante que ficará disponível para a mistura com o ligante novo em cada temperatura de usinagem, portanto a temperatura na qual o DoA = 100%, foi de 180°C para os RAPs 02, 03 e 04 e de 170°C para o RAP 01. Os resultados de DoA seguem o comportamento do parâmetro sobre o qual é baseado, ou seja, as mesmas considerações realizadas para os resultados de resistência à tração anteriormente são válidas na análise do DoA.

### 3.2.2 Dosagem das misturas asfálticas

Para realização da pesquisa foram feitas as dosagens das misturas asfálticas seguindo o método de compactação por amassamento e foram selecionadas quatro faixas granulométricas para cada tipo de RAP utilizando a curva Fuller. A curva granulométrica dos agregados recuperados foi utilizada como base para determinação das demais, já que de acordo com Wellner *et al.* (2015) a curva granulométrica após a extração oferece um melhor indicativo de como a granulometria irá variar à medida que o ligante asfáltico do RAP for ativado. Foram desenvolvidas misturas com 25, 50, 75 e 100% de RAP em relação a massa total das misturas, onde suas faixas granulométricas foram determinadas a partir da curva com 100% RAP. Por isso não foi realizada a etapa da escolha da curva granulométrica, pois a curva base utilizada foi a de 100% RAP.

Todas as faixas granulométricas desenvolvidas se encontraram nos limites normativos da faixa E do Superpave. Os percentuais finais de cada material estão apresentados nas Tabelas 13, 14, 15 e 16 para os RAPs 01, 02, 03 e 04, respectivamente.

**Tabela 13** - Percentuais finais para as misturas do RAP 01

<b>RAP (%)</b>	<b>Brita 19,0 mm (%)</b>	<b>Brita 12,5 mm (%)</b>	<b>Pó de Pedra (%)</b>	<b>Areia (%)</b>
25,0	14,0	15,0	20,0	26,0
50,0	11,0	10,0	15,0	14,0
75,0	5,0	5,0	5,0	10,0

**Fonte:** Autor próprio (2023)

**Tabela 14** - Percentuais finais para as misturas do RAP 02

<b>RAP (%)</b>	<b>Brita 19,0 mm (%)</b>	<b>Brita 12,5 mm (%)</b>	<b>Pó de Pedra (%)</b>	<b>Areia (%)</b>
25,0	12,0	17,0	19,0	27,0
50,0	9,0	12,0	14,0	15,0
75,0	4,0	6,0	4,0	11,0

**Fonte:** Autor próprio (2023)

**Tabela 15** - Percentuais finais para as misturas do RAP 03

<b>RAP (%)</b>	<b>Brita 19,0 mm (%)</b>	<b>Brita 12,5 mm (%)</b>	<b>Pó de Pedra (%)</b>	<b>Areia (%)</b>
25,0	15,0	16,0	21,0	23,0
50,0	12,0	11,0	16,0	11,0
75,0	5,0	4,0	7,0	9,0

**Fonte:** Autor próprio (2023)

**Tabela 16** - Percentuais finais para as misturas do RAP 04

<b>RAP (%)</b>	<b>Brita 19,0 mm (%)</b>	<b>Brita 12,5 mm (%)</b>	<b>Pó de Pedra (%)</b>	<b>Areia (%)</b>
25,0	12,0	18,0	25,0	20,0
50,0	9,0	13,0	18,0	10,0
75,0	3,0	6,0	8,0	8,0

**Fonte:** Autor próprio (2023)

As composições granulométricas estão mostradas nas Tabelas 17, 18, 19 e 20 para os RAPs 01, 02, 03 e 04, respectivamente.

**Tabela 17** - Composições granulométricas do RAP 01

PENEIRA		PERCENTAGEM PASSANTE EM MASSA (%)			
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	99,37	99,53	99,74	100,00
1/2"	12,7	93,33	94,32	95,83	97,85
3/8"	9,5	86,56	85,30	84,82	85,16
Nº 4	4,8	68,38	68,53	69,42	72,41
Nº 10	1,65	54,57	53,26	53,57	54,62
5Nº 40	0,42	26,48	27,19	28,69	30,48
Nº 80	0,18	9,03	10,87	12,11	14,35
Nº200	0,08	4,28	5,54	6,42	7,85

Fonte: Autor próprio (2023)

**Tabela 18** - Composições granulométricas do RAP 02

PENEIRA		PERCENTAGEM PASSANTE EM MASSA (%)			
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	99,47	99,58	99,79	100,00
1/2"	12,7	94,44	95,02	96,62	98,22
3/8"	9,5	90,36	90,52	92,23	93,97
Nº 4	4,8	70,83	72,22	72,68	74,24
Nº 10	1,65	56,58	56,53	56,63	56,73
Nº 40	0,42	26,86	27,61	28,50	29,33
Nº 80	0,18	9,54	11,72	12,96	15,02
Nº200	0,08	4,06	5,01	5,41	6,28

Fonte: Autor próprio (2023)

**Tabela 19** - Composições granulométricas do RAP 03

PENEIRA		PERCENTAGEM PASSANTE EM MASSA (%)			
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	99,42	99,53	99,74	100,00
1/2"	12,7	92,46	91,58	91,71	92,36
3/8"	9,5	88,18	86,94	87,28	88,44
Nº 4	4,8	67,87	67,06	67,28	69,55
Nº 10	1,65	53,98	52,51	52,22	52,82
Nº 40	0,42	26,95	28,35	30,32	32,65
Nº 80	0,18	10,73	13,89	16,84	20,65
Nº200	0,08	5,36	7,46	9,41	11,84

Fonte: Autor próprio (2023)

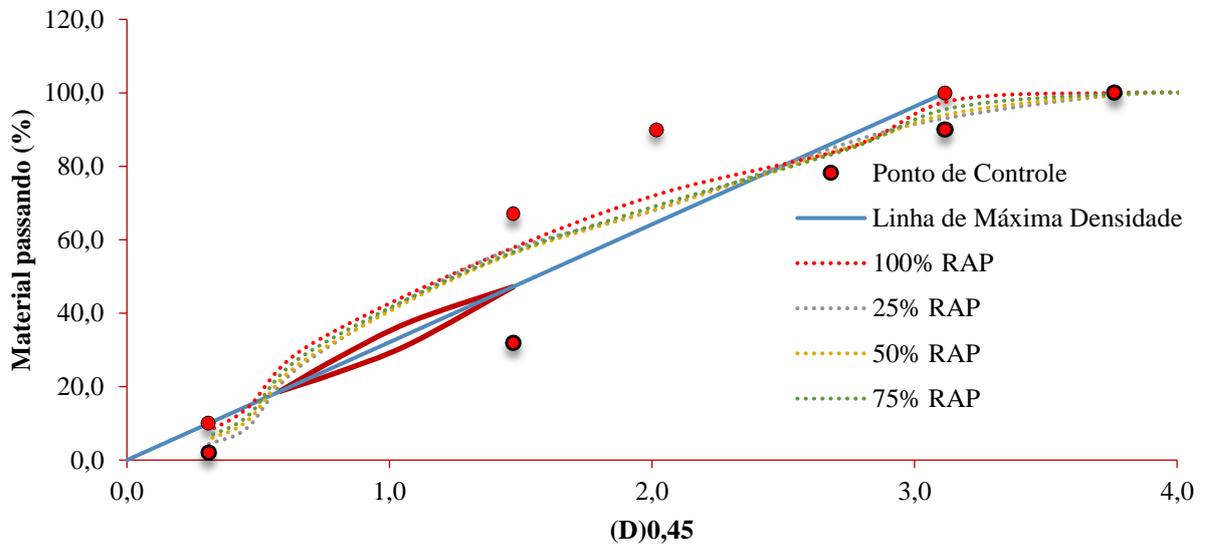
**Tabela 20** - Composições granulométricas do RAP 04

PENEIRA		PERCENTAGEM PASSANTE EM MASSA (%)			
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	94,25	93,63	94,14	95,26
1/2"	12,7	82,03	83,65	84,26	85,32
3/8"	9,5	72,10	71,49	71,02	73,52
Nº 4	4,8	65,15	66,25	63,78	62,02
Nº 10	1,65	50,74	53,41	51,94	49,03
Nº 40	0,42	22,58	23,24	21,48	25,47
Nº 80	0,18	11,52	10,65	11,87	12,09
Nº200	0,08	3,65	4,09	4,41	5,20

Fonte: Autor próprio (2023)

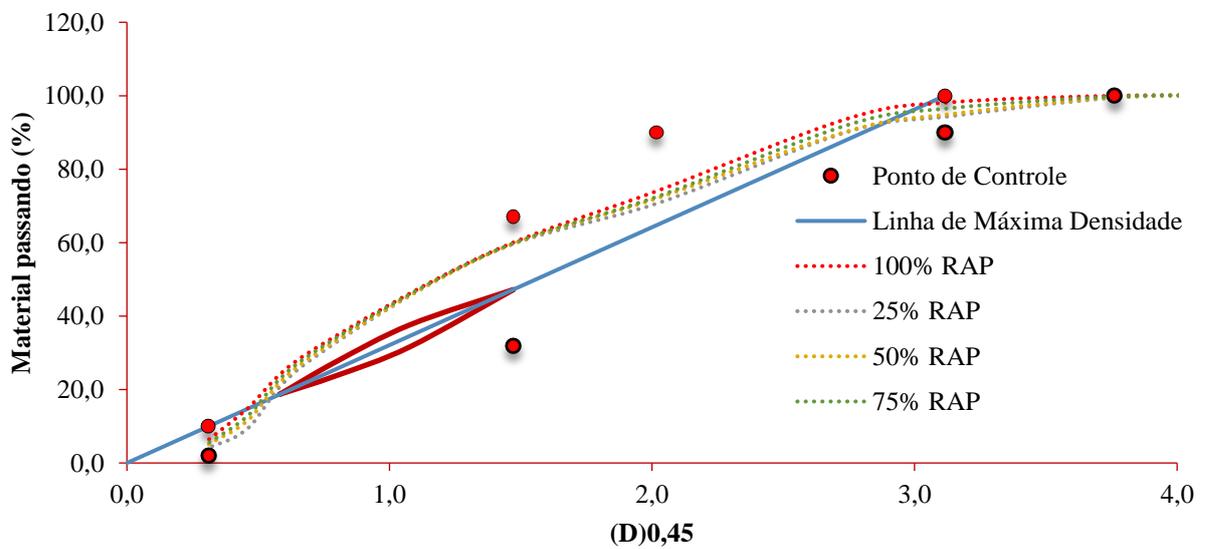
Nas Figuras 22, 23, 24 e 25 são apresentadas as curvas granulométricas dos RAPs 01, 02, 03 e 04, respectivamente.

**Figura 22 - Composição granulométrica RAP 01**



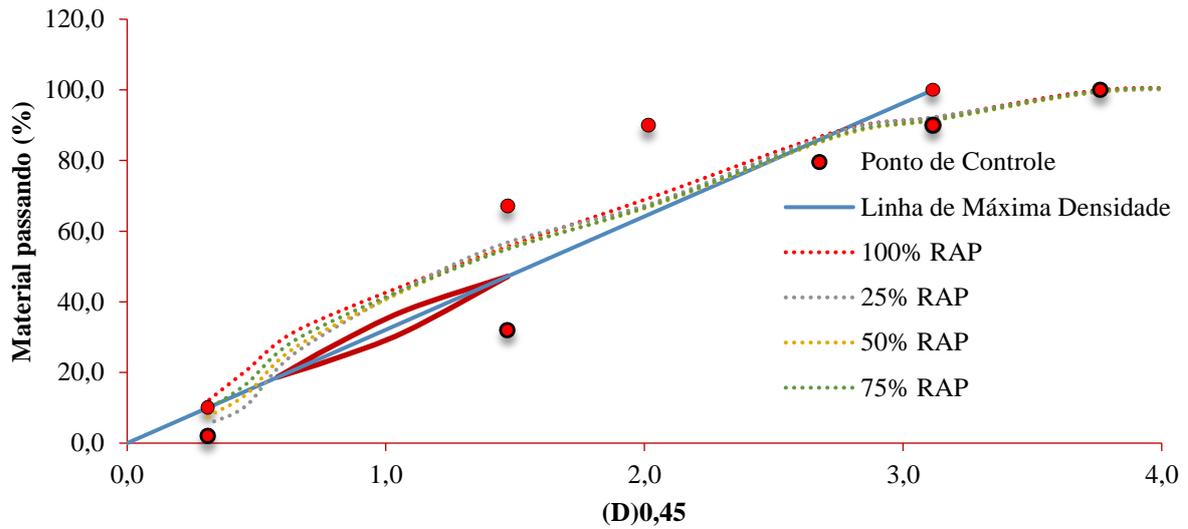
Fonte: Autor próprio (2023)

**Figura 23 - Composição granulométrica RAP 02**



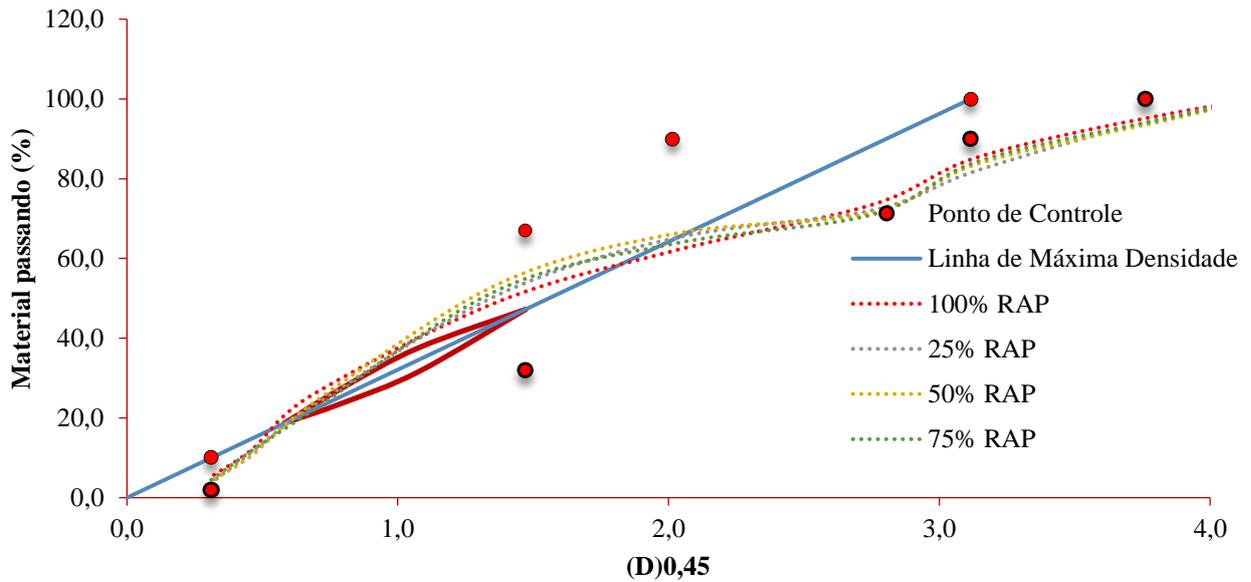
Fonte: Autor próprio (2023)

**Figura 24 - Composição granulométrica RAP 03**



Fonte: Autor próprio (2023)

**Figura 25 - Composição granulométrica RAP 04**



Fonte: Autor próprio (2023)

A densidade máxima medida (Gmm) foi determinada por meio do ensaio Rice Test de acordo com a norma ASTM D 2041. O teor de ligante das misturas finais com cada material fresado foi baseado na quantidade de ligante de cada RAP analisado, logo para as misturas com o RAP 01 o teor de ligante foi de  $4,8 \pm 0,1\%$ , para o RAP 02 de  $5,5 \pm 0,1\%$ , para o RAP 03 de  $4,5 \pm 0,1\%$  e para o RAP 04 de  $5,0 \pm 0,1\%$ . Para alcançar esses teores nas amostras com 25, 50 e 75% de material fresado considerou-se tanto a quantidade de ligante envelhecido disponível como o ligante novo adicionado. A quantificação do ligante envelhecido se deu por meio do DoA,

calculado para cada tipo de RAP usado. E, a quantidade de ligante adicionado foi aquela restante para alcançar o teor de projeto de cada RAP.

Para exemplificar, o RAP 01 teve um teor de ligante de 4,8% e um DoA de 100% para a temperatura de usinagem de 170°C, então nessa temperatura nas amostras com 25% de RAP todo o ligante envelhecido foi considerado disponível para a mistura. Dessa maneira, um corpo de prova com 1200 g deve ter 4,8% de ligante asfáltico, totalizando 57,6 g. Essa quantidade de ligante considerou tanto o ligante novo como o ligante envelhecido, assim no caso da mistura com 25% de RAP tinha-se um total de 285,6 g de material fresado, onde 13,7 g era de ligante envelhecido. Para as misturas com temperatura de usinagem de 170°C (100% DoA) foi adicionado 43,9g de ligante novo que somado ao 13,7g de ligante envelhecido totalizou o 57,6g de ligante na mistura correspondente ao teor de 4,8% do RAP. Nas outras temperaturas foi considerado o DoA e então encontrado a quantidade de ligante envelhecido que estava disponível e calculada a quantidade de ligante novo necessário para atingir o teor de ligante final da mistura de 4,8% para o RAP 01.

Em seguida, foram realizados ensaios de Rice Test e caracterização volumétrica para análise das curvas granulométricas utilizadas nessa pesquisa. Vale destacar os materiais foram aquecidos por um período de duas horas antes do processo de mistura. Esse processo de mistura foi realizado manualmente e durou em média 3 min para cada corpo de prova. Para a compactação dos corpos de prova foi usado um N de projeto de 100 giros seguindo a metodologia da Faixa E do Superpave. As Tabelas 21, 22, 23 e 24 apresentam as características volumétricas no teor ótimo de projeto das misturas estudadas para os RAPs 01, 02, 03 e 04, respectivamente.

**Tabela 21** - Características volumétricas do RAP 01

<b>COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA</b>	<b>25% RAP</b>	<b>50% RAP</b>	<b>75% RAP</b>	<b>100% RAP</b>	<b>LIMITES</b>
Teor de projeto (%)	4,80	4,80	4,80	4,80	-
% Gmm (@Nprojeto)	96,3	96,2	96,1	96,2	96,0
Vv (%)	3,90	3,97	4,00	4,08	4
VAM (%)	12,06	13,85	13,26	12,58	> 11
RBV (%)	68,53	70,62	71,95	72,14	65 a 75
P/A	1,1	1,1	1,1	1,2	0,6 – 1,2

**Fonte:** Autor próprio (2023)

**Tabela 22** - Características volumétricas do RAP 02

<b>COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA</b>	<b>25% RAP</b>	<b>50% RAP</b>	<b>75% RAP</b>	<b>100% RAP</b>	<b>LIMITES</b>
Teor de projeto (%)	5,50	5,50	5,50	5,50	-
% Gmm (@Nprojeto)	95,9	96,1	96,0	96,2	-
Vv (%)	4,02	3,98	4,12	4,46	4
VAM (%)	13,88	12,91	14,73	14,36	> 11
RBV (%)	67,12	67,38	68,59	70,66	65 a 75
P/A	0,9	0,9	1,0	1,0	0,6 – 1,2

**Fonte:** Autor próprio (2023)

**Tabela 23** - Características volumétricas do RAP 03

<b>COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA</b>	<b>25% RAP</b>	<b>50% RAP</b>	<b>75% RAP</b>	<b>100% RAP</b>	<b>LIMITES</b>
Teor de projeto (%)	4,50	4,50	4,50	4,50	-
% Gmm (@Nprojeto)	95,8	95,9	95,9	96,3	96,0
Vv (%)	3,98	4,02	4,09	4,15	4
VAM (%)	12,74	12,98	13,11	13,26	> 11
RBV (%)	65,03	66,41	66,34	67,62	65 a 75
P/A	0,8	1,0	1,2	1,2	0,6 – 1,2

**Fonte:** Autor próprio (2023)

**Tabela 24** - Características volumétricas do RAP 04

<b>COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA</b>	<b>25% RAP</b>	<b>50% RAP</b>	<b>75% RAP</b>	<b>100% RAP</b>	<b>LIMITES</b>
Teor de projeto (%)	5,00	5,00	5,00	5,00	-
% Gmm (@Nprojeto)	95,7	95,7	95,8	95,9	96,0
Vv (%)	3,99	4,01	4,02	4,05	4
VAM (%)	12,05	12,65	12,87	13,26	> 11
RBV (%)	66,78	68,45	69,05	70,12	65 a 75
P/A	0,7	0,8	1,0	1,2	0,6 – 1,2

**Fonte:** Autor próprio (2023)

Os teores analisados de cada tipo de RAP atenderam as especificações técnicas para uso em mistura asfáltica. Embora o teor de 100% do RAP 02 apresente um valor de volume de vazios um pouco acima para usar na metodologia da dosagem Superpave, optou-se por manter essa composição com essas características. Nos demais teores aconteceu uma leve mudança nos valores

de volume de vazios, no entanto, essas variações foram próximas ao limite permitido, sendo possível definir um teor constante para cada tipo de RAP de ligante para todas as composições granulométricas.

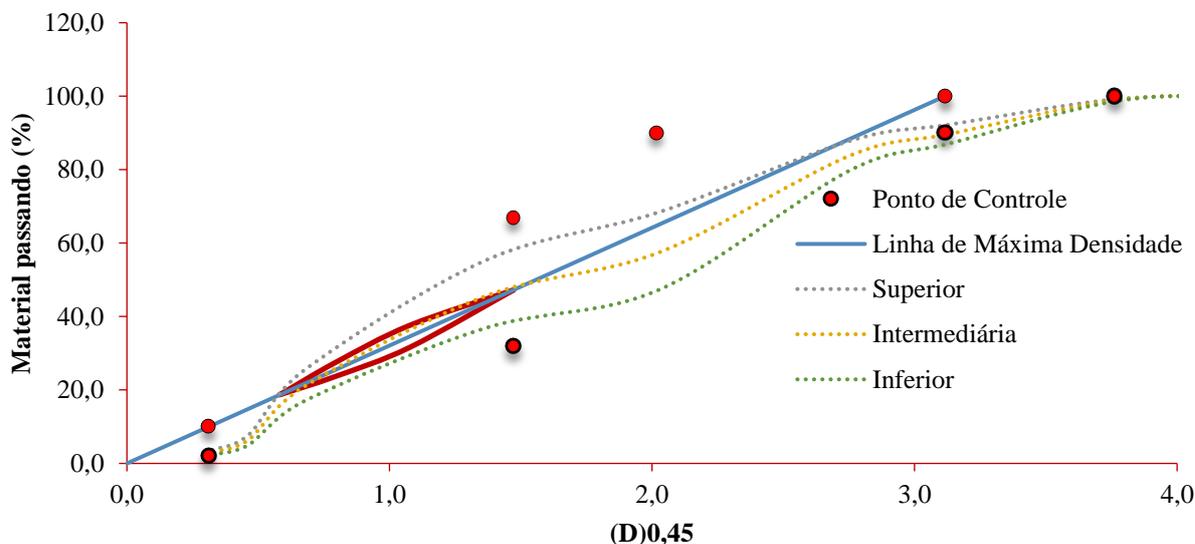
Para a mistura asfáltica sem material fresado foi realizada uma dosagem seguindo a metodologia Superpave que atendesse aos limites normativos da faixa E para determinar o teor ótimo de ligante asfáltico e os parâmetros volumétricos. Inicialmente, construiu-se três composições granulométricas (Tabela 25 e Figura 26): uma superior (próximo ao limite superior da faixa), uma composição intermediária (na região mediana da faixa) e uma inferior (próxima ao limite inferior da faixa).

**Tabela 25** - Proporções dos agregados nas granulometrias (%)

CURVA	BRITA 19"	BRITA 12,5"	PÓ DE PEDRA	AREIA
Superior	15%	17%	35%	33%
Intermediária	20%	24%	29%	27%
Inferior	25%	30%	22%	23%

Fonte: Autor próprio (2023)

**Figura 26** - Composição granulométricas das misturas 0% RAP



Fonte: Autor próprio (2023)

Após a composição das curvas foi realizada a moldagem dos corpos de prova com um teor de ligante igual a 5% e realizado o ensaio de Rice Test para cada composição para dessa forma obter os parâmetros volumétricos de cada curva granulométrica. A Tabela 26 resume os parâmetros calculados para as três composições granulométricas estudadas e apresenta os critérios a serem atendidos de acordo com a metodologia Superpave.

**Tabela 26** - Resumos dos parâmetros das composições granulométricas

CURVA	Teor de ligante (%)	%Gmm			Vv (%)	VAM (%)	RBV (%)
		@Ninicial	@Nprojeto	@Nmáximo			
Superior	5,00	90,48	96,39	97,89	3,9	15,3	73,15
Intermediária	5,00	90,63	97,08	97,95	2,5	14,0	72,62
Inferior	5,00	91,02	97,38	98,06	2,0	12,9	70,22
Critérios Superpave	-	<89,0	96,0	<98,0	4,0	> 11	65 a 75

Fonte: Autor próprio (2023)

É possível verificar que o teor de ligante inicial da curva superior, além de atender aos requisitos e se aproximar dos valores das curvas contendo material fresado, gerou um volume de vazios próximo de 4%, por isso adotou-se esse teor como teor de ligante de projeto. Logo, não houve necessidade da etapa de escolha do teor de ligante, visto que o teor de 5,0% para a curva superior já atendeu os requisitos necessários.

### 3.3 Modelo de previsão

A qualidade dos modelos empíricos de previsão depende da abrangência e da confiabilidade do banco de dados, quanto mais adequados forem os dados de entrada mais preditivos serão os modelos. Nesta pesquisa, como já mencionado, foram utilizados 4 tipos de material fresados, com uma variação de teor para cada tipo de RAP (0%, 25%, 50%, 75% e 100%) e, também, uma variação na temperatura de usinagem (140°C, 150°C, 160°C, 170°C e 180°C).

#### 3.3.1 Módulo Dinâmico

O processo para obtenção de uma equação que possa prever o DoB de misturas asfálticas recicladas foi realizado em etapas: a primeira foi a execução do ensaio de Módulo Dinâmico.

O Módulo complexo  $E^*$  é um número que correlaciona a amplitude complexa de uma tensão senoidal imposta a um material viscoelástico linear, a uma certa velocidade angular ( $\omega$ ), com a amplitude complexa de deformação senoidal (KIM, 2009). O valor absoluto desse parâmetro é o módulo dinâmico  $|E^*|$ , definido de maneira experimental pela aplicação de uma sequência de cargas senoidais em variadas frequências e temperaturas.

Para obtenção do módulo dinâmico e ângulo de fase, as amostras com 150 mm de altura e 100 mm de diâmetro foram ensaiadas em diferentes frequências de carregamento (25 Hz, 10 Hz, 5 Hz, 1 Hz, 0,5 Hz e 0,1 Hz) sequencialmente da mais alta para a mais baixa e em diferentes

temperaturas de ensaio 4°C, 20°C e 40°C de acordo com a norma do DNIT ME 416/2019. O ensaio foi feito na AMPT e durante sua execução foram aplicadas cargas cíclicas no formato haversine ajustadas para cada combinação de frequência e temperatura, assim foi garantido a aplicação de níveis de deformação entre 50µε e 75µε.

Após a realização do ensaio foram produzidas curvas isotermas que são a representação gráfica do módulo dinâmico e do ângulo de fase em função das frequências aplicadas para cada temperatura de ensaios. Essas curvas foram transladadas multiplicando as frequências por uma constante denominada fator deslocamento ou shift-factor ( $a_T$ ), para obter o melhor ajuste da curva mestra. As frequências de ensaio transladadas são denominadas de frequência reduzida ( $f_R$ ). Segundo a norma DNIT-ME 416/2019 a curva mestra resultante pode ser ajustada por um modelo sigmoidal mostrado na Equação 21, e os fatores de deslocamento podem ser ajustados por uma função polinomial de segunda ordem como mostra a Equação 22.

$$\log(|E^*|) = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma \log(f_R)}} \quad (\text{equação 21})$$

$$\log(a_T) = a_1(T^2 - T_R^2) + a_2(T - T_R) + a_3 \quad (\text{equação 22})$$

Onde:

$|E^*|$  é o módulo dinâmico;

$\delta$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  são coeficientes de ajuste;

$f_R$  é a frequência reduzida;

$a_T$  é o fator de deslocamento;

T é a temperatura do ensaio (°C);

$T_R$  é a temperatura de referência, para a qual será feita a translação (°C);

$a_1$  e  $a_2$  são os coeficientes de ajuste.

Esse ensaio foi realizado com três amostras para todas as combinações supracitadas, ou seja, as combinações com os teores de RAP (0, 25, 50, 75 e 100%) e as temperaturas de usinagem (140, 150, 160, 170 e 180°C).

### 3.3.2 Regressão Linear Múltipla e Análise Estatística

A regressão linear é usada para resolver situações envolvendo conjuntos de variáveis (dependentes e independentes). Como na atual pesquisa foram usadas quatro variáveis independentes (teor de RAP, temperatura de usinagem, frequência e temperatura de ensaio) para a realização do ensaio de Módulo Dinâmico, existiu a necessidade de realização de regressões

lineares múltiplas para verificar se estas variáveis influenciavam no resultado do ensaio, ou seja, nas variáveis dependentes (módulo dinâmico e ângulo de fase) de maneira isolada. Essa etapa foi fundamental, pois como os valores de módulo dinâmico e ângulo de fase foram usados como parâmetros de entrada para a modelagem do DoB se fazia necessário verificar se a temperatura de usinagem, teor de RAP, frequência e temperatura de ensaio realmente influenciavam nos seus resultados.

Além disso, foram construídos modelos de regressão linear múltipla para o módulo dinâmico e ângulo de fase com interação a partir dos dados de percentagem de RAP e temperatura de usinagem, com os parâmetros de temperatura de ensaio e frequência como variáveis de controle. Logo, para cada variável dependente foram feitos dois modelos preditivos, um sem considerar interação entre os parâmetros e outro considerando uma interação entre o teor de RAP e a temperatura de usinagem. A execução desses modelos teve o objetivo de verificar se de fato as variáveis independentes analisadas são significativas para prever o Módulo Dinâmico e Ângulo de fase para assim essas variáveis poderem ser usadas para prever o DoB.

As Tabelas 27, 28, 29 e 30 apresentam a nomenclatura dos modelos realizados para os RAPs 01, 02, 03 e 04 respectivamente.

**Tabela 27** – Nomenclatura das regressões para o RAP 01

<b>MODELOS</b>	<b>NOMENCLATURA</b>
Módulo Dinâmico + Variáveis independentes sem interação	MD (sem interação) – RAP 01
Módulo Dinâmico + Variáveis independentes com interação (teor de RAP e temperatura de usinagem)	MD (com interação) – RAP 01
Ângulo de fase + Variáveis independentes sem interação	AF (sem interação) – RAP 01
Ângulo de fase + Variáveis independentes com interação (teor de RAP e temperatura de usinagem)	AF (com interação) – RAP 01

**Fonte:** Autor próprio (2023)

**Tabela 28** – Nomenclatura das regressões para o RAP 02

<b>MODELOS</b>	<b>NOMENCLATURA</b>
Módulo Dinâmico + Variáveis independentes sem interação	MD (sem interação) – RAP 02
Módulo Dinâmico + Variáveis independentes com interação (teor de RAP e temperatura de usinagem)	MD (com interação) – RAP 02
Ângulo de fase + Variáveis independentes sem interação	AF (sem interação) – RAP 02
Ângulo de fase + Variáveis independentes com interação (teor de RAP e temperatura de usinagem)	AF (com interação) – RAP 02

**Fonte:** Autor próprio (2023)

**Tabela 29** – Nomenclatura das regressões para o RAP 03

MODELOS	NOMENCLATURA
Módulo Dinâmico + Variáveis independentes sem interação	MD (sem interação) – RAP 03
Módulo Dinâmico + Variáveis independentes com interação (teor de RAP e temperatura de usinagem)	MD (com interação) - RAP 03
Ângulo de fase + Variáveis independentes sem interação	AF (sem interação) - RAP 03
Ângulo de fase + Variáveis independentes com interação (teor de RAP e temperatura de usinagem)	AF (com interação) - RAP 03

**Fonte:** Autor próprio (2023)

**Tabela 30** - Nomenclatura das regressões para o RAP 04

MODELOS	NOMENCLATURA
Módulo Dinâmico + Variáveis independentes sem interação	MD (sem interação) - RAP 04
Módulo Dinâmico + Variáveis independentes com interação (teor de RAP e temperatura de usinagem)	MD (com interação) - RAP 04
Ângulo de fase + Variáveis independentes sem interação	AF (sem interação) - RAP 04
Ângulo de fase + Variáveis independentes com interação (teor de RAP e temperatura de usinagem)	AF (com interação) - RAP 04

**Fonte:** Autor próprio (2023)

Para cada modelo foram analisados o coeficiente de determinação múltipla ( $R^2$ ) para verificar quão próximos os dados estão da linha de regressão ajustada, pois esse parâmetro expressa a percentagem da variação da variável resposta explicada pelo modelo de regressão. De maneira geral, quanto maior o  $R^2$  melhor o modelo se ajusta aos seus dados. Porém o  $R^2$  apresenta algumas limitações, ele não determina se as estimativas e previsões do coeficiente são tendenciosas, pois quando uma nova variável é adicionada ao modelo o  $R^2$  aumenta. Logo, um modelo com mais variáveis apresenta um valor de  $R^2$  maior e pode parecer ter um melhor ajuste, simplesmente porque tem mais termos (RODRIGUES, 2012).

Por isso, para comparar os modelos analisados neste estudo também foi usado o  $R^2$  ajustado que compara o poder explicativo dos modelos de regressão que contêm diferentes números de variáveis independentes. Nesse parâmetro ele aumenta somente se o novo termo melhorar o modelo mais do que seria esperado e diminui quando uma variável independente melhora o modelo menos do que o esperado (RODRIGUES, 2012).

Em cada modelo foi realizado também o teste F de significância geral para comparar o modelo sem preditores, onde existe apenas o intercepto que é a média da variável resposta quando

todas as variáveis independentes são zero, com o modelo encontrado. Este teste consegue avaliar vários coeficientes simultaneamente. Para isso foram definidas duas hipóteses:

- Hipótese nula: o ajuste do modelo somente com intercepto e o modelo encontrado são iguais
- Hipótese alternativa: o ajuste do modelo somente com o intercepto é significativamente reduzido em comparação com o modelo encontrado.

Se o valor-p para o teste F do teste de significância geral for menor que seu nível significância, pode-se rejeitar a hipótese nula e concluir que o modelo encontrado fornece um ajuste melhor do que o modelo somente com o intercepto (MELO, 2009). No caso do presente estudo foi usado um nível de significância de 5%, logo para rejeitar a hipótese nula é necessário um valor de  $p < 0,05$ . Com o teste F geral também pode-se determinar que se o valor-p for menor que seu nível de significância conclui-se que o valor de  $R^2$  é significativamente diferente de zero.

Após analisar os modelos gerais foi analisado os coeficientes das variáveis independentes para cada modelo separadamente. Esses coeficientes de regressão representam a mudança média na variável de resposta para uma unidade de mudança na variável preditora, mantendo outros preditores constantes no modelo.

Para cada coeficiente foi determinado o valor-p para que testou a hipótese nula de que o coeficiente é igual a zero (sem efeito). Um valor-p baixo ( $< 0,05$ ) indica que se pode rejeitar a hipótese nula. Ou seja, um preditor que possui um valor-p baixo indica que ele pode ser uma adição significativa ao modelo, pois as alterações no valor do preditor se relacionam com alterações na variável resposta. Por outro lado, um valor-p maior que o nível de significância sugere que mudanças no preditor não estão associadas a mudanças na resposta variável (WORZALA *et al.*, 2005).

Foi feito também um teste t de significância individual para cada variável independente do modelo com a mesma hipótese nula de que o coeficiente não possui efeito. Para alcançar o valor-t foi feita uma comparação com sua média amostral com a hipótese nula e adicionado o tamanho amostral e a variabilidade nos dados. Um valor-t de 0 indica que os resultados da amostra são exatamente iguais à hipótese nula e conforme aumenta a diferença entre os dados amostrais e a hipótese nula, o valor absoluto do valor-t aumenta (MELO, 2009).

Para a análise dos coeficientes encontrados nas regressões que não possuem interação foi preciso realizar a análise de alguns pressupostos por isso foi aplicado o Teste de Multicolinearidade para verificar se as variáveis independentes possuem alguma correlação entre si, pois caso tenha elas podem se tornar redundantes ocasionando no aumento dos erros padrões

dos coeficientes. O Fator de Inflação da Variância (VIF) foi utilizado para avaliar o quanto a variância de um coeficiente de regressão estimado aumenta se as suas preditoras estiverem correlacionadas. Caso nenhum fator estiver correlacionado, os VIFs serão todos 1. Esse fator mede a associação entre as variáveis regressoras de acordo com o coeficiente de determinação do modelo de regressão, apenas com as variáveis independentes. De acordo Berk (1997) o VIF é definido de acordo com a Equação 23.

$$VIF_i = \frac{1}{1 - R_i^2} \quad (\text{equação 23})$$

Onde  $R_i^2$  é o coeficiente de determinação da regressão da variável explicativa  $X_i$  sobre as outras variáveis explicativas com  $i = 1, 2, \dots, k$  quantidade de variáveis explicativas no modelo.

Esses modelos foram implementados no software computacional R que é uma linguagem de programação voltada para à manipulação, análise e visualização de dados, com o objetivo de estimar a variabilidade dos valores de módulo dinâmico e ângulo de fase. Esta análise está sendo realizada com base nas equações de regressão e os gráficos gerados a partir delas.

### 3.3.3 Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR)

O FTIR mede os grupos funcionais químicos de um material enviando radiação infravermelho e analisando a radiação absorvida pela amostra. A radiação absorvida converte-se em energia rotacional e vibracional pelas moléculas na amostra. O receptor detecta o sinal resultante que é conhecido como espectro, e isso revela a impressão digital molecular única de cada grupo funcional separadamente. Estes grupos funcionais químicos são grupos de átomos dentro de moléculas que possuem suas próprias propriedades características, independentemente dos outros átomos presentes na molécula (HETTIARACHCHI *et al.*, 2020). De acordo com esses autores os grupos funcionais de carbonila e sulfóxido podem ser usados para identificar o grau de interação entre os ligantes novos e envelhecidos, sendo que o índice de carbonila foi selecionado para calcular o DoB devido a um maior coeficiente de correlação encontrado no estudo de Hettiarachchi *et al.* (2020).

Assim, foi realizado o ensaio de FTIR para as misturas analisadas nessa pesquisa para verificar se a interação entre o ligante novo e envelhecido realmente aconteceu e o grau de mistura foi calculado usando o método de dois pontos (HOU *et al.*, 208). Onde em primeiro lugar foi selecionada a área do grupo funcional carbonila no espectro FTIR e então foi desenhada uma linha base conectando o limite superior ( $17722,357 \text{ cm}^{-1}$ ) e o limite inferior ( $1672,210 \text{ cm}^{-1}$ ) do grupo funcional carbonila. A área acima da linha foi calculada como a área fixa. Essa área fixa da

carbonila sofre mudanças consideráveis com a presença do ligante envelhecido (DONY *et al.*, 2016; HOU *et al.*, 2018). Porém, a área fixa de referência (2742,656 cm<sup>-1</sup> – 3039,680 cm<sup>-1</sup>) mantém-se relativamente estável independente da presença do ligante envelhecido. Dessa maneira, a razão entre essas duas áreas foi usada para quantificar o grau de mistura.

Dessa maneira, a porcentagem de ligante do RAP na mistura em relação ao ligante total (ligante novo e envelhecido) pode ser calculado. Caso aconteça uma mistura completa, todo o ligante disponível do RAP será mobilizado e o ligante misturado deve ter inicialmente a porcentagem calculada do ligante envelhecido. Se acontecer uma mistura parcial, o grau de mistura pode ser calculado como uma porcentagem do total misturado. Assim, foi seguido o procedimento de cálculo apresentado a seguir para determinar o grau de mistura, onde a área fixa da carbonila e a área de referência foram medidas usando o software MatLab.

Esse método foi usado com sucesso por Bowers *et al.* (2014), Delfosse *et al.* (2016) e Hettiarachchi *et al.* (2020) para determinar o grau de mistura. O ligante envelhecido do RAP na mistura foi calculado pela Equação 24. A Equação 25 foi usada para calcular o índice de carbonila usando a curva FTIR do ligante.

$$\beta = \frac{CI_M - CI_V}{CI_R - CI_V} \quad (\text{equação 24})$$

Onde:

$\beta$  = proporção do ligante do RAP mobilizado na mistura

$CI_M$  = índice de carbonila do ligante misturado

$CI_V$  = índice de carbonila do ligante asfáltico virgem

$CI_R$  = índice de carbonila do ligante envelhecido do RAP

$$CI = \frac{\text{Área grupo carbonila (C=O)}}{\text{Área grupo de referência}} \quad (\text{equação 25})$$

O grau de mistura é a proporção da quantidade de ligante do RAP mobilizado na mistura para o ligante total na mistura (COFFEY *et al.*, 2013) como mostrado na Equação 26. A Equação 27 foi usada para calcular a proporção do ligante envelhecido total na mistura.

$$DoB = \frac{\beta}{\omega} \times 100\% \quad (\text{equação 26})$$

Onde:

$$\omega = \frac{\text{quantidade total de ligante do RAP na mistura (g)}}{\text{quantidade total de ligante na mistura (g)}} \quad (\text{equação 27})$$

Esse ensaio foi realizado no Laboratório de Materiais Multifuncionais e Nanocompósitos (LAMMEN) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte onde foi utilizado um espectrômetro do tipo Bruker, modelo FTIR Vertex 70. Os foram realizados 16 scans e os espectros foram obtidos sob uma faixa de  $500 - 4000 \text{ cm}^{-1}$  com uma resolução de  $4 \text{ cm}^{-1}$  e sinal de absorbância.

### 3.3.4 Modelagem do DoB

Para finalizar, a última etapa foi realizada a modelagem do Grau de mistura, usando o software R, para alcançar uma equação que represente esse parâmetro. Foram testados modelos com diferentes variáveis com o objetivo de melhor previsão do parâmetro do DoB. Dentre os modelos testados todos possuíam as variáveis independentes de moldagem do corpo de prova (teor de RAP e temperatura de usinagem). O primeiro modelo teve como parâmetros de entrada, ou seja, como variáveis independentes, apenas o Módulo Dinâmico, a temperatura de usinagem e o teor de RAP. No segundo o modelo foram usados como parâmetros de entrada o módulo dinâmico, a temperatura de usinagem, o teor de RAP, a frequência e a temperatura do ensaio. Também foram gerados esses mesmos modelos com a adição da variável do ângulo de fase. O objetivo dessas modelagens é conseguir alcançar um modelo que melhor represente o parâmetro de interação entre os ligantes.

Além desses modelos que usavam apenas os parâmetros da moldagem do corpo de prova e do ensaio de Módulo Dinâmico, foi realizado um modelo que considera o ensaio de FTIR, por meio do índice de carbonila obtido pela Equação 25. Esse índice como já mencionado por Hettiarachchi *et al.* (2020) é um indicativo importante da interação entre os ligantes novo e envelhecido.

Vale destacar que como foi analisado essa interação, os modelos foram gerados somente com os teores de 25, 50 e 75% de RAP, visto que os outros teores analisados no estudo não existe a interação dos ligantes. A Tabela 31 apresenta a nomenclatura usado nos modelos para auxiliar na análise deles, posteriormente.

**Tabela 31** – Nomenclatura dos modelos de DoB

MODELOS	NOMENCLATURA
Módulo Dinâmico + Temperatura de usinagem + Teor de RAP	Modelo 01 DoB
Módulo Dinâmico + Temperatura de usinagem + Teor de RAP + Frequência + Temperatura de ensaio	Modelo 02 DoB
Módulo Dinâmico + Ângulo de fase + Temperatura de usinagem + Teor de RAP	Modelo 03 DoB
Módulo Dinâmico + Ângulo de fase + Temperatura de usinagem + Teor de RAP + Frequência + Temperatura de ensaio	Modelo 04 DoB
Módulo Dinâmico + Ângulo de fase + Temperatura de usinagem + Teor de RAP + Frequência + Temperatura de ensaio + índice de carbonila	Modelo 05 DoB

Fonte: Autor próprio (2023)

É importante destacar que para os modelos que não possuem as variáveis de frequência e temperatura o valor do módulo dinâmico e ângulo de fase utilizado foi o obtido pelo procedimento denominado *fingerprint*, onde o módulo é determinado nas condições de 10 Hz e 20°C.

Para todos os modelos foi verificado o  $R^2$  predito que indica em que medida um modelo de regressão prediz bem as respostas para as novas observações, pois os modelos possuem quantidades de preditores diferente e o aumento da quantidade dos parâmetros de entrada pode levar a modelar o ruído aleatório nos dados e causar o chamado sobreajuste do modelo produzindo valores de  $R^2$  ilusoriamente altos e uma capacidade reduzida de fazer previsões.

O  $R^2$  predito ajuda a determinar quando o modelo ajusta os dados originais, mas é menos capaz de produzir previsões válidas. Ele pode impedir que ocorra um sobreajuste ao modelo, pois como é impossível prever o ruído aleatório, o  $R^2$  predito deve apresentar uma redução quando se trata de modelo sobreajustado. Logo, se o  $R^2$  predito for muito mais baixo que o  $R^2$  regular indica que há termos demais no modelo.

Após finalizados os procedimentos de montagem dos modelos para prever o DoB foi feito o processo de calibração e validação para cada um dos modelos. Na calibração tenta-se fazer com que os resultados do modelo se assemelhem, ao máximo, aos resultados da medição em laboratório, ou seja foi feito um ajuste de parâmetros para que ele seja capaz de representar o DoB de maneira adequada, por isso foi feita a modelagem de diferentes modelos e escolhido aquele que melhor conseguiu representar o DoB. O modelo foi admitido como calibrado quando os seus resultados representaram, de forma próxima a realidade, o processo pretendido. É importante ressaltar que essa calibração foi realizada com os RAPs 01, 02 e 03.

Na próxima etapa que é a validação utilizou-se o modelo calibrado para realizar simulações de uma nova série de dados de laboratório que não seja aquela que foi usada na etapa de calibração. Ao comparar os resultados entre a simulação do modelo e as observações reais, foi possível ter ideia se o modelo realmente representa de forma real o processo modelado (VENKATESH *et al.*, 2011). Para realizar essa comparação foi calculado o DoB por meio apenas do ensaio do FTIR utilizando a metodologia de Hettiarachchi *et al.* (2020), que foi descrita no tópico anterior, utilizando as Equações 24, 25, 26 e 27.

Assim, foi realizada uma comparação entre o resultado de DoB encontrado com o modelo calibrado e aquele encontrado com o ensaio de FTIR utilizando as equações supracitadas. Para esta etapa de validação foi utilizado os resultados de módulo dinâmico e ângulo de fase do RAP 04, visto que os demais RAPs não podem ser usados para validação já que foram utilizados para a etapa de calibração do modelo.

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Neste capítulo são apresentados os resultados do ensaio de módulo dinâmico para os 04 tipos de RAPs estudados na pesquisas moldados nas diferentes temperatura de usinagem e no teor de RAP. Em seguida é apresentado os respectivos espectros de FITR das misturas estudadas e logo após, os resultados encontrados dos modelos de regressão linear múltipla e ângulo de fase para os 04 materiais fresados. Para finalizar é apresentado o modelo de previsão do DoB e sua respectiva calibração e validação.

### **4.1 Módulo Dinâmico**

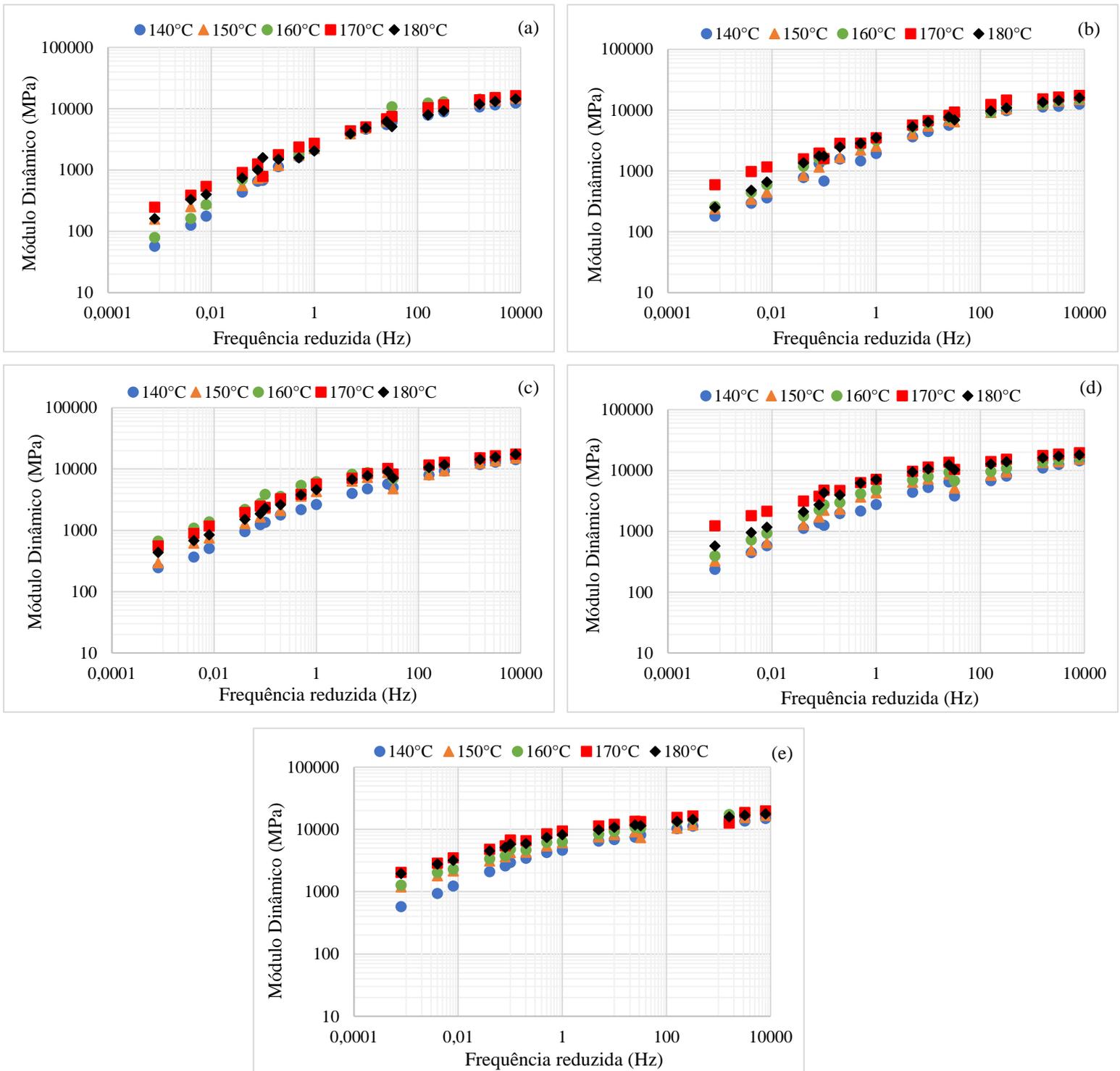
#### **4.1.1 RAP 01**

O módulo dinâmico é definido como a tensão máxima para a amplitude de deformação aplicada, e se relaciona com a rigidez dos corpos de prova analisados para as misturas asfálticas estudadas, por temperatura de ensaio. Por conta da susceptibilidade das misturas asfálticas, relacionadas ao comportamento viscoelástico do ligante, esta responde de maneira diferente a carregamentos estáticos e dinâmicos. Dessa maneira, para carregamentos lentos as respostas são mais viscosas, e para carregamentos rápidos as respostas são mais elásticas, logo o módulo dinâmico tende a crescer para as maiores frequências.

Para analisar os dados de módulo dinâmico é importante apontar algumas características. Altos valores de frequência reduzida correspondem ao comportamento nas baixas temperaturas, situações em que o material pode sofrer danos por retração, apresentando falhas por trincamento térmico. Baixos valores de frequência reduzida mostram o comportamento em altas temperaturas, quando o material asfáltico está mais suscetível às deformações permanentes, com redução da viscosidade do ligante, transferindo para a agregado maior parcela na resistência aos esforços. Frequências reduzidas médias correspondem às temperaturas intermediárias, que se referem ao comportamento à fadiga de misturas asfálticas (ZAPPE, 2020).

O ensaio foi realizado nas temperaturas de 4°C, 20°C e 40°C e as curvas isotermas foram transladas para a temperatura de referência de 20°C, dando origem às curvas mestras. Seguindo a norma do DNIT – ME 416/2019 os valores translidados para a esquerda são correspondentes às maiores temperaturas e os valores translidados para a direita às menores temperaturas. A Figura 27 mostra as curvas mestras para todos os teores de RAPs analisados nas diferentes temperaturas de usinagem.

Figura 27 - Módulo Dinâmico para os teores de RAP 01: 0% (a), 25% (b), 50% (c), 75% (d) e 100% (e)



Fonte: Autor próprio (2023)

As curvas mestras, em um quadro geral, indicam que os maiores resultados de módulo dinâmico foram encontrados para a temperatura de usinagem de 170°C em todos os teores analisados para o RAP 01. Esta foi a temperatura que teve o DoA máximo para o referido material,

ou seja, foi na temperatura de usinagem de 170°C que o ligante envelhecido do RAP estava totalmente disponível para mistura com o ligante novo adicionado.

Ao analisar a Figura 27a é possível observar que a mistura com 0% de RAP apresentou um comportamento semelhante em todas as temperaturas de usinagem nas frequências intermediárias. Para baixas temperaturas pode-se verificar uma significativa diferença para a temperatura de 170°C. Nas altas temperaturas se verifica uma diferença maior entre todas as temperaturas de usinagem analisadas, ficando evidente o aumento do módulo com o aumento da temperatura de usinagem até um limite de 170°C, reduzindo o seu valor para a temperatura de 180°C. Nessa temperatura pode ter acontecido a oxidação do ligante, pois sua temperatura de usinagem ideal, determinada por meio viscosidade do ligante apresentada na Tabela 1, é de 167°C.

Na mistura de 100% de material fresado (Figura 27e) verifica-se o aumento do módulo dinâmico com o aumento da temperatura de usinagem até 170°C em todas as faixas de frequência, sendo observada mais notoriamente essa diferença nas altas temperaturas de ensaio. Essa situação acontece nas demais misturas, onde na mistura com 25% de RAP (Figura 27b) é possível observar que nas baixas temperaturas e na de referência os valores de módulo não se diferenciam muito e em altas temperaturas essa diferença é maior. Com o aumento do teor de RAP para 50% (Figura 27c) e 75% (Figura 27d) a diferença da rigidez com a mudança da temperatura de usinagem é observada de maneira evidente em toda a faixa de frequência.

Em todas as curvas foi utilizado os modelos de regressão logarítmicos apresentados na Tabela 32 com as equações de regressão para cada mistura estudada e seus respectivos R<sup>2</sup>.

**Tabela 32** - Equações de regressão e R<sup>2</sup> para as curvas mestras do Módulo Dinâmico

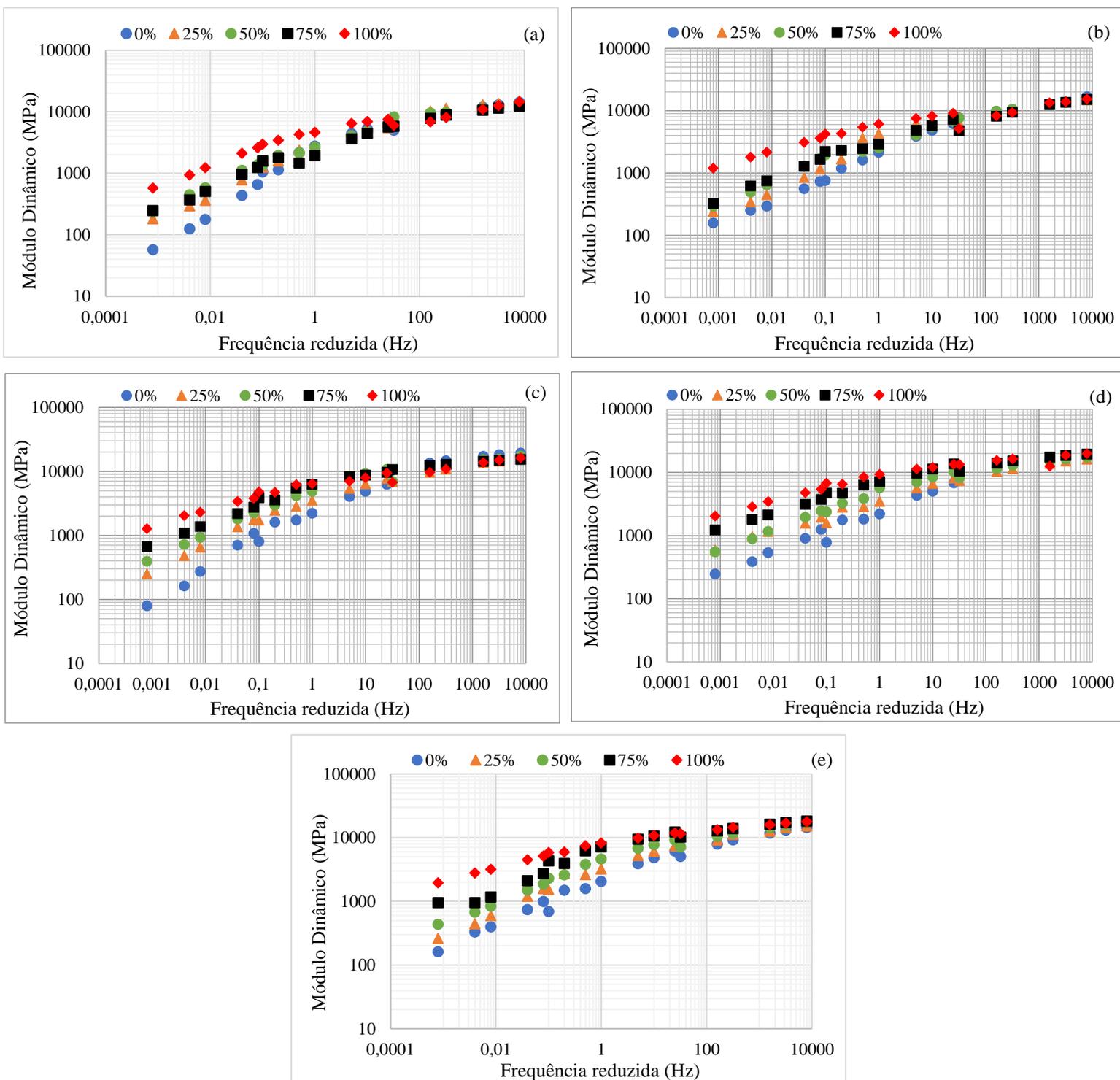
Teor de RAP (%)	Temperatura de Usinagem (°C)	Equação	R <sup>2</sup>
0	140	$y = 882,11 \ln(x) + 3396$	0,8775
	150	$y = 968,57 \ln(x) + 3808,2$	0,8903
	160	$y = 1075,2 \ln(x) + 4254,7$	0,9032
	170	$y = 1222,6 \ln(x) + 4964,3$	0,8923
	180	$y = 922,47 \ln(x) + 3785$	0,9008
25	140	$y = 911,4 \ln(x) + 3981,8$	0,9191
	150	$y = 981,51 \ln(x) + 4365,6$	0,9357
	160	$y = 1003,2 \ln(x) + 4734,6$	0,9445
	170	$y = 1045,4 \ln(x) + 5194,5$	0,9358
	180	$y = 1025,7 \ln(x) + 4859,2$	0,9424
50	140	$y = 806,38 \ln(x) + 3827,6$	0,9407
	150	$y = 938,54 \ln(x) + 4842,6$	0,9266
	160	$y = 1107,4 \ln(x) + 5754,4$	0,9526
	170	$y = 1141,1 \ln(x) + 6084,5$	0,9614
	180	$y = 1097,5 \ln(x) + 5519,9$	0,9505
75	140	$y = 1003,2 \ln(x) + 4395,3$	0,9135
	150	$y = 1087,7 \ln(x) + 4797$	0,9038
	160	$y = 1265 \ln(x) + 7009,1$	0,9726
	170	$y = 1245,4 \ln(x) + 7933,9$	0,9729
	180	$y = 1199,6 \ln(x) + 7119,7$	0,9780
100	140	$y = 802,08 \ln(x) + 5109,6$	0,9893
	150	$y = 926,66 \ln(x) + 6501,6$	0,9854
	160	$y = 956,98 \ln(x) + 6916,1$	0,9887
	170	$y = 1098,9 \ln(x) + 9100,6$	0,9444
	180	$y = 1033,7 \ln(x) + 8257,9$	0,9943

**Fonte:** Autor próprio (2023)

Com a Tabela 32 pode-se verificar que todas as equações apresentam valores de R<sup>2</sup> elevados, com destaque para o teor de 100% de RAP que apresenta os melhores coeficientes de determinação. Esses resultados corroboram com o encontrados nos gráficos da Figura 27 onde as maiores dispersões são apontadas nas misturas sem material fresado e nas misturas de 75% para as temperaturas de usinagem de 140 e 150°C.

Na Figura 28 é apresentada as curvas mestras mostradas anteriormente separadas por teores de RAP.

**Figura 28** - Módulo Dinâmico para as temperaturas de usinagem: 140°C (a), 150°C (b), 160°C (c), 170°C (d) e 180°C (e)



**Fonte:** Autor próprio (2023)

Na Figura 28 é possível verificar que o módulo dinâmico cresce em função da frequência tal qual o apresentado na Figura 28. Este crescimento se deve ao fato de que, quando a frequência é aumentada, existe um menor tempo em carga, ou seja, não há tempo para manifestações de deformações viscoelásticas. Além disso, quando a frequência é muito alta, os valores de módulo

atingem seu maior pico, ou seja, praticamente só existem deformações elásticas no material, sem relaxação. Ainda, em baixas frequências, o tempo de carregamento é maior, assim, as deformações viscoelásticas podem se manifestar em sua totalidade, o que provoca um módulo dinâmico menor. O menor valor verificado para o módulo dinâmico é encontrado nas frequências mais baixas, o que explica o formato das curvas mestras (MANAU *et al.*, 2018).

Ao analisar a adição de material fresado é possível perceber que o módulo dinâmico aumenta com a adição de RAP, devido ser material mais rígido a tendência é ele elevar a rigidez da mistura final. Porém na temperatura de usinagem de 160°C (Figura 28c) é observada uma rigidez maior para a mistura com 50% nas intermediárias e altas frequências. Este resultado inesperado, visto que a adição de fresado nas misturas tende a aumentar a rigidez, foi também observado na pesquisa de Centofane *et al.* (2018) onde amostras com 10% de fresado apresentaram-se mais rígidas do que as misturas com 20%. Esse fato pode ser explicado devido à heterogeneidade do material reciclado (CENTOFANE *et al.*, 2018).

Os resultados dos ensaios indicam que a adição de fresado em misturas asfálticas afeta o módulo e aumenta a rigidez, visto que a mistura menos rígida foi a que não apresentava material fresado em sua composição. Esse aumento de rigidez para as altas temperaturas pode indicar um melhor desempenho para solicitações de deformação permanente. No entanto, para as baixas temperaturas (altas frequências) esse aumento de rigidez pode significar que as misturas podem ser mais suscetíveis aos efeitos do comportamento à fadiga (ZAPPE, 2020).

Para Luzzi (2019) a adição de RAP na mistura asfáltica é positiva no Módulo Dinâmico, porém o autor afirma que não é possível definir comportamento referente as parcelas elásticas e viscosas em relação ao RAP, em função dos teores de fresado utilizados. Suzuki (2019) obteve a redução dos valores para misturas com baixos teores de RAP (sem aquecimento prévio do fresado na etapa de usinagem), e aumento do módulo para misturas com altos teores de RAP (com aquecimento prévio do fresado na etapa usinagem). O autor atribui o aumento da rigidez das misturas no ensaio ao aquecimento prévio do RAP e, conseqüentemente, associado à ativação do ligante do fresado utilizado, deixando-o disponível para interagir com os materiais novos.

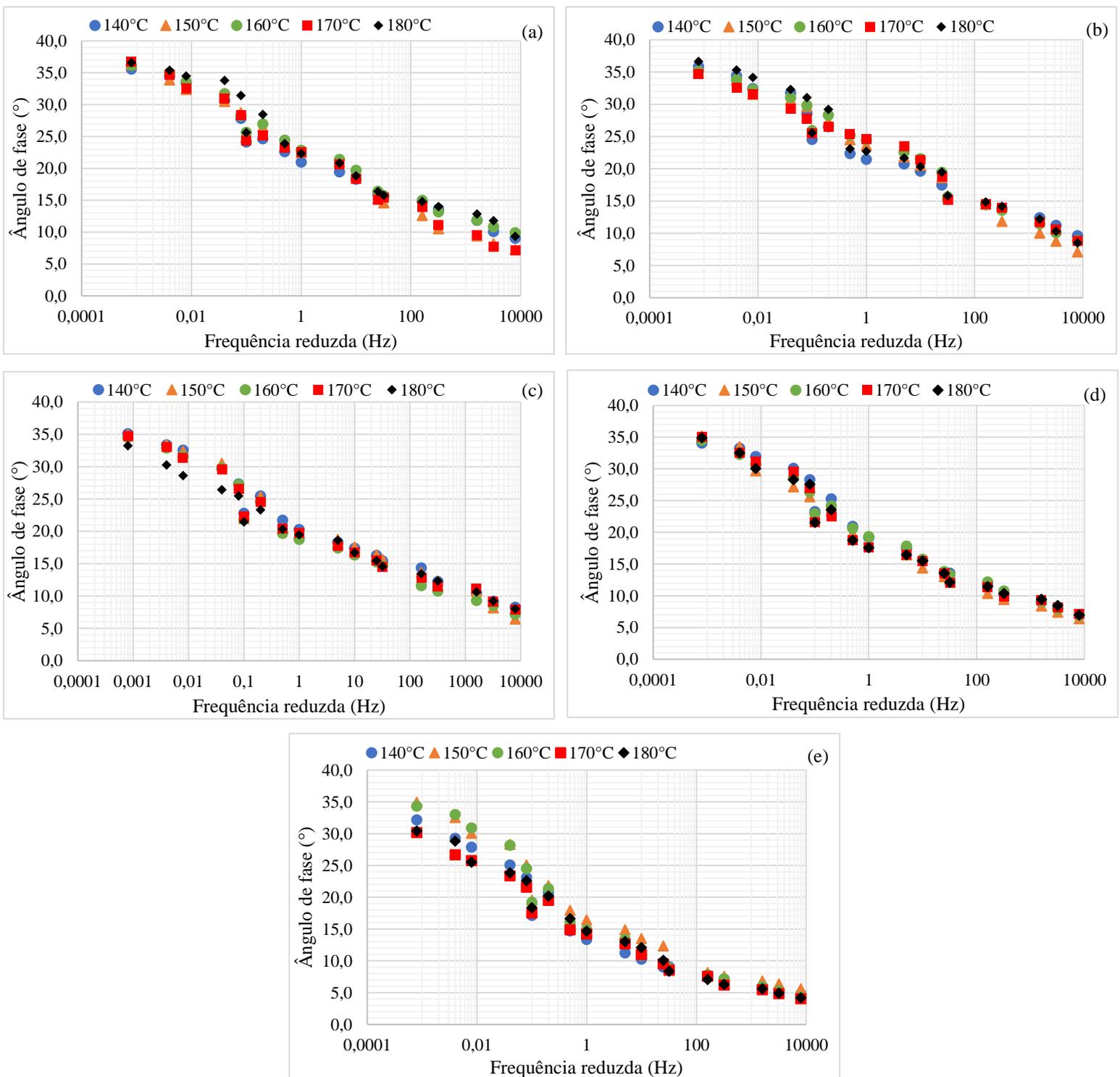
Alvani *et al.* (2016) analisaram misturas com fresados compostos com ligante que tinham borracha em sua composição e concluíram que ocorre aumento da rigidez das misturas asfálticas com o aumento de fresado com borracha, mas que as variações de rigidez ocorrem dependendo do tipo de RAP usado.

As curvas mestras do ângulo também caracterizam a rigidez da mistura asfáltica por meio da frequência, aplicação de carga e temperatura de ensaio. Segundo Boeira (2018) o ângulo de fase está relacionado as propriedades elásticas e viscosas dos materiais asfálticos. O autor explica que,

a baixas temperaturas, o comportamento dos materiais viscoelásticos lineares homogêneos tende à elasticidade, representando o ângulo de fase por  $\varphi = 0$ . Já para as altas temperaturas, o comportamento tende à viscosidade, ou seja, representado por  $\varphi = 90^\circ$ . Este comportamento é válido para os ligantes asfálticos, mas no caso das misturas asfálticas, que é um material compósito, o intertravamento dos agregados impede que isto ocorra. Assim, o que acontece é que, nas frequências baixas (temperaturas altas) a defasagem do ângulo de fase aumenta, enquanto nas frequências mais altas (temperaturas baixas) acontece o inverso.

A Figura 29 mostra os resultados dos ângulos de fases do RAP 01 analisados em teores e temperaturas de usinagem diferentes. Em todas as amostras analisadas é possível observar valores semelhantes para os ângulos de fase, com um aumento da diferença desse parâmetro para as altas temperaturas de ensaio. Para as baixas temperaturas é possível verificar que as amostras com 50, 75 e 100% praticamente não tiveram diferenças significativas para as diferentes temperaturas de usinagem estudadas. Já para as amostras de 0 e 25% verifica-se uma diferença, porém sem um padrão para as temperaturas de usinagem.

Figura 29 – Ângulo de fase para os teores de RAP: 0% (a), 25% (b), 50% (c), 75% (d) e 100% (e)



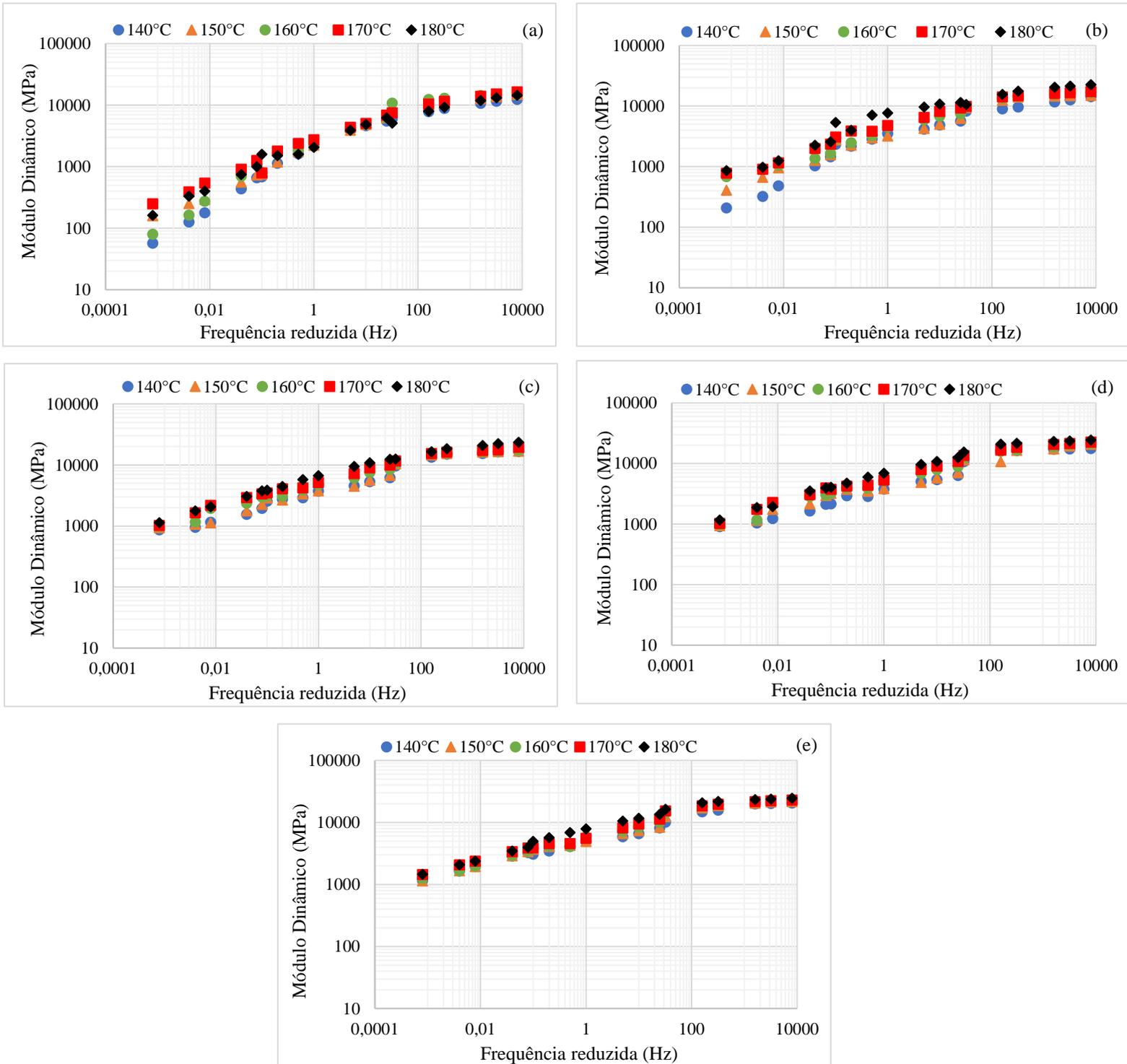
Fonte: Autor próprio (2023)

#### 4.1.2 RAP 02

Para o RAP 02 os ensaios também foram realizados nas temperaturas de 4°C, 20°C e 40°C e as curvas isotermas foram transladas para uma temperatura de referência de 20°C, originando às

curvas mestras. As curvas mestras ajustadas nas diferentes temperaturas de usinagem do módulo dinâmico são apresentadas na Figura 30.

**Figura 30** - Módulo Dinâmico para os teores de RAP 02: 0% (a), 25% (b), 50% (c), 75% (d) e 100% (e)



**Fonte:** Autor próprio (2023)

Para todas as misturas avaliadas neste estudo, com os diferentes teores de RAP e diferentes temperaturas de usinagem, o módulo diminuiu com o aumento da temperatura de usinagem e com o acréscimo da frequência de carregamento. Percebe-se que os maiores valores de módulo dinâmico são na temperatura de usinagem de 180°C em todos os teores de RAP analisados, temperatura esta que apresentou o 100% DoA. Assim como no RAP 01, os maiores valores de módulo foram na temperatura em que o ligante envelhecido do RAP estava totalmente disponível para a mistura com o ligante novo, em todas as faixas de frequência.

Com o aumento do teor de RAP é possível observar que nas altas temperaturas de ensaio (baixos valores de frequência reduzida) a diferença dos ângulos de fase observado entre as temperaturas de usinagem fica menor. De maneira geral, como as baixas frequências estão relacionadas às deformações viscoelásticas e a ocorrência de deformação permanente, logo o aumento de RAP e a altas temperaturas de usinagem deixam a mistura mais resistente à deformação permanente.

Assim como para o RAP 01, foi verificado para o RAP 02 os modelos de regressão logarítmicos. A Tabela 33 foi feita com as equações de regressão para cada mistura do RAP 02 e seus respectivos R<sup>2</sup>.

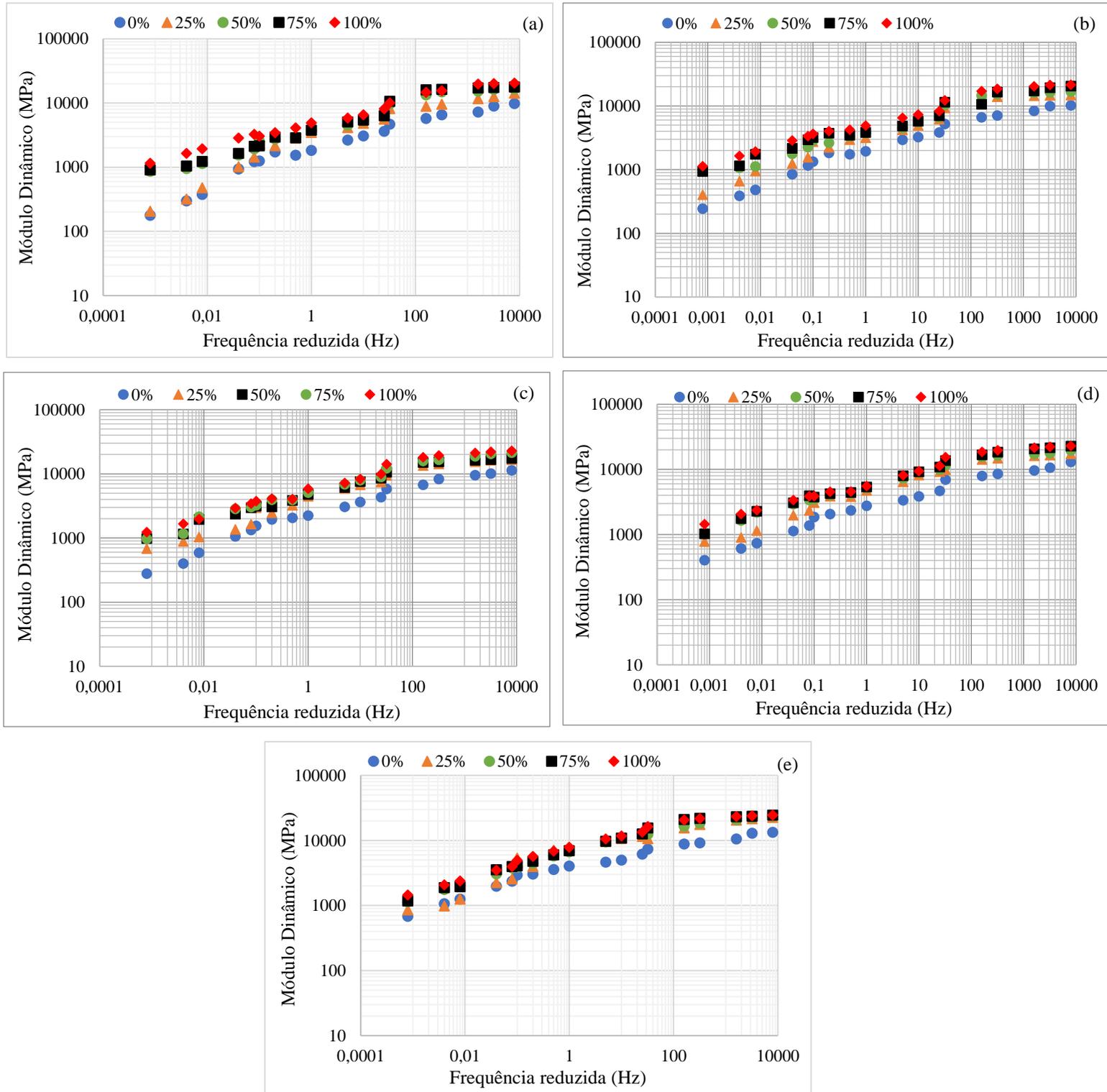
**Tabela 33** - Equações de regressão para as curvas mestras de Módulo Dinâmico para o RAP 02

Teor de RAP (%)	Temperatura de Usinagem (°C)	Equação	R <sup>2</sup>
0	140	$y = 882,11 \ln(x) + 3396$	0,8775
	150	$y = 968,57 \ln(x) + 3808,2$	0,8903
	160	$y = 1075,2 \ln(x) + 4254,7$	0,9032
	170	$y = 1222,6 \ln(x) + 4964,3$	0,8923
	180	$y = 922,47 \ln(x) + 3785$	0,9008
25	140	$y = 904,68 \ln(x) + 4322,1$	0,8373
	150	$y = 1075,7 \ln(x) + 5105,9$	0,8977
	160	$y = 1168,6 \ln(x) + 5771,8$	0,9283
	170	$y = 1190,9 \ln(x) + 6320,3$	0,9504
	180	$y = 1475,2 \ln(x) + 8059,8$	0,9604
50	140	$y = 1151,4 \ln(x) + 5566,8$	0,8877
	150	$y = 1184,8 \ln(x) + 5846,3$	0,8850
	160	$y = 1194,9 \ln(x) + 6491,3$	0,9278
	170	$y = 1263,8 \ln(x) + 7175,2$	0,9453
	180	$y = 1526,7 \ln(x) + 8441,3$	0,9591
75	140	$y = 1271,4 \ln(x) + 6018,2$	0,8700
	150	$y = 1283,3 \ln(x) + 6336,7$	0,8709
	160	$y = 1399,7 \ln(x) + 7259,2$	0,9235
	170	$y = 1492,7 \ln(x) + 8023,0$	0,9348
	180	$y = 1691,7 \ln(x) + 9229,1$	0,9421
100	140	$y = 1334,4 \ln(x) + 6879,0$	0,8951
	150	$y = 1457,0 \ln(x) + 7517,8$	0,8975
	160	$y = 1547,4 \ln(x) + 8046,2$	0,9138
	170	$y = 1549,7 \ln(x) + 8483,9$	0,9237
	180	$y = 1675,5 \ln(x) + 9670,5$	0,9554

Fonte: Autor próprio (2023)

Com essa Tabela 33 é possível verificar que todas as equações possuem valor de R<sup>2</sup> elevado, com destaque para as maiores temperaturas de usinagem, pois pode-se observar que este parâmetro cresceu à medida que houve um aumento da temperatura de usinagem. Como o R<sup>2</sup> indica a percentagem da variação do módulo dinâmico, esses valores podem indicar que em todas as misturas com material fresado o aumento da temperatura de usinagem proporciona valores com menores variação. Na Figura 31 é mostrada as curvas mestras analisando os diferentes teores de RAP em cada temperatura de usinagem para uma melhor avaliação.

**Figura 31** - Módulo Dinâmico para as temperaturas de usinagem: 140°C (a), 150°C (b), 160°C (c), 170°C (d) e 180°C (e)



**Fonte:** Autor próprio (2023)

A Figura 31 indica que o módulo dinâmico aumenta em função da frequência, ou seja, aumenta com a redução da temperatura de ensaio. Ao verificar o acréscimo do teor de RAP 02 é observado que o módulo dinâmico cresce com o aumento do material fresado para todas as

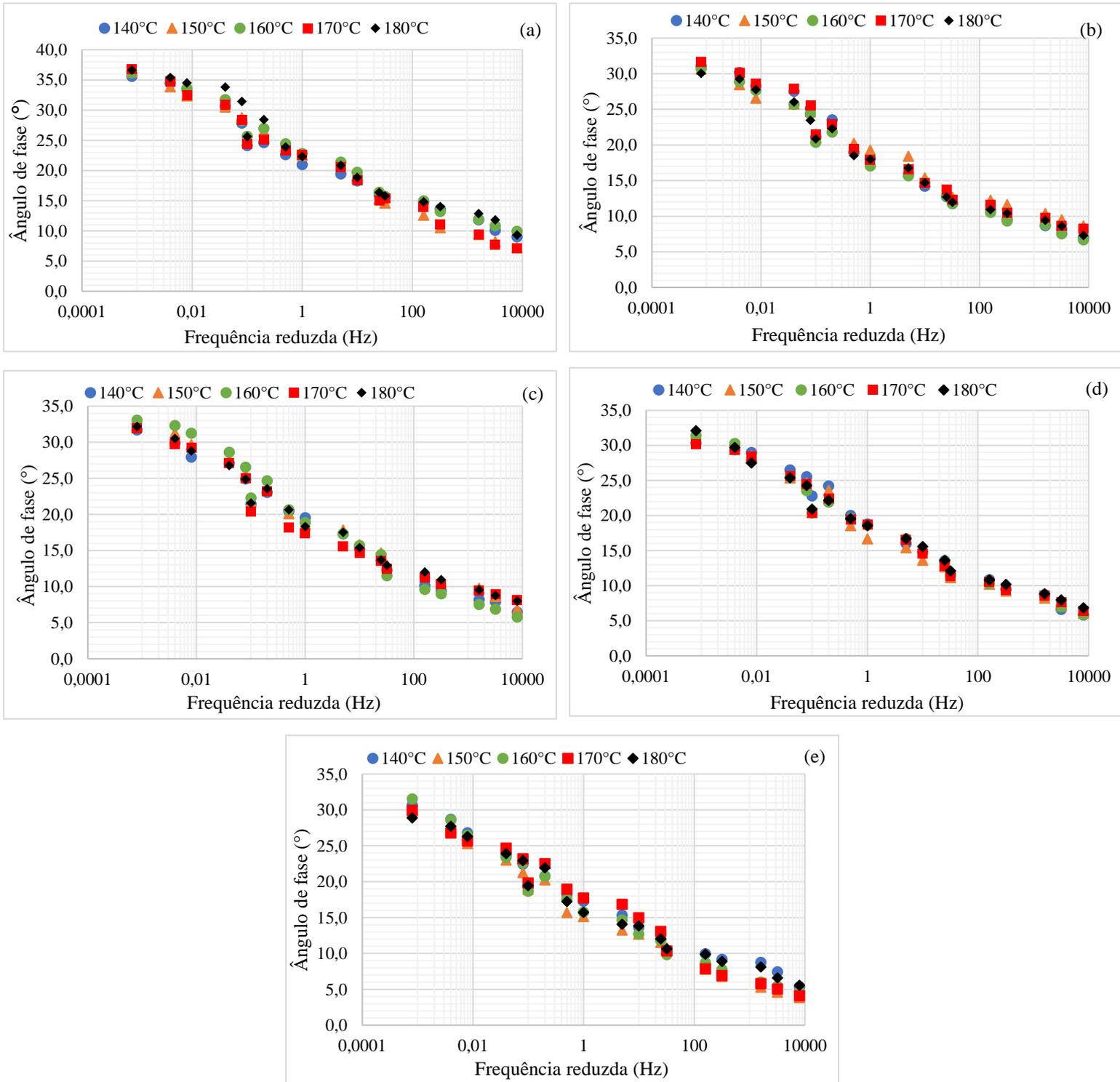
temperaturas de usinagem analisadas. Essa situação já era esperada, pois o RAP é um material mais rígido ocorrendo a tendência de aumentar a rigidez da mistura final. Com a elevação da rigidez o revestimento asfáltico com adições de material fresado fica mais resistente à deformação permanente em altas temperaturas e baixa frequência. No entanto, é necessário realizar ensaios de fadiga para verificar esse efeito, pois em temperaturas e frequências intermediárias, a mistura com material fresado pode aumentar a susceptibilidade da mistura ao trincamento por fadiga (ZAPPE, 2020).

O ângulo de fase é relacionado também com as propriedades elásticas e viscosas dos materiais asfálticos. As variações nos valores de ângulo de fase, assim como de módulo dinâmico, são mais pronunciadas em baixas frequências reduzidas (e, portanto, altas temperaturas) do que em altas frequências reduzidas (e, portanto, baixas temperaturas). Para Sahebzamani *et al.* (2022) essa tendência é esperada, pois, em baixas frequências reduzidas ou altas temperaturas o comportamento do revestimento asfáltico está relacionado ao ligante, sendo que este componente no presente estudo foi influenciado pelo ligante envelhecido presente no material fresado. Para Nemati *et al.* (2020) o ponto de pico do ângulo de fase é considerado a extensão máxima do comportamento viscoso de uma mistura e depende do tamanho e graduação do agregado, tipo de ligante e teor, dentre outras propriedades da mistura.

Na Figura 32 é apresentado os ângulos de fases do RAP 02 analisados em teores e temperaturas de usinagem diferentes. Os valores desse parâmetro, para esse RAP, foram semelhantes aos do RAP 01, porém é possível pontuar algumas diferenças importantes. Para as altas temperaturas nas misturas com 25% de fresado (Figura 32(b)), os valores mais elevados são obtidos na temperatura de usinagem de 170°C e para os demais teores de RAP esses maiores valores são verificados na temperatura de 160°C. Para as baixas temperaturas (altas frequências reduzidas) não existe uma tendência nas diferentes temperaturas de usinagem e teores de material fresado.

De maneira geral, os valores absolutos do ângulo de fase são semelhantes para todas as misturas analisadas em diferentes quantidades de RAP, porém ao verificar a temperatura de usinagem não é verificado uma tendência com o aumento da quantidade de material fresado.

**Figura 32** - Ângulo de fase para os teores de RAP 02: 0% (a), 25% (b), 50% (c), 75% (d) e 100% (e)



**Fonte:** Autor próprio (2023)

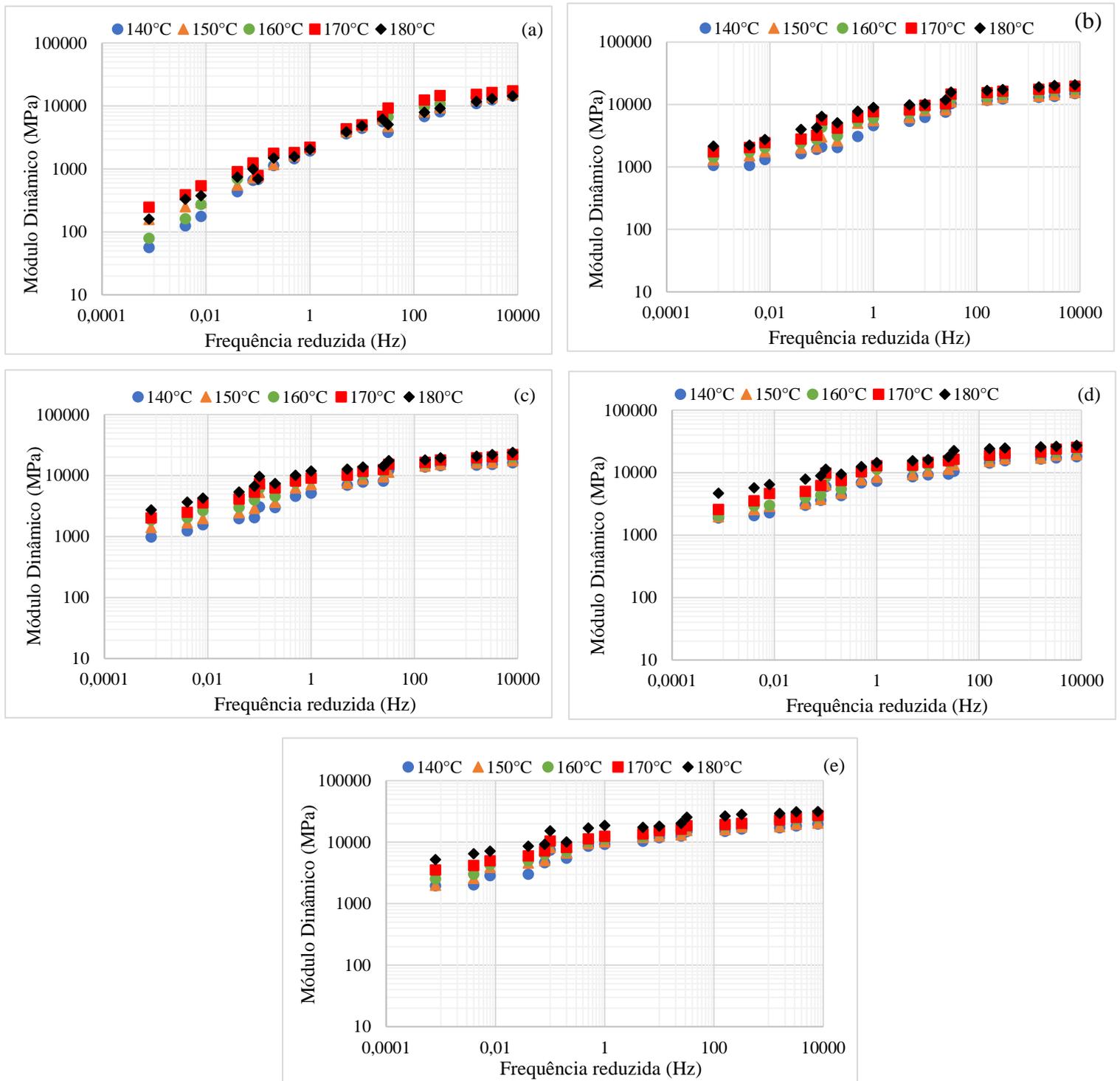
Não foi possível definir um comportamento, diretamente proporcional às adições de RAP nas misturas, com os resultados de módulo dinâmico e ângulo de fase. Os resultados obtidos indicaram apenas que misturas com material fresado apresentam módulos elevados, com maior

capacidade de resistência. Por isso, foi desenvolvido, por meio de regressão múltipla, item 4.3, modelos que permitam analisar esses parâmetros.

#### **4.1.3 RAP 03**

Para o RAP 03 a Figura 33 mostra as curvas mestras das misturas com esse material fresado, assim como nos outros, o ensaio foi realizado nas temperaturas de 4°C, 20°C e 40°C e as curvas isotermas foram transladas para uma temperatura de referência de 20°C, originando às curvas mestras.

**Figura 33** - Módulo Dinâmico para os teores de RAP 03: 0% (a), 25% (b), 50% (c), 75% (d) e 100% (e)



**Fonte:** Autor próprio (2022)

Ao analisar os valores de módulo dinâmico desse RAP é possível perceber que ele possui uma maior rigidez quando comparado aos outros três materiais fresados analisados nessa pesquisa. Porém, ele continua com a mesma tendência: redução do módulo com o aumento da temperatura de ensaio e aumento da rigidez com o acréscimo da frequência de carregamento.

Com o aumento do teor de RAP é possível observar que nas altas temperaturas de ensaio (baixos valores de frequência reduzida) a diferença entre as temperaturas de usinagem fica menor. De maneira geral, como as baixas frequências estão relacionadas às deformações viscoelásticas e a ocorrência de deformação permanente, logo o aumento de RAP e a altas temperaturas de usinagem deixam a mistura mais resistente à deformação permanente. Também é possível analisar que em todas as misturas contendo o RAP seus maiores resultados são para a temperatura de usinagem de 180°C, sendo esta àquela onde o ligante envelhecido estava disponível na sua totalidade para interagir com o ligante novo (DoA = 100%).

Assim como para o RAP 01 e RAP 02, foi verificado para o RAP 03 os modelos de regressão logarítmicos. A Tabela 34 foi feita com as equações de regressão para cada mistura do RAP 02 e seus respectivos R<sup>2</sup>.

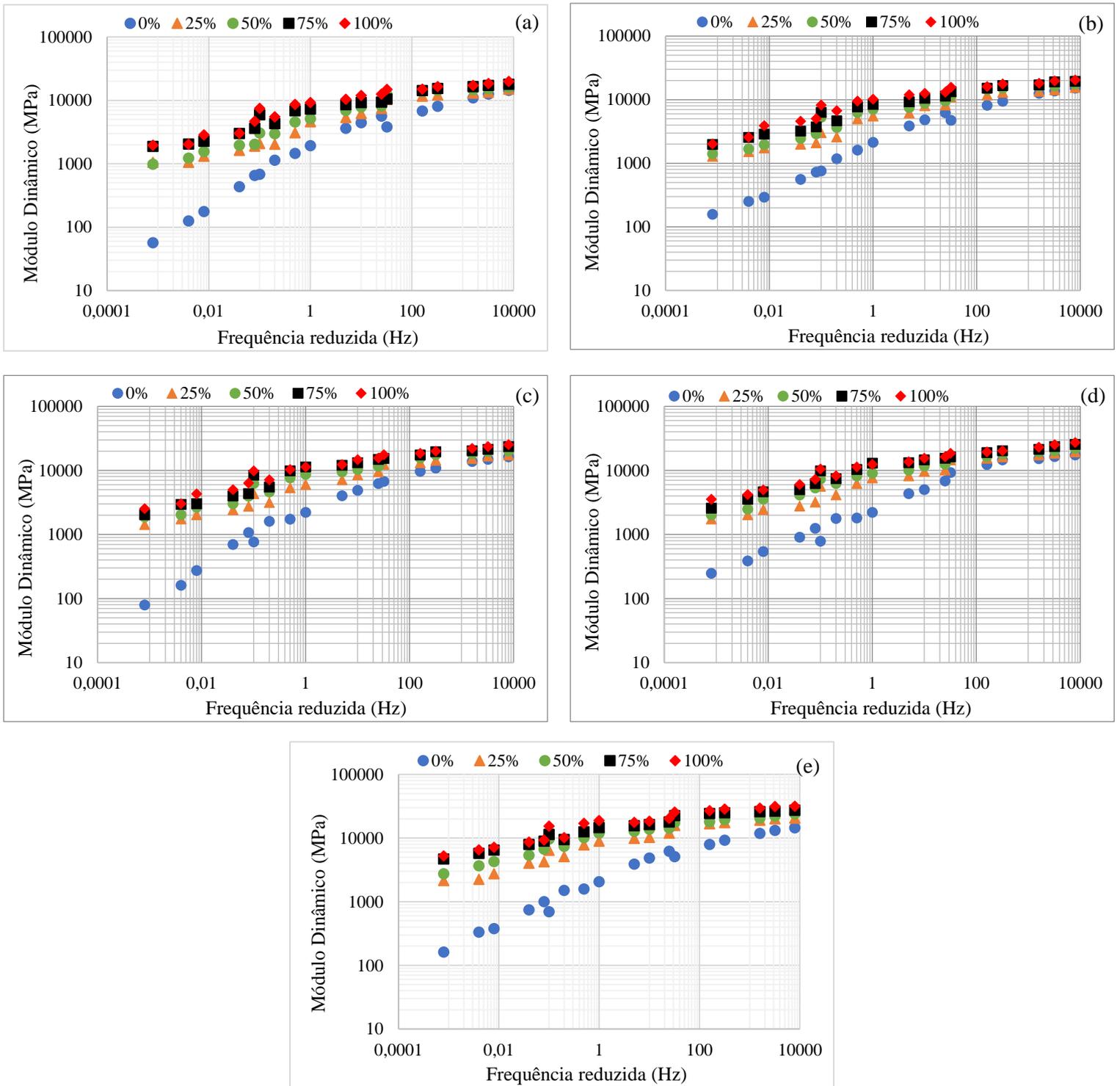
**Tabela 34** - Equações de regressão para as curvas mestras de Módulo Dinâmico para o RAP 03

Teor de RAP (%)	Temperatura de Usinagem (°C)	Equação	R <sup>2</sup>
0	140	$y = 882,11 \ln(x) + 3396$	0,8775
	150	$y = 968,57 \ln(x) + 3808,2$	0,8903
	160	$y = 1075,2 \ln(x) + 4254,7$	0,9032
	170	$y = 1222,6 \ln(x) + 4964,3$	0,8923
	180	$y = 922,47 \ln(x) + 3785$	0,9008
25	140	$y = 988,19 \ln(x) + 5285,6$	0,9315
	150	$y = 1003,3 \ln(x) + 5997,9$	0,9483
	160	$y = 1124,6 \ln(x) + 6865,4$	0,9496
	170	$y = 1248,4 \ln(x) + 7952,4$	0,9537
	180	$y = 1304,4 \ln(x) + 8935,9$	0,9633
50	140	$y = 1117,8 \ln(x) + 6287,9$	0,9350
	150	$y = 1142,0 \ln(x) + 7231,6$	0,9511
	160	$y = 1296,5 \ln(x) + 8603,0$	0,9638
	170	$y = 1323,3 \ln(x) + 9463,9$	0,9778
	180	$y = 1365,6 \ln(x) + 11076$	0,9790
75	140	$y = 1131 \ln(x) + 7676,0$	0,9587
	150	$y = 1214,3 \ln(x) + 8444,9$	0,9645
	160	$y = 1425,6 \ln(x) + 10194$	0,9706
	170	$y = 1462,6 \ln(x) + 11437$	0,9786
	180	$y = 1585,0 \ln(x) + 14074$	0,9807
100	140	$y = 1207,3 \ln(x) + 8900,7$	0,9743
	150	$y = 1230,2 \ln(x) + 9785,9$	0,9742
	160	$y = 1501,9 \ln(x) + 11598$	0,9763
	170	$y = 1591,5 \ln(x) + 12735$	0,9787
	180	$y = 1821,2 \ln(x) + 16326$	0,9826

Fonte: Autor próprio (2023)

Na Tabela 34 é possível observar que todas as misturas com o material fresado apresentaram valores superiores a 0,90 para o  $R^2$  sendo que à medida que se aumentou a quantidade de RAP na mistura houve uma menor variação dos resultados, vale lembrar que para cada mistura foram feitos 3 ensaios de Módulo Dinâmico. Isso indica que a maior quantidade de RAP na mistura tende a proporcionar uma mistura com menos variabilidade nos resultados. É possível verificar também que, independentemente da quantidade de material fresado na mistura, houve um aumento do  $R^2$  para o aumento da temperatura de usinagem, indicando também o acréscimo na temperatura de usinagem gera dados com menor variação. Na Figura 34 é mostrada as curvas mestras parciais com os diferentes teores de material fresado em cada temperatura de usinagem.

**Figura 34** - Módulo Dinâmico para as temperaturas de usinagem: 140°C (a), 150°C (b), 160°C (c), 170°C (d) e 180°C (e)

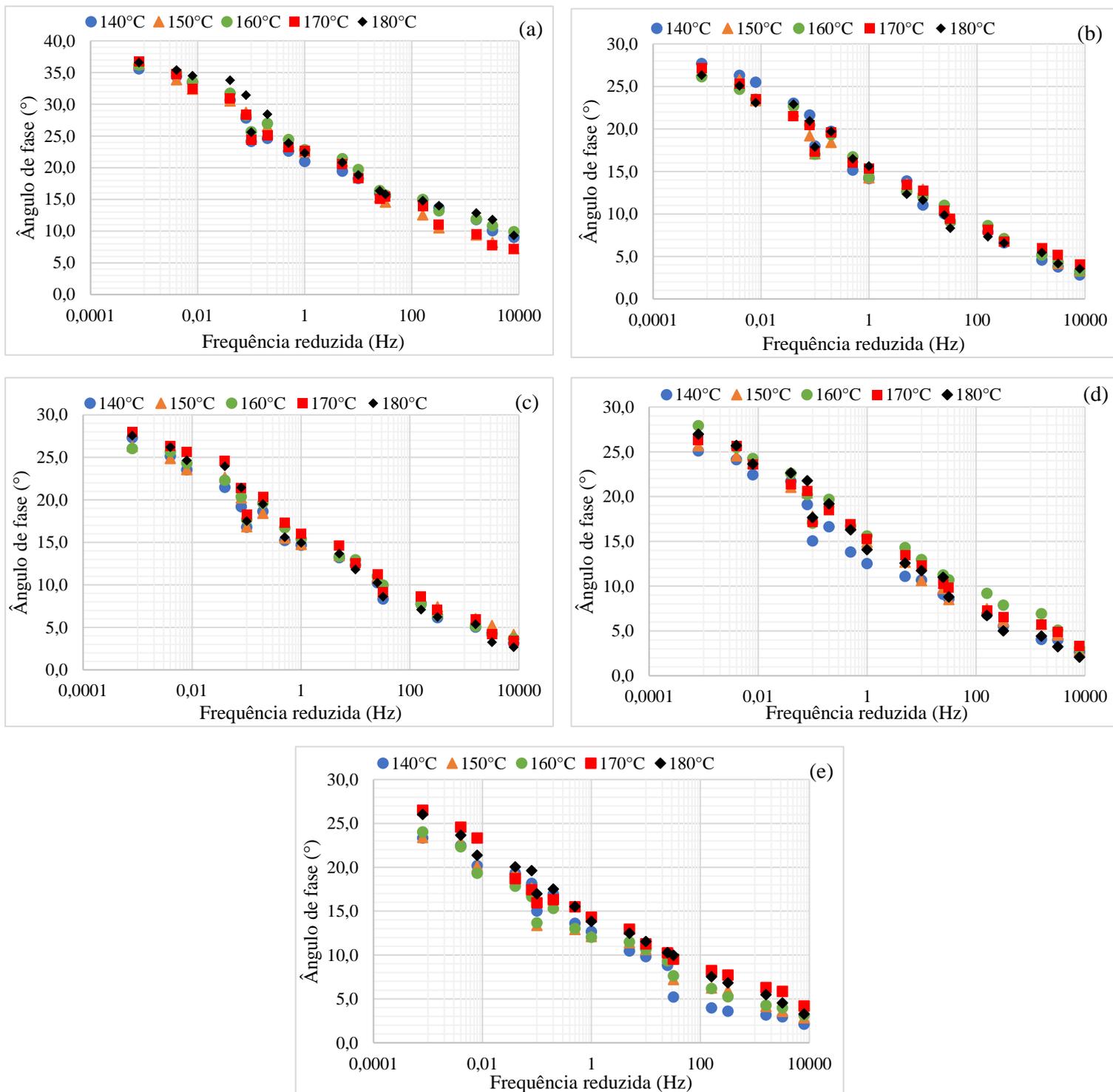


**Fonte:** Autor próprio (2023)

Na Figura 34 fica evidente que a rigidez da mistura cresce com a diminuição da temperatura de ensaio, assim como também cresce com o aumento da quantidade de RAP introduzido na mistura asfáltica, em todas as temperaturas de usinagem analisadas. Esse aumento é proporcional

ao teor de RAP, quanto mais material fresado é adicionado maior a rigidez da mistura. É importante destacar que como esse RAP apresentou valores muito elevados de módulo dinâmico é fundamental a realização do ensaio de fadiga para analisar seu comportamento, pois com esse aumento elevado da rigidez a mistura pode ficar mais susceptível ao trincamento por fadiga (ABDALFATTAH *et al.*, 2021). Figura 35 é apresentado as curvas do ângulo de fase desse material, que assim como nos demais materiais fresados, é importante para relacionar as propriedades elásticas e viscosas das misturas asfálticas.

**Figura 35** - Ângulo de fase para os teores de RAP 03: 0% (a), 25% (b), 50% (c), 75% (d) e 100% (e)



**Fonte:** Autor próprio (2023)

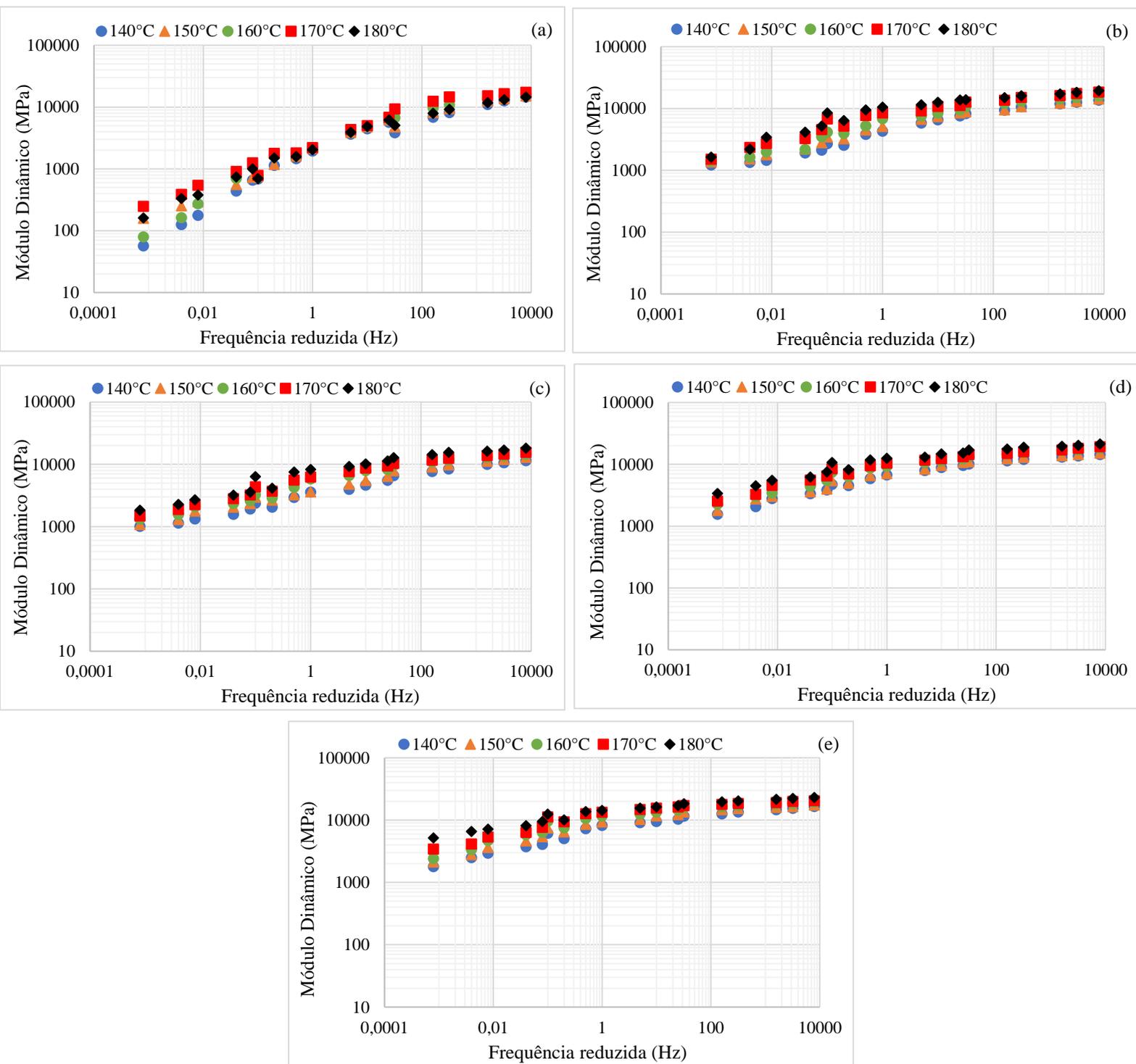
É possível verificar que nas altas temperaturas (baixas frequências reduzidas) acontece maiores variações desse parâmetro. Essa situação também foi vista nos outros materiais fresados e já era esperada devido a influência do ligante envelhecido (NEMATI *et al.*, 2020). Nas demais frequências reduzidas é visto uma tendência de maiores valores para as temperaturas de usinagem

mais elevadas, mas sem um padrão. De maneira geral, nas amostras com 25, 50 e 75% de RAP os valores absolutos do ângulo de fase são semelhantes, porém nas misturas com 0 e 100% elas se diferenciam e ao verificar a temperatura de usinagem de todas as cinco misturas não é verificado uma tendência com o acréscimo do teor de RAP.

#### **4.1.4 RAP 04**

Assim como para os outros RAPs, para o RAP 04 foi realizado o ensaio de Módulo Dinâmico nas temperaturas de 4°C, 20°C e 40°C e as curvas isotermas foram transladas para a temperatura de referência de 20°C, gerando as curvas mestras para as diferentes misturas feita com o RAP 04. Vale destacar que assim como nos outros materiais foi usado a norma de referência do DNIT – ME 416/2019. A Figura 36 apresenta as curvas para todas as quantidades desse RAP analisadas nas variadas temperaturas de usinagem.

Figura 36 - Módulo Dinâmico para os teores de RAP 04: 0% (a), 25% (b), 50% (c), 75% (d) e 100% (e)



Fonte: Autor próprio (2023)

De um modo geral, assim como foi verificado nos demais materiais fresados, o módulo dinâmico reduziu com o aumento da temperatura de ensaio, ou seja, os maiores valores para todas

as misturas foram encontrados quando o ensaio foi realizado a 4°C. além disso, o módulo cresceu com o aumento da frequência de carregamento.

Quando analisada as misturas por quantidade de material fresado é possível observar que os maiores módulos foram na temperatura de usinagem de 180°C, sendo esta temperatura àquela onde todo o ligante do RAP estava apto a misturar com o ligante 50/70 virgem, pois esta foi a temperatura onde o DoA encontrado foi de 100%. Logo foi verificada a mesma tendência encontrada nos outros RAPs estudados para todas as faixas de frequência, que os maiores resultados de módulo dinâmico foram na temperatura onde o DoA foi de 100%.

Para o RAP 04 também foi encontrado os modelos de regressão logarítmicos e seus respectivos R<sup>2</sup> como mostra a Tabela 35.

**Tabela 35** - Equações de regressão para as curvas mestras de Módulo Dinâmico para o RAP 0

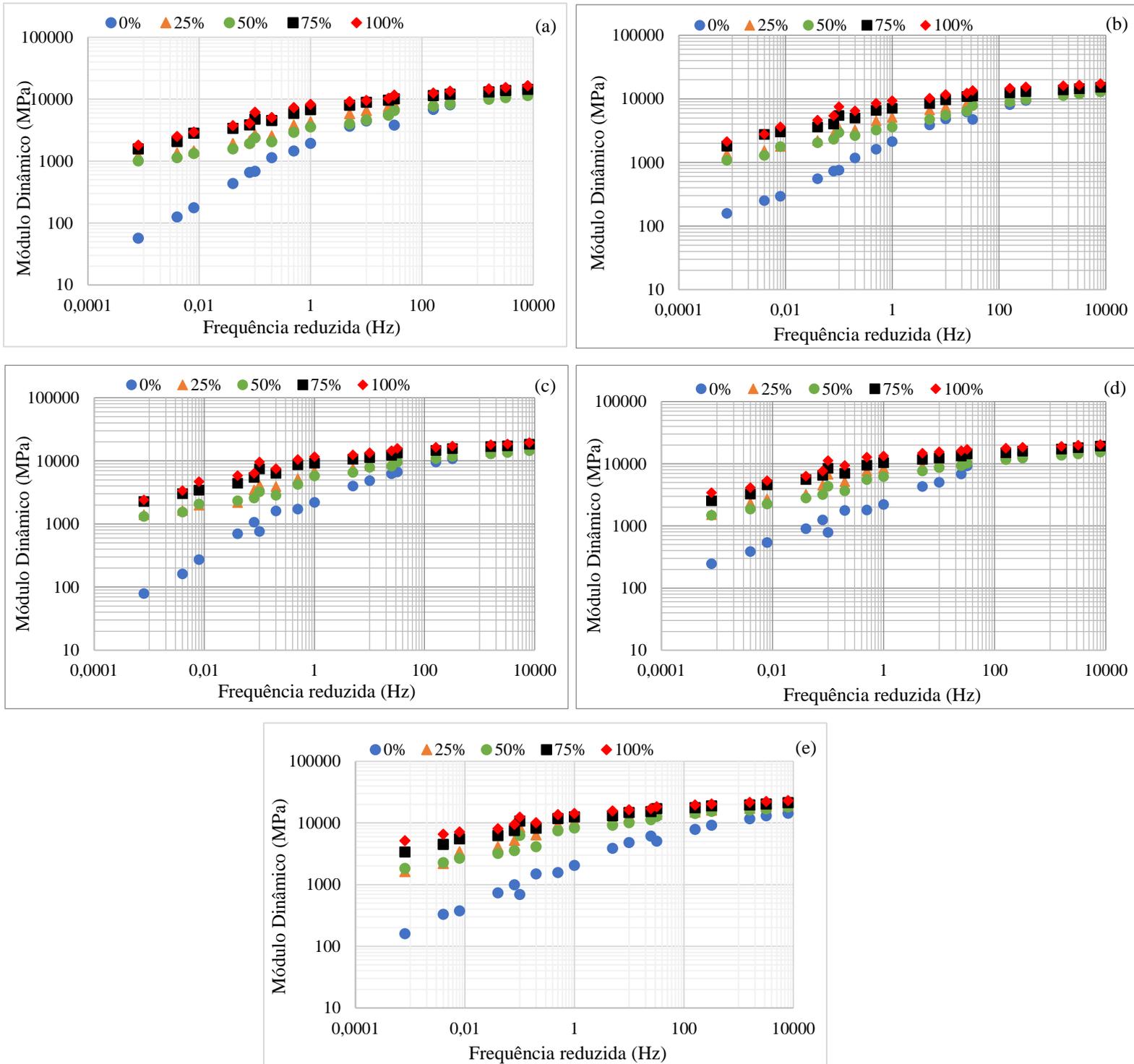
Teor de RAP (%)	Temperatura de Usinagem (°C)	Equação	R <sup>2</sup>
0	140	$y = 882,11 \ln(x) + 3396$	0,8775
	150	$y = 968,57 \ln(x) + 3808,2$	0,8903
	160	$y = 1075,2 \ln(x) + 4254,7$	0,9032
	170	$y = 1222,6 \ln(x) + 4964,3$	0,8923
	180	$y = 922,47 \ln(x) + 3785$	0,9008
25	140	$y = 853,47 \ln(x) + 5123,8$	0,9301
	150	$y = 858,17 \ln(x) + 5642,9$	0,9436
	160	$y = 1009,8 \ln(x) + 6641,4$	0,9369
	170	$y = 1111,6 \ln(x) + 8184,2$	0,9522
	180	$y = 1158,6 \ln(x) + 9350,7$	0,9560
50	140	$y = 692,96 \ln(x) + 4100,9$	0,9396
	150	$y = 784,00 \ln(x) + 4773,4$	0,9445
	160	$y = 913,83 \ln(x) + 5861,4$	0,9664
	170	$y = 950,79 \ln(x) + 6554,5$	0,9707
	180	$y = 1124,0 \ln(x) + 8003,9$	0,9793
75	140	$y = 865,92 \ln(x) + 6739,2$	0,9698
	150	$y = 906,15 \ln(x) + 7313,4$	0,9846
	160	$y = 1072,6 \ln(x) + 8980,0$	0,9876
	170	$y = 1071,4 \ln(x) + 9799,1$	0,9879
	180	$y = 1182,7 \ln(x) + 11540$	0,9881
100	140	$y = 965,11 \ln(x) + 7647,0$	0,9645
	150	$y = 1024,9 \ln(x) + 8865,0$	0,9679
	160	$y = 1119,0 \ln(x) + 10440$	0,9702
	170	$y = 1144,3 \ln(x) + 11831$	0,9801
	180	$y = 1176,4 \ln(x) + 13364$	0,9873

Fonte: Autor próprio (2023)

Na Tabela 35 é possível verificar que todas as equações possuem um  $R^2$  elevado, com maiores valores para as maiores temperatura de usinagem, mesma tendência vista no RAP 03, onde houve uma menor variação dos resultados à medida que houve acréscimo de material fresado na mistura. Além disso, também é vista a tendência de, independentemente da quantidade de RAP, existiu uma menor variação à medida que aumentou a temperatura utilizada na usinagem da amostra.

Assim como nos demais materiais fresados, foram plotadas as curvas mestras em relação aos teores de RAP proporcionando uma melhor visualização para identificar os efeitos da quantidade desse material nos resultados de módulo dinâmico. Assim, a Figura 37 apresenta essas curvas mestras separadas pela quantidade de material fresado.

**Figura 37** - Módulo Dinâmico para as temperaturas de usinagem: 140°C (a), 150°C (b), 160°C (c), 170°C (d) e 180°C (e)



**Fonte:** Autor próprio (2023)

Na Figura 37 é possível verificar que o módulo dinâmico aumenta em função da frequência, assim como observado nos outros materiais usados na pesquisa. Esse aumento já era esperado no ensaio devido a redução do tempo de carga, ou seja, o tempo para as deformações viscoelásticas acontecerem é menor, e também, em frequências elevadas o material alcança o pico do módulo e

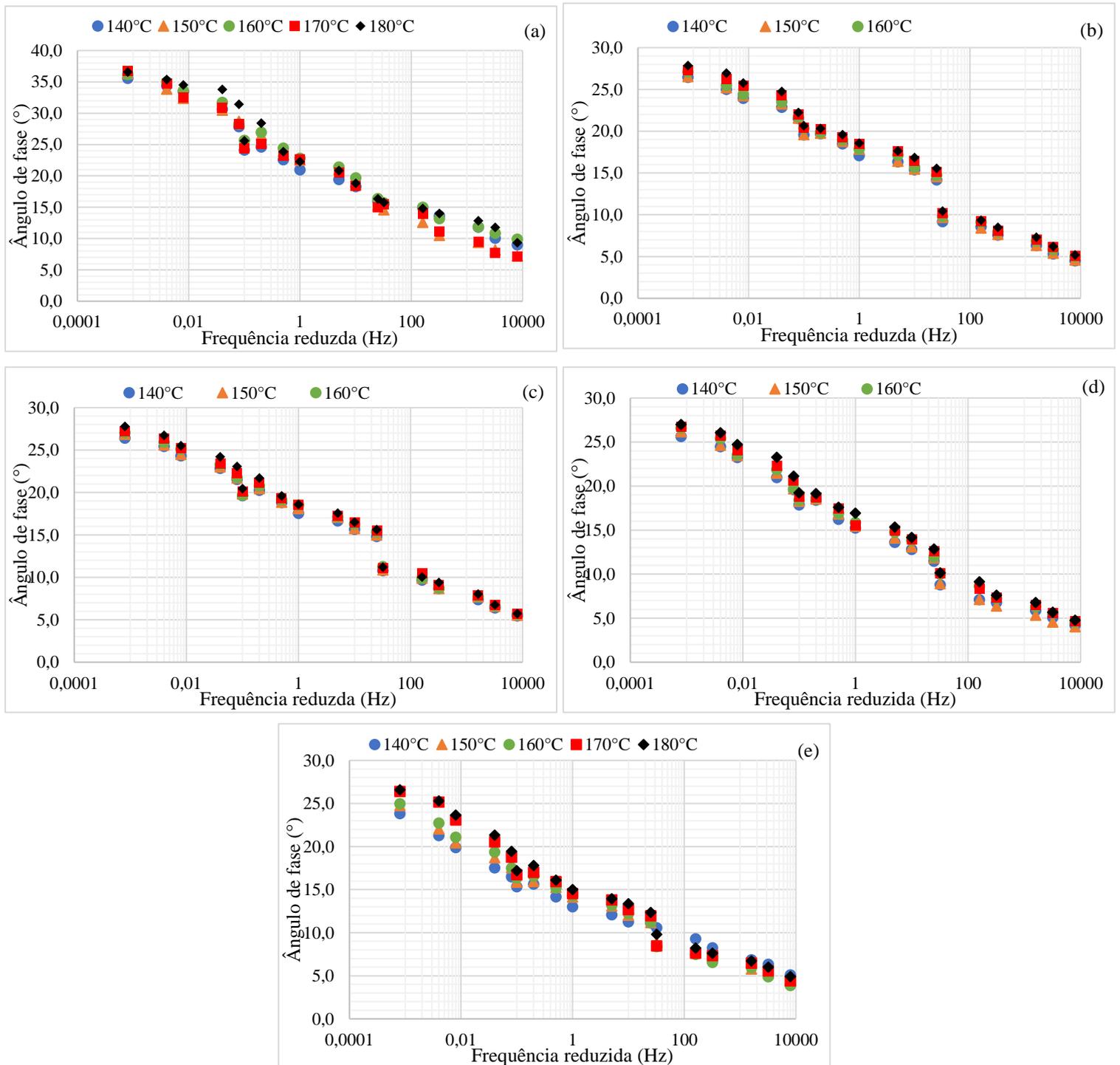
com isso praticamente não existe relaxação do material, apenas as deformações elásticas. O contrário acontece quando as frequências são menores (MANAU *et al.*, 2018). No RAP 04 um dos pontos a ser observado é que a diferença entre as misturas com fresado e as amostras de 0% é acentuada, assim como no RAP 03, indicando que esses materiais apresentaram módulos mais elevados que a mistura de referência. Já ao analisar as mostras com teores de RAP essa diferença entre os módulos é reduzida, podendo indicar que o material em questão sofre influência da temperatura de usinagem, porém em proporções menores.

Como era esperado e como visto nos demais materiais analisados na presente pesquisa, é visto que a adição de material fresado influencia o módulo e aumenta a rigidez. E que, nesse RAP em questão, houve um acréscimo significativo com a adição do material em relação a mistura com 0%. Devido esse aumento elevado, é importante a verificação dos efeitos provocados na mistura asfáltica resultante a respeito da fadiga, visto que esse aumento de rigidez é importante quando visto pela resistência à deformação permanente, mas pode ser prejudicial em relação ao trincamento por fadiga.

De maneira geral, é verificado que todos os materiais fresados estudados na pesquisa seguiram a tendência esperada de outros estudos (ALVANI *et al.*, 2016; MANAU *et al.*, 2018; CENTOFANE *et al.*, 2018; LUZZI, 2019; BESERRA *et al.*, 2023), onde o acréscimo de RAP aumenta os valores de módulo dinâmico. Além disso, também foi observado que os resultados mais elevados desse parâmetro aconteceram na temperatura de usinagem onde o DoA foi 100%, logo todo o ligante envelhecido do material fresado estava disponível para interagir com o ligante virgem. Essa tendência pode indicar que de fato aconteceu uma maior interação entre esses ligantes na referida temperatura de usinagem, e conseqüentemente, pode indicar que houve um maior DoB.

Também foi analisado para o RAP 04, as propriedades elásticas e viscosas do material por meio do ângulo de fase. A Figura 38 apresenta os resultados desse parâmetro para o RAP 04 analisado nos teores e temperaturas de usinagem verificadas no estudo.

**Figura 38** - Ângulo de fase para os teores de RAP 03: 0% (a), 25% (b), 50% (c), 75% (d) e 100% (e)



**Fonte:** Autor próprio (2023)

No RAP 04, esse parâmetro apresentou resultados semelhantes com àqueles vistos nos demais materiais fresados. Nas altas temperaturas (baixas frequências reduzidas) foi vista as maiores variações do ângulo de fase que já era esperado devido a influência do ligante envelhecido e além disso, nas maiores temperaturas a amostra fica mais fluida e consequentemente, menos

estável. Porém, é possível ver que diferentemente dos outros materiais, existe uma menor variação dos resultados e que há uma tendência mais equilibrada de maiores resultados para a temperatura de usinagem de 180°C.

## 4.2 Regressão linear múltipla

Neste tópico é apresentado todas as regressões lineares múltiplas realizadas para o módulo dinâmico dos diferentes materiais reciclados. Vale destacar que essas regressões foram feitas para analisar se nas misturas asfálticas recicladas produzidas com os diferentes tipos de RAP as variáveis de temperatura de usinagem, teor de RAP, frequência e temperatura de usinagem são significativas. Essa análise é essencial visto que os resultados de módulo dinâmico e ângulo de fase são parâmetros de entrada para a modelagem do DoB.

### 4.2.1 RAP 01

Com o ensaio de Módulo Dinâmico, foi desenvolvida uma regressão para cada variável resposta sem considerar interações entre as variáveis dependentes, com o objetivo de verificar a não nulidade dos coeficientes de correlação e assim, analisar as variáveis independentes de maneira separadamente. Com esse ensaio também foi realizada uma regressão considerando a interação entre o teor de RAP e a temperatura de usinagem. A Tabela 36 mostra uma análise mais detalhada da regressão feita para o Módulo Dinâmico, sem a interação.

**Tabela 36** – Análise do MD (sem interação) – RAP 01

Variáveis	Coefficientes	Erro Padrão	Estatística T	Valor_P
Intercepto	624,090	664,361	0,939	0,348
Teor de RAP	31,34	1,625	19,288	$2 \times 10^{-16}$
Temperatura de Usinagem	59,1	4,062	14,539	$2 \times 10^{-16}$
Temperatura do Ensaio	-300,1	3,901	-76,917	$2 \times 10^{-16}$
Frequência	185,1	6,541	28,295	$2 \times 10^{-16}$

**Fonte:** Autor próprio (2022)

Nessa regressão, todas as variáveis são significativas ( $p < 0,05$ ), com exceção do intercepto que possui um valor de p superior a 0,05 e com isso não tem aplicação prática. Em relação aos coeficientes, antes de analisá-los foi feito o teste de multicolinearidade para verificar se existe alguma correlação entre as variáveis independentes. Foi então calculado o VIF que foi 1 para todas

as variáveis indicando que não existe correlação entre elas. Com isso, esse modelo é dado pela Equação 28.

$$MD = 624,1 + 31,3(\text{teor RAP}) + 59,1(\text{temp. de usinagem}) - 300,1(\text{tem.}) + 185,1(\text{freq.}) \quad (\text{equação 28})$$

A regressão do Módulo Dinâmico considerando a interação entre o teor de RAP e a temperatura de usinagem é apresentado na Tabela 37.

**Tabela 37** - Análise do MD (com interação) – RAP 01

Variáveis	Coefficientes	Erro Padrão	Estatística T	Valor_P
Intercepto	7159,6275	1113,0735	6,432	$1,74 \times 10^{-10}$
Teor de RAP	-99,3684	18,1128	-5,486	$4,91 \times 10^{-8}$
Temperatura de Usinagem	18,2186	6,9055	2,638	0,00843
Temperatura do Ensaio	-300,059	3,8285	-78,375	$2 \times 10^{-16}$
Frequência	185,085	6,541	28,295	$2 \times 10^{-16}$
Teor de RAP: Temperatura de usinagem	0,8169	0,1128	7,245	$7,28 \times 10^{-16}$

Fonte: Autor próprio (2022)

Para essa regressão é possível observar que todas as variáveis foram significativas ( $p < 0,05$ ), inclusive a interação entre o teor de RAP e a temperatura de usinagem. Como na própria regressão já existe uma variável de correlação entre as variáveis de teor de RAP e temperatura de usinagem não foi aplicado o teste de multicolinearidade. O coeficiente negativo para teor de RAP pode gerar a conclusão que ao aumentar a quantidade de material fresado ocorre uma redução do Módulo Dinâmico, porém esse sinal negativo nesse coeficiente acontece devido a nova variável de interação que existe no modelo, e ao verificar o modelo como é visto que a rigidez aumenta com a adição do material fresado. A Equação 29 mostra o modelo do MD com a variável de interação.

$$MD = 7159,6 - 99,4(\text{teor RAP}) + 18,2(\text{temp. de usinagem}) - 300,1(\text{tem.}) + 185,1(\text{freq.}) + 0,82(\text{teor RAP} * \text{tem. usinagem}) \quad (\text{equação 29})$$

A Tabela 38 mostra a regressão realizada para a variável resposta do ângulo de fase sem considerar a interação entre o teor de RAP e a temperatura de usinagem.

**Tabela 38** - Análise do AF (sem interação) – RAP 01

Variáveis	Coefficientes	Erro Padrão	Estatística T	Valor_P
Intercepto	13,1	0,762784	17,228	$2 \times 10^{-16}$
Teor de RAP	-0,06	0,001866	-32,775	$2 \times 10^{-16}$
Temperatura de Usinagem	-0,003	0,004664	-0,735	0,463
Temperatura do Ensaio	0,565	0,004479	126,172	$2 \times 10^{-16}$
Frequência	-0,27	0,007510	-35,950	$2 \times 10^{-16}$

Fonte: Autor próprio (2022)

Com os valores de p é possível observar que as variáveis independentes foram significativas ( $p < 0,05$ ) com exceção da temperatura de usinagem ( $p > 0,05$ ). Logo, é possível retirar essa variável sem nenhuma perda para o modelo, porém como o teste de ângulo de fase é realizado juntamente com os de módulo dinâmico optou-se em não retirar a temperatura de usinagem. Também foi realizado o teste de multicolinearidade, onde o VIF encontrado foi 1 para todas as variáveis indicando que não existe nenhuma correlação entre as variáveis independentes. A Equação 30 mostra como essa regressão é representada.

$$\hat{\text{Ângulo fase}} = 13,1 - 0,06(\text{teor RAP}) - 0,003(\text{temp. de usinagem}) + 0,56(\text{tem.}) - 0,27(\text{freq.}) \quad (\text{equação 30})$$

A regressão do Ângulo de fase considerando a interação entre o teor de RAP e a temperatura de usinagem é apresentado na Tabela 39.

**Tabela 39** - Análise do AF (com interação) – RAP 01

Variáveis	Coefficientes	Erro Padrão	Estatística T	Valor_P
Intercepto	9,9584327	1,2982740	7,671	$3,27 \times 10^{-14}$
Teor de RAP	0,0025095	0,0211166	0,119	0,90546
Temperatura de Usinagem	0,0164674	0,0080544	2,045	0,04110
Temperatura do Ensaio	0,5651283	0,0044655	126,554	$2 \times 10^{-16}$
Frequência	-0,2699989	0,0074878	-36,059	$2 \times 10^{-16}$
Teor de RAP: Temperatura de usinagem	-0,0003979	0,0001315	-3,025	0,00253

Fonte: Autor próprio (2022)

Para essa regressão é possível observar que o teor de RAP não foi significativo ( $p > 0,05$ ) enquanto todas as outras variáveis foram, inclusive a interação entre a quantidade de fresado e a temperatura de usinagem. Assim como na regressão sem a variável de interação a temperatura de usinagem não foi significativa, mas optou-se em deixá-la no modelo. Logo, a equação que identifica esse modelo é expressada pela Equação 31.

$$\hat{\text{Ângulo de fase}} = 9,96 - 0,002(\text{teor RAP}) + 0,02(\text{temp. de usinagem}) + 0,56(\text{tem.}) - 0,27(\text{freq.}) - 0,0004(\text{teor RAP} * \text{tem. usinagem}) \quad (\text{equação 31})$$

A Tabela 40 mostra um resumo com os parâmetros encontrados para cada regressão linear múltipla feita para o RAP 01.

**Tabela 40** – Resumo dos modelos estatísticos para o RAP 01

	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>R<sup>2</sup> ajustado</b>	<b>Estatística F</b>	<b>Valor – p</b>
MD (sem interação) – RAP 01	0,8444	0,8440	1825	$2,2 \times 10^{-16}$
MD (com interação) – RAP 01	0,8503	0,8497	1526	$2,2 \times 10^{-16}$
AF (sem interação) – RAP 01	0,9315	0,9313	4572	$2,2 \times 10^{-16}$
AF (com interação) – RAP 01	0,932	0,9317	3681	$2,2 \times 10^{-16}$

**Fonte:** Autor próprio (2022)

Com base na Tabela 40 é possível afirmar que todos as regressões analisadas são estatisticamente significantes ( $p < 0,05$ ). Como são modelos diferentes é possível realizar uma comparação entre eles por meio do R<sup>2</sup> ajustado, observando que nesse caso a regressão do MD que possui a variável de interação tem um valor próximo ao R<sup>2</sup> ajustado da regressão com MD sem interação. Isso pode indicar que a adição da variável de interação não alterou de maneira significativa o modelo. Ao analisar os modelos do ângulo de fase também é possível observar um pequeno aumento para o modelo que considera a interação entre as variáveis.

#### 4.2.2 RAP 02

Assim como o RAP 01, foi desenvolvido para o RAP 02 um modelo de regressão para cada variável resposta sem considerar interações entre as variáveis dependentes. Em seguida foi realizada uma regressão considerando a interação entre o teor de RAP e a temperatura de usinagem. A Tabela 41 mostra a análise mais detalhada do modelo feito para o Módulo Dinâmico sem a variável de interação.

**Tabela 41** – Análise do MD (sem interação) – RAP 02

Variáveis	Coefficientes	Erro Padrão	Estatística T	Valor_P
Intercepto	-777,1	897,891	-0,865	0,387
Teor de RAP	50,1	2,196	22,805	$2 \times 10^{-16}$
Temperatura de Usinagem	77,9	5,490	14,183	$2 \times 10^{-16}$
Temperatura do Ensaio	-363,5	5,272	-68,937	$2 \times 10^{-16}$
Frequência	163,1	8,841	18,443	$2 \times 10^{-16}$

Fonte: Autor próprio (2022)

Como observado na Tabela 30, todas as variáveis são significativas ( $p < 0,05$ ), porém, o intercepto não tem aplicação prática, pois seu valor de p foi maior que 0,05. Esses resultados são semelhantes a mesma regressão do RAP 01. Nesse modelo também foi feito o teste de multicolinearidade para analisar se há correlação entre as variáveis e o valor de VIF foi 1 para todas as variáveis indicando que não há correlação entre elas. Com isso, foi chegado na Equação 32 para a regressão do módulo dinâmico sem a variável de interação.

$$MD = -777,1 + 50,1(\text{teor RAP}) + 77,9(\text{temp. de usinagem}) - 363,5(\text{tem.}) + 163,1(\text{freq.}) \quad (\text{equação 32})$$

A regressão do Módulo Dinâmico considerando a interação entre o teor de RAP e a temperatura de usinagem é apresentado na Tabela 42.

**Tabela 42** - Análise do MD (com interação) – RAP 02

Variáveis	Coefficientes	Erro Padrão	Estatística T	Valor_P
Intercepto	457,5	1532,8588	0,298	0,765
Teor de RAP	25,4	24,9439	1,018	0,309
Temperatura de Usinagem	70,1	9,5098	7,377	$2,83 \times 10^{-13}$
Temperatura do Ensaio	-363,5	5,2724	-68,937	$2 \times 10^{-16}$
Frequência	163,1	8,8407	18,443	$2 \times 10^{-16}$
Teor de RAP: Temperatura de usinagem	0,15	0,1553	0,994	0,321

Fonte: Autor próprio (2023)

Diferentemente do que foi visto no RAP 01, onde todas as variáveis foram significativas, para essa regressão do RAP 02 o intercepto, o teor de RAP e a variável de interação entre o teor de RAP e a temperatura de usinagem tiveram um valor de p maior que 0,05, sendo considerados

estatisticamente não significantes. Optou-se por deixar essas variáveis no modelo devido elas terem sido significantes no modelo do RAP 01 e será melhor avaliado nos modelos que serão encontrados para o RAP 03 e 04. A Equação 33 mostra a equação encontrada para esse modelo.

$$MD = 457,5 + 25,4(\text{teor RAP}) + 70,1(\text{temp. de usinagem}) - 363,5(\text{tem.}) + 163,1(\text{freq.}) + 0,15(\text{teor RAP} * \text{tem.usinagem}) \quad (\text{equação 33})$$

A Tabela 43 mostra a regressão realizada para a variável resposta do ângulo de fase sem considerar a interação entre o teor de RAP e a temperatura de usinagem.

**Tabela 43** - Análise do AF (sem interação) – RAP 02

Variáveis	Coefficientes	Erro Padrão	Estatística T	Valor_P
Intercepto	9,22	0,533312	17,302	$2 \times 10^{-16}$
Teor de RAP	-0,02	0,001304	-17,537	$2 \times 10^{-16}$
Temperatura de Usinagem	0,005	0,003261	1,696	0,0901
Temperatura do Ensaio	0,49	0,003132	157,080	$2 \times 10^{-16}$
Frequência	-0,24	0,005251	-45,601	$2 \times 10^{-16}$

**Fonte:** Autor próprio (2022)

Nessa regressão, por meio dos valores de p é observado que as todas as variáveis foram significativas, com exceção da temperatura de usinagem que apresentou valor de p maior que 0,05. Esses valores foram semelhantes aos encontrados para o mesmo modelo do RAP 01, onde a temperatura de usinagem também não foi estatisticamente significativa. Assim como no primeiro material fresado testado, optou-se em não retirar essa variável da equação gerada pelo modelo, já que este parâmetro é obtido no mesmo ensaio que se obtém o módulo dinâmico. O teste de multicolinearidade onde o VIF encontrado foi 1 para todas as variáveis, indicando que não há correlação entre as variáveis. A Equação 34 mostra como o modelo é representado.

$$\tilde{\text{Ângulo fase}} = 9,22 - 0,02(\text{teor RAP}) - 0,005(\text{temp. de usinagem}) + 0,49(\text{tem.}) - 0,24(\text{freq.}) \quad (\text{equação 34})$$

A regressão do Ângulo de fase considerando a interação entre o teor de RAP e a temperatura de usinagem é apresentado na Tabela 44.

**Tabela 44** - Análise do AF (com interação) – RAP 02

Variáveis	Coefficientes	Erro Padrão	Estatística T	Valor_P
Intercepto	8,27	0,9102	9,089	$2 \times 10^{-16}$
Teor de RAP	-0,004	0,01481	-0,255	0,7988
Temperatura de Usinagem	0,015	0,005647	2,036	0,0419
Temperatura do Ensaio	0,49	0,003131	157,119	$2 \times 10^{-16}$
Frequência	-0,24	0,005250	-45,613	$2 \times 10^{-16}$
Teor de RAP: Temperatura de usinagem	-0,0002	0,00009221	-1,294	0,1957

Fonte: Autor próprio (2023)

Para essa regressão é possível observar que o teor de RAP e a variável de interação entre a quantidade de material fresado e temperatura de usinagem não foi significativo ( $p > 0,05$ ) enquanto todas as outras variáveis foram. Assim como na regressão anterior, optou-se por deixar essas variáveis no modelo e, pois como será visto mais adiante, para os outros materiais o teor de RAP foi significativo. A equação que identifica esse modelo é expressada pela Equação 35.

$$\hat{\text{Ângulo de fase}} = 8,27 - 0,004(\text{teor RAP}) + 0,015(\text{temp. de usinagem}) + 0,49(\text{tem.}) - 0,24(\text{freq.}) - 0,0002(\text{teor RAP} * \text{tem. usinagem}) \quad (\text{equação 35})$$

A Tabela 45 apresenta um resumo com os parâmetros encontrados para cada regressão realizada para o RAP 02.

**Tabela 45** - Resumo dos modelos estatísticos para o RAP 02

	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> ajustado	Estatística F	Valor – p
MD (sem interação) – RAP 02	0,8121	0,8116	1453	$2,2 \times 10^{-16}$
MD (com interação) – RAP 02	0,8123	0,8116	1163	$2,2 \times 10^{-16}$
AF (sem interação) – RAP 02	0,9527	0,9525	6766	$2,2 \times 10^{-16}$
AF (com interação) – RAP 02	0,9527	0,9525	5416	$2,2 \times 10^{-16}$

Fonte: Autor próprio (2022)

Assim como nos modelos do RAP 01, é observado que todos os modelos do RAP 02 são significativos, pois seu valor-p foi menor que 0,05. Ao analisar os valores de R<sup>2</sup> é possível observar

que os modelos do Módulo Dinâmico não apresentaram diferença significativa quando adicionada a variável de interação entre o teor de RAP e temperatura de usinagem. E para os modelos de ângulo de fase o  $R^2$  e o  $R^2$  ajustado foi o mesmo para os dois. Dessa maneira, com a análise dos modelos separadamente é possível analisar se as variáveis independentes foram significativas.

### 4.2.3 RAP 03

Como apresentado nos demais materiais fresados, a Tabela 46 mostra uma análise mais detalhada da regressão feita para o Módulo Dinâmico, sem a interação.

**Tabela 46** – Análise do MD (sem interação) – RAP 03

Variáveis	Coefficientes	Erro Padrão	Estatística T	Valor_P
Intercepto	-9125,9	855,947	-10,66	$2 \times 10^{-16}$
Teor de RAP	88,4	2,094	42,23	$2 \times 10^{-16}$
Temperatura de Usinagem	130,5	5,234	24,94	$2 \times 10^{-16}$
Temperatura do Ensaio	-361,9	5,026	-72,00	$2 \times 10^{-16}$
Frequência	149,2	8,428	17,70	$2 \times 10^{-16}$

**Fonte:** Autor próprio (2023)

Nesse modelo de regressão linear múltipla, todas as variáveis são significativas ( $p < 0,05$ ), assim como o intercepto, pois seu valor de p também foi menor que 0,05. Em relação aos coeficientes, antes de analisá-los também foi realizado o teste de multicolinearidade para verificar se existe alguma correlação entre as variáveis independentes. Foi então calculado o VIF que foi 1 para todas as variáveis indicando que não existe correlação entre elas. Com isso, foi chegado na Equação 36 para o modelo do módulo dinâmico sem a variável de interação.

$$MD = -9125,9 + 88,4(\text{teor RAP}) + 130,5(\text{temp. de usinagem}) - 361,9(\text{tem.}) + 149,2(\text{freq.}) \quad (\text{equação 36})$$

A regressão do Módulo Dinâmico considerando a interação entre o teor de RAP e a temperatura de usinagem é apresentado na Tabela 47.

**Tabela 47** - Análise do MD (com interação) – RAP 03

Variáveis	Coefficientes	Erro Padrão	Estatística T	Valor_P
Intercepto	3260,3	1401,0898	2,327	0,0201
Teor de RAP	-159,32	22,7997	-6,988	$4,38 \times 10^{-12}$
Temperatura de Usinagem	53,10	8,6923	6,109	$1,31 \times 10^{-9}$
Temperatura do Ensaio	-361,90	4,8191	-75,097	$2 \times 10^{-16}$
Frequência	149,17	8,0808	18,461	$2 \times 10^{-16}$
Teor de RAP: Temperatura de usinagem	1,55	0,1419	10,908	$2 \times 10^{-16}$

Fonte: Autor próprio (2023)

Para essa regressão é possível observar que todas as variáveis foram significativas ( $p < 0,05$ ), com exceção do intercepto que apresentou valor de  $p$  superior a 0,05. Nesse modelo não é aplicado o teste de multicolinearidade, pois no próprio modelo já existe uma variável de correlação entre as variáveis de teor de RAP e temperatura de usinagem. Assim como nos outros materiais, é possível verificar que os coeficientes da temperatura de ensaio e da frequência não alteram muito do modelo sem a variável de interação para o modelo com, pois são parâmetros da própria execução do ensaio e não se espera resultados com muita variação. A Equação 37 mostra o modelo do MD com a variável de interação.

$$MD = 3260,3 - 159,3(\text{teor RAP}) + 53,1(\text{temp. de usinagem}) - 361,9(\text{tem.}) + 149,2(\text{freq.}) + 1,55(\text{teor RAP} * \text{tem. usinagem}) \quad (\text{equação 37})$$

A Tabela 48 mostra a regressão realizada para o parâmetro do ângulo de fase sem considerar a interação entre o teor de RAP e a temperatura de usinagem.

**Tabela 48** - Análise do AF (sem interação) – RAP 03

Variáveis	Coefficientes	Erro Padrão	Estatística T	Valor_P
Intercepto	2,05	0,637404	3,21	0,00136
Teor de RAP	-0,05	0,001559	-33,36	$2 \times 10^{-16}$
Temperatura de Usinagem	0,04	0,003898	11,39	$2 \times 10^{-16}$
Temperatura do Ensaio	0,43	0,003743	115,61	$2 \times 10^{-16}$
Frequência	-0,21	0,006276	-32,84	$2 \times 10^{-16}$

Fonte: Autor próprio (2023)

Diferente dos modelos de regressão do RAP 01 e 02, é observado que para o modelo do ângulo de fase sem a variável de interação para o RAP 03, as todas as variáveis foram significativas, apresentando valor de p maior que 0,05. Porém, os valores dos coeficientes de cada variável independente foram semelhantes aos encontrados para o mesmo modelo dos demais materiais. Também foi realizado o teste de multicolinearidade onde o VIF encontrado foi 1 para todas as variáveis, indicando que não há correlação entre as variáveis. A Equação 38 mostra como o modelo é representado

$$\hat{\text{Ângulo fase}} = 2,05 - 0,05(\text{teor RAP}) - 0,04(\text{temp. de usinagem}) + 0,49(\text{tem.}) - 0,21(\text{freq.}) \quad (\text{equação 38})$$

A regressão do Ângulo de fase considerando a interação entre o teor de RAP e a temperatura de usinagem é apresentada na Tabela 49.

**Tabela 49** - Análise do AF (com interação) – RAP 03

Variáveis	Coefficientes	Erro Padrão	Estatística T	Valor_P
Intercepto	4,173	1,0862	3,842	0,000128
Teor de RAP	-0,094	0,0177	-5,350	1,03 x 10 <sup>-7</sup>
Temperatura de Usinagem	0,031	0,0067	4,613	4,36 x 10 <sup>-6</sup>
Temperatura do Ensaio	0,433	0,0037	115,822	2 x 10 <sup>-16</sup>
Frequência	-0,206	0,0063	-32,894	2 x 10 <sup>-16</sup>
Teor de RAP: Temperatura de usinagem	0,0002	0,0001	2,416	0,015807

Fonte: Autor próprio (2022)

Para essa regressão é possível observar que ao contrário do que aconteceu nos materiais fresados 01 e 02, o teor de RAP foi significativo ( $p > 0,05$ ) assim como as outras variáveis independentes, com exceção da variável de interação entre a quantidade de fresado e a temperatura de usinagem. Assim como no modelo de módulo dinâmico com a presença da variável de interação não existe a necessidade de realização do teste de multicolinearidade. A equação que identifica esse modelo é expressada pela Equação 39.

$$\hat{\text{Ângulo de fase}} = 4,17 - 0,094(\text{teor RAP}) + 0,031(\text{temp. de usinagem}) + 0,43(\text{tem.}) - 0,21(\text{freq.}) - 0,0002(\text{teor RAP} * \text{tem. usinagem}) \quad (\text{equação 39})$$

A Tabela 50 apresenta um resumo com os parâmetros encontrados para cada modelo de regressão realizado para o RAP 03.

**Tabela 50** - Resumo dos modelos estatísticos para o RAP 03

	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>R<sup>2</sup> ajustado</b>	<b>Estatística F</b>	<b>Valor – p</b>
MD (sem interação) – RAP 03	0,8546	0,8541	1976	2,2 x 10 <sup>-16</sup>
MD (com interação) – RAP 03	0,8664	0,8659	1743	2,2 x 10 <sup>-16</sup>
AF (sem interação) – RAP 03	0,9210	0,9208	3992	2,2 x 10 <sup>-16</sup>
AF (com interação) – RAP 03	0,9214	0,9211	3150	2,2 x 10 <sup>-16</sup>

**Fonte:** Autor próprio (2023)

Assim como nos demais resumos dos modelos dos materiais fresados 01 e 02, é visto que todos os modelos do RAP 03 são significativos, já que seu valor-p foi menor que 0,05. Ao analisar os valores de R<sup>2</sup> é possível verificar que os modelos do Módulo Dinâmico não apresentaram uma pequena diferença quando adicionada a variável de interação entre o teor de RAP e temperatura de usinagem. Já para os modelos do ângulo de fase, praticamente não existe diferença isso pode ser visto também, pois a variável de interação obteve valor-p menor que 0,05 no modelo, ou seja, não foi significativa. Isso também é corroborado, pois para praticamente também não existe diferença do R<sup>2</sup> para o R<sup>2</sup> predito.

#### 4.2.4 RAP 04

A análise do RAP 04 foi feita semelhante aos demais materiais fresados, logo a Tabela 51 mostra a análise mais detalhada da regressão feita para o Módulo Dinâmico sem a variável de interação.

**Tabela 51** – Análise do MD (sem interação) – RAP 04

<b>Variáveis</b>	<b>Coefficientes</b>	<b>Erro Padrão</b>	<b>Estatística T</b>	<b>Valor_P</b>
Intercepto	-7987,2	483,632	-16,52	2 x 10 <sup>-16</sup>
Teor de RAP	70,6	1,183	59,68	2 x 10 <sup>-16</sup>
Temperatura de Usinagem	110,5	2,957	37,36	2 x 10 <sup>-16</sup>
Temperatura do Ensaio	-285,9	2,840	-100,67	2 x 10 <sup>-16</sup>
Frequência	139,0	4,762	29,20	2 x 10 <sup>-16</sup>

**Fonte:** Autor próprio (2023)

Como em todos os modelos de regressão desse tipo para os demais materiais fresados analisados, todas as variáveis independentes foram significativas ( $\text{Valor}_P < 0,05$ ) para o modelo e vale destacar também que os coeficientes das variáveis para todos os RAPs seguiram uma tendência, onde a temperatura de ensaio apresentou o sinal negativo e valores próximos, assim como a frequência. Como já mencionado anteriormente, principalmente esses parâmetros já eram esperados apresentar valores próximos visto que, são as variáveis normatizada de execução do ensaio (DNIT – ME 416/2019). Com o teste de multicolinearidade foi possível observar também que as variáveis não possuem nenhuma correlação entre si, visto que o resultado foi igual a 1. Com isso, foi chegado na Equação 40 para a regressão linear múltipla do módulo dinâmico sem a variável de interação.

$$MD = -7987,2 + 70,6(\text{teor RAP}) + 110,5(\text{temp. de usinagem}) - 285,9(\text{tem.}) + 139,0(\text{freq.}) \text{ (equação 40)}$$

Também foi gerado a regressão do Módulo Dinâmico considerando a interação entre o teor de RAP e a temperatura de usinagem que é apresentado na Tabela 52.

**Tabela 52** - Análise do MD (com interação) – RAP 04

Variáveis	Coefficientes	Erro Padrão	Estatística T	Valor_P
Intercepto	-808,10	789,82776	-1,024	0,306
Teor de RAP	-72,97	12,85272	-5,677	$1,67 \times 10^{-8}$
Temperatura de Usinagem	65,61	4,90005	13,389	$2 \times 10^{-16}$
Temperatura do Ensaio	-285,87	2,71667	-105,229	$2 \times 10^{-16}$
Frequência	139,03	4,55532	30,522	$2 \times 10^{-16}$
Teor de RAP: Temperatura de usinagem	0,90	0,08002	11,213	$2 \times 10^{-16}$

**Fonte:** Autor próprio (2023)

Na regressão com a variável de interação para o RAP 04, todas as variáveis independentes foram significativas para o modelo ( $\text{Valor}_P < 0,05$ ), com exceção do intercepto. Assim, como no modelo anterior, os coeficientes das variáveis da temperatura de ensaio e frequência foram semelhantes para os demais materiais fresados. Porém, em relação às variáveis de teor de RAP e temperatura de usinagem houve variações dos coeficientes quando analisados os outros materiais. Essa alteração já foi vista nos resultados de módulo dinâmico, pois apesar de seguirem a mesma tendência são materiais diferentes, oriundos de locais distintos e que possuem agregados e ligante diferentes um dos outros. Como aconteceu nos outros RAPs nesse tipo de modelo não existiu a

necessidade de verificar a correlação entre as variáveis com o teste de multicolinearidade. Assim, a Equação 41 mostra a equação encontrada para esse modelo.

$$MD = -808,1 - 73,0(\text{teor RAP}) + 65,6(\text{temp. de usinagem}) - 285,9 (\text{tem.}) + 139,0 (\text{freq.}) + 0,90 (\text{teor RAP} * \text{tem. usinagem}) \quad (\text{equação 41})$$

Para o RAP 04 também foi realizado os modelos de regressão para a variável resposta do ângulo de fase e a Tabela 53 mostra o modelo realizado para este parâmetro sem considerar a interação entre o teor de RAP e a temperatura de usinagem.

**Tabela 53** - Análise do AF (sem interação) – RAP 04

Variáveis	Coefficientes	Erro Padrão	Estatística T	Valor_P
Intercepto	5,73	0,516271	11,096	2 x 10 <sup>-16</sup>
Teor de RAP	-0,05	0,001263	-37,148	2 x 10 <sup>-16</sup>
Temperatura de Usinagem	0,03	0,003157	9,567	2 x 10 <sup>-16</sup>
Temperatura do Ensaio	0,44	0,003032	143,800	2 x 10 <sup>-16</sup>
Frequência	-0,21	0,005083	-40,860	2 x 10 <sup>-16</sup>

**Fonte:** Autor próprio (2023)

Para essa regressão, pode-se observar que todas as variáveis foram consideradas significativas para a montagem do modelo de regressão linear múltipla, já que todos os valores foram inferiores a 0,05. Quando analisado os outros RAPs é visto que para esse modelo a temperatura de usinagem não foi significativa apenas para o RAP 01. Logo, optou-se por permanecer com todas as variáveis no modelo gerado desse parâmetro. Para o teste de multicolinearidade foi encontrado o valor igual a 1, constando que não existe correlação entre as variáveis. Assim, a Equação 42 mostra como o modelo é representado.

$$\text{Ângulo fase} = 5,73 - 0,05(\text{teor RAP}) + 0,03(\text{temp. de usinagem}) + 0,44 (\text{tem.}) - 0,21 (\text{freq.}) \quad (\text{equação 42})$$

E para finalizar, foi gerado a regressão do Ângulo de fase considerando a interação entre o teor de RAP e a temperatura de usinagem que é apresentado na Tabela 54.

**Tabela 54** - Análise do AF (com interação) – RAP 04

Variáveis	Coefficientes	Erro Padrão	Estatística T	Valor_P
Intercepto	7,20	0,8803	8,175	6,79 x 10 <sup>0</sup> .
Teor de RAP	0,0762	0,01433	-5,324	1,19 x 10 <sup>-7</sup>
Temperatura de Usinagem	0,02103	0,005461	3,851	0,000123
Temperatura do Ensaio	0,4359	0,003028	143,973	2 x 10 <sup>-16</sup>
Frequência	-0,2077	0,005077	-40,909	2 x 10 <sup>-16</sup>
Teor de RAP: Temperatura de usinagem	0,00018	0,0008918	2,057	0,039878

Fonte: Autor próprio (2023)

Nesse modelo de regressão é possível ver que para o RAP 04 todas as variáveis foram significativas, com exceção da variável de interação entre o teor de RAP e a temperatura de usinagem. Quando analisado os outros materiais fresados esse é o que possui menor similaridade entre eles, porém destaca-se que a variável de interação só foi significativa para o modelo no RAP 01. Uma tendência também encontrada nesse modelo, é a proximidade dos coeficientes das variáveis sobretudo para as variáveis normalizadas de execução do ensaio (temperatura de ensaio e frequência). Assim, a equação que identifica esse modelo é expressada pela Equação 43.

$$\hat{\text{Ângulo de fase}} = 7,20 - 0,076(\text{teor RAP}) + 0,021(\text{temp. de usinagem}) + 0,44(\text{tem.}) - 0,21(\text{freq.}) - 0,0002(\text{teor RAP} * \text{tem. usinagem}) \quad (\text{equação 43})$$

A Tabela 55 apresenta um resumo com os parâmetros encontrados para cada modelo de regressão linear múltipla realizado para o RAP 04.

**Tabela 55** - Resumo dos modelos estatísticos para o RAP 04

	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> ajustado	Estatística F	Valor – p
MD (sem interação) – RAP 04	0,9222	0,9220	3986	2,2 x 10 <sup>-16</sup>
MD (com interação) – RAP 04	0,9289	0,9286	3509	2,2 x 10 <sup>-16</sup>
AF (sem interação) – RAP 04	0,9466	0,9464	5955	2,2 x 10 <sup>-16</sup>
AF (com interação) – RAP 04	0,9467	0,9465	4776	2,2 x 10 <sup>-16</sup>

Fonte: Autor próprio (2023)

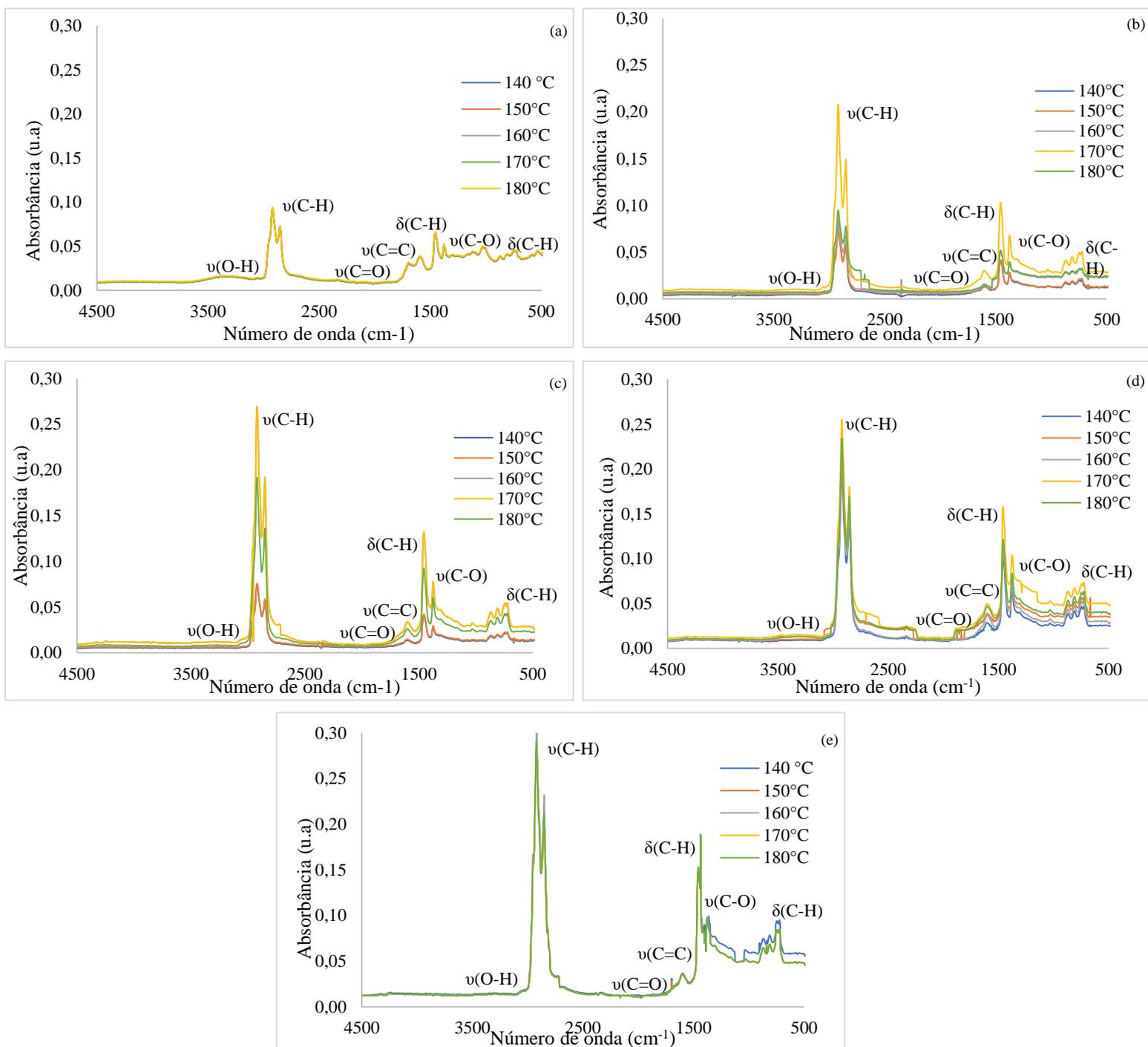
Como foi visto em todas as tabelas resumo dos outros materiais fresados estudados nessa pesquisa, é visto que todos os modelos do RAP 04 são significativos, pois seu valor-p foi bem inferior a 0,05. Para os modelos de módulo dinâmico o  $R^2$  predito apresentou pouca diferença entre eles, porém foi uma diferença maior quando comparada a diferença dos modelos para o parâmetro do ângulo de fase. Assim, como nos demais materiais isso indica que a adição da variável de interação não levou a uma diferença significativa. Fato já identificado quando visto o valor de p para essa variável no modelo em questão.

De maneira geral, após todos os modelos gerados e analisados nesse capítulo é possível identificar que as variáveis escolhidas nesse estudo para verificar a influência da interação dos ligantes (teor de RAP e temperatura de usinagem) são de fato significativa, ou seja, elas influenciam de maneira direta no resultado do ensaio do módulo dinâmico. Logo, as análises específicas para o DoB irão indicar a possibilidade de verificar a interação dos ligantes novo e envelhecido por meio do ensaio de módulo dinâmico, considerando as variações nos teores de RAP e na temperatura de usinagem.

### **4.3 FTIR**

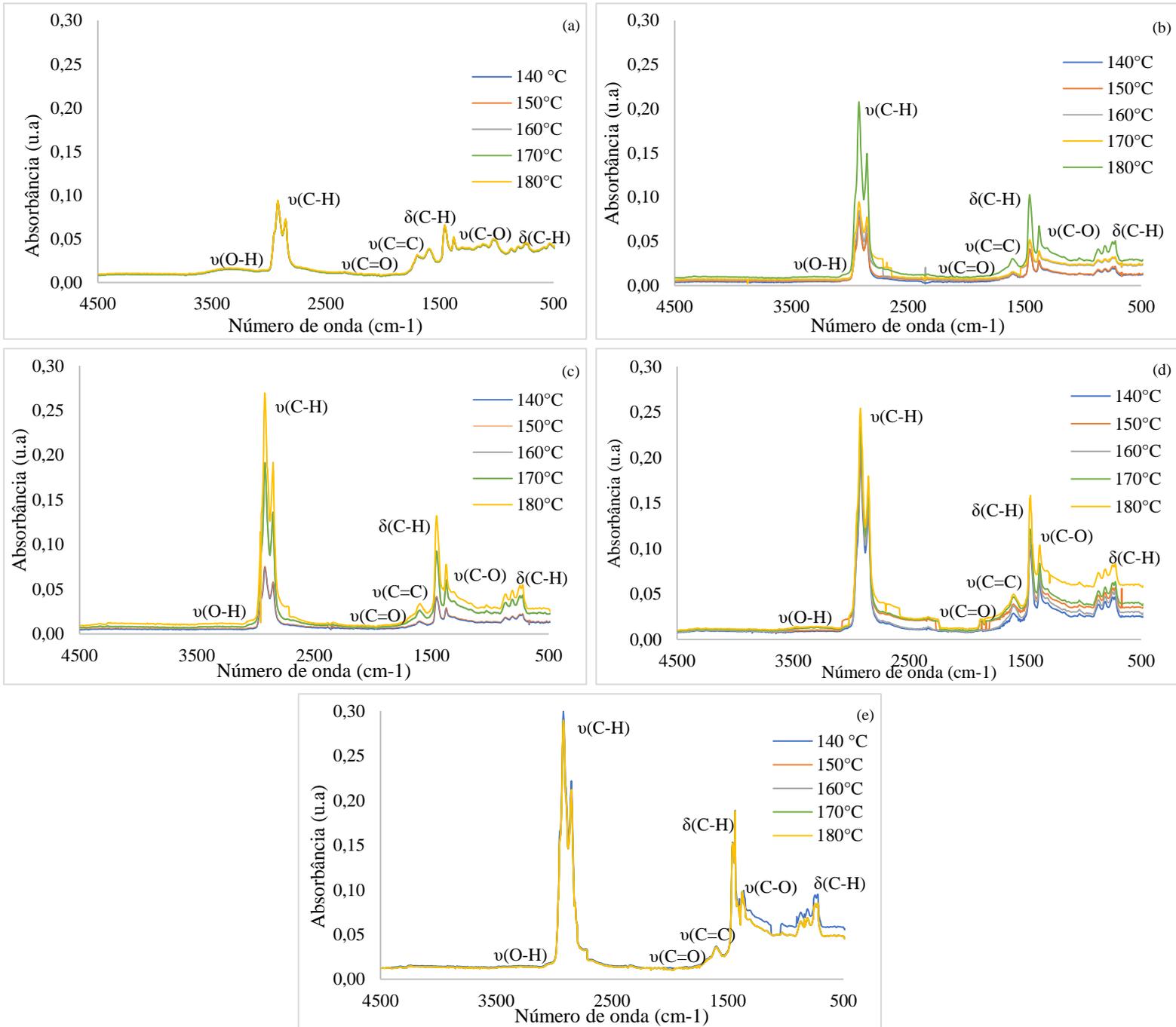
Como já mencionado o FTIR é uma análise analítica baseada na absorção de radiação eletromagnética na região do infravermelho médio (4000 a 400  $\text{cm}^{-1}$ ), permitindo verificar os diferentes tipos de ligações e funções químicas nas moléculas contidas nas amostras, especialmente em moléculas orgânicas, ao apresentar picos relacionados a vibrações. No ligante asfáltico, o FTIR é utilizado para determinar os níveis de oxidação, assim como determinar de maneira qualitativa e/ou semiquantitativa a presença de aditivos orgânicos (PAVIA *et al.*, 2020). Assim, as Figuras 39, 40, 41 e 42 apresentam os espectros de FTIR para as amostras com diferentes teores de ligante envelhecido do RAP e variadas temperaturas de usinagem para os RAPs 01, 02, 03 e 04, respectivamente.

**Figura 39** - FTIR para os teores de RAP 01: 0% (a), 25% (b), 50% (c), 75% (d) e 100% (e)



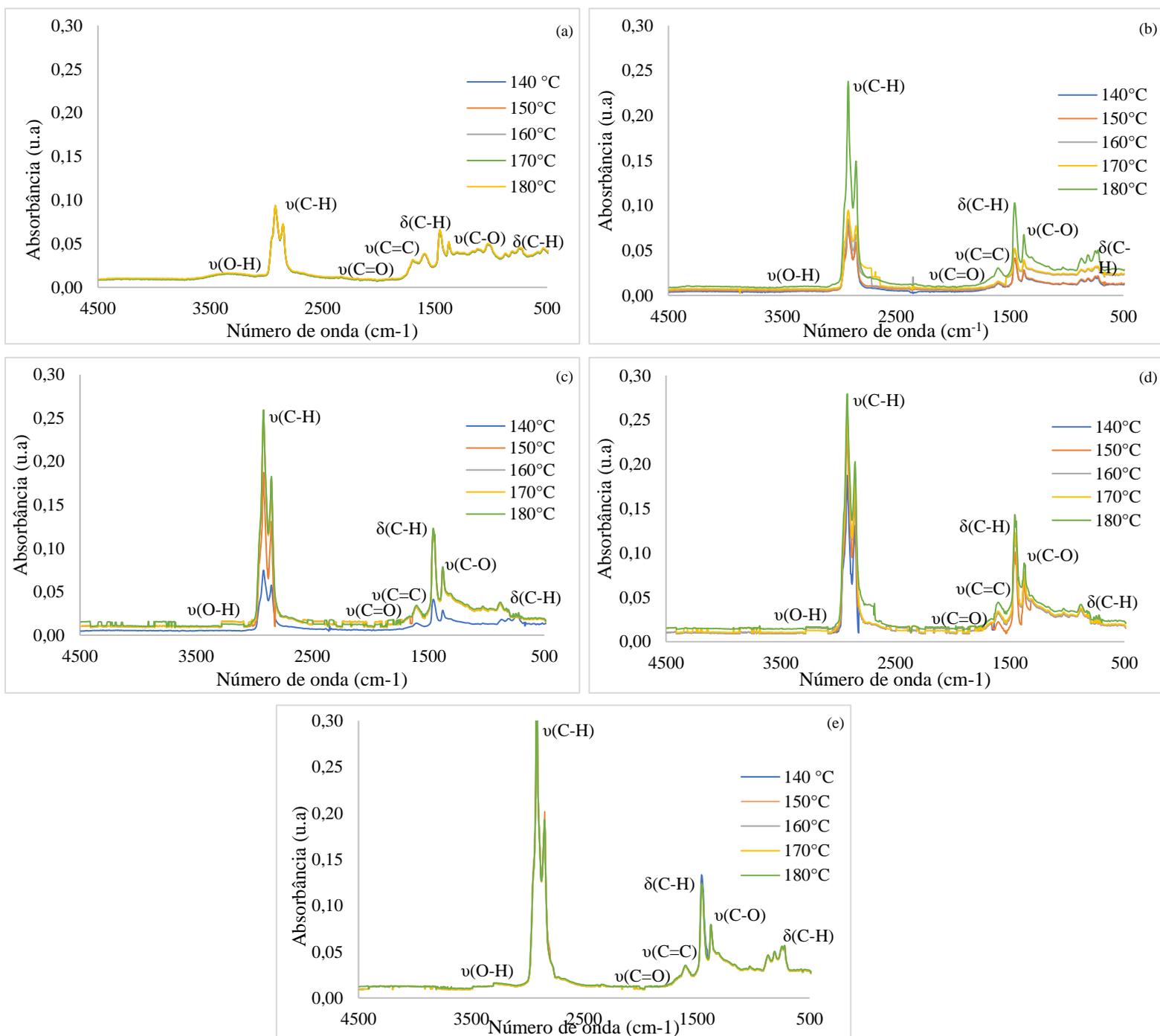
**Fonte:** Autor próprio (2023)

**Figura 40** - FTIR para os teores de RAP 02: 0% (a), 25% (b), 50% (c), 75% (d) e 100% (e)



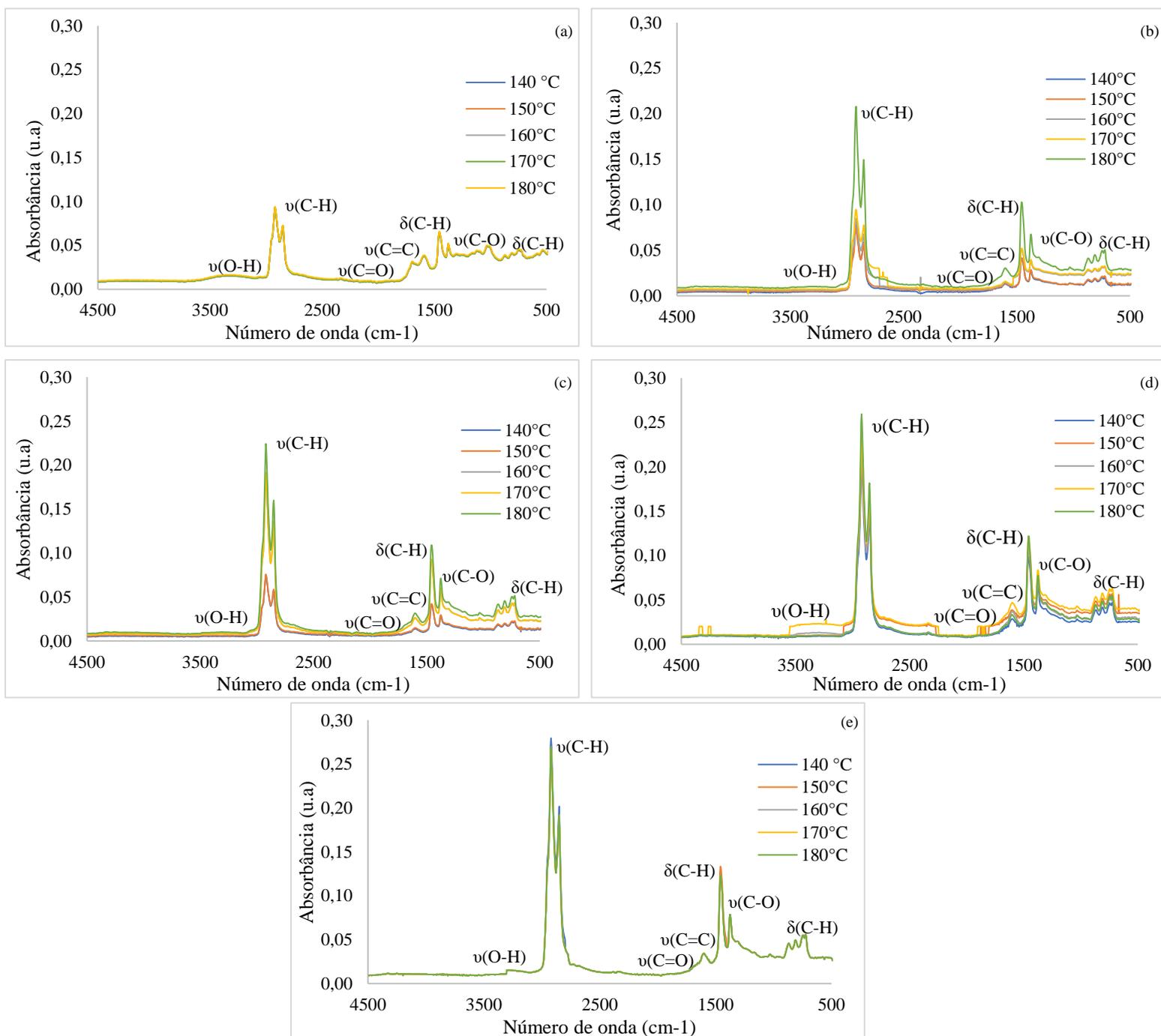
**Fonte:** Autor próprio (2023)

**Figura 41** - FTIR para os teores de RAP 03: 0% (a), 25% (b), 50% (c), 75% (d) e 100% (e)



Fonte: Autor próprio (2023)

**Figura 42** - FTIR para os teores de RAP 04: 0% (a), 25% (b), 50% (c), 75% (d) e 100% (e)



**Fonte:** Autor próprio (2023)

Em todas as Figuras acima o espectro do ligante puro (a) mostra os principais sinais indicativos da sua composição que estão presentes em regiões comuns a compostos hidrocarbonetos, sendo estas caracterizadas por picos de elevada intensidade, referentes a estiramentos (ou deformações axiais) para grupos alifáticos saturados entre 3000cm<sup>-1</sup> e 2800 cm<sup>-1</sup>

<sup>1</sup>. Nesta faixa foram vistos picos em 2951cm<sup>-1</sup> e 2867 cm<sup>-1</sup> condizentes com estiramentos assimétricos e simétricos em grupos metila (-CH<sub>3</sub>) e picos em 2919cm<sup>-1</sup> e 2850cm<sup>-1</sup>, relacionados aos estiramentos assimétrico e simétrico em grupos metileno (-CH<sub>2</sub>), além de um pico em 2890 cm<sup>-1</sup> para estiramento de grupos metila (-CH).

Assim como no estudo de Torres *et al.* (2022) picos com baixa intensidade foram vistos entre 2000 cm<sup>-1</sup> e 1700 cm<sup>-1</sup>, representando bandas harmônicas para aromáticos substituídos, assim como pequenos picos para grupos carbonilas (C=O) em pequena quantidade entre 1760 cm<sup>-1</sup> e 1700 cm<sup>-1</sup>. A presença de pico em torno de 1600 cm<sup>-1</sup> pode indicar insaturações (C=C) em anéis, juntamente com picos em torno de 1478 cm<sup>-1</sup>, sendo este último geralmente obscurecido pelo pico de deformação angular de grupos metileno (-CH<sub>2</sub>-) em 1455 cm<sup>-1</sup>. O surgimento deste último está em conformidade com os picos deste grupo para deformação axial (2921 cm<sup>-1</sup> e 2820 cm<sup>-1</sup>), enquanto que o pico em 1373 cm<sup>-1</sup>, referente a deformação angular em grupos metila (-CH<sub>3</sub>), está com conformidade com picos de deformação axial em 2952 cm<sup>-1</sup> e 2869 cm<sup>-1</sup>.

A Tabela 56 mostra um resumo dos picos mais importantes e recorrentes para os ligantes asfálticos, assim como compostos orgânicos identificados no ensaio de FTIR de acordo com o número de onda.

**Tabela 56** - Grupo de compostos orgânicos identificados no FTIR

Comprimento de onda (cm <sup>-1</sup> )	Correspondente	Modo de vibração
3000 – 2800	Deformações axiais para grupos alifáticos saturados	Deformação
2951 – 2867	Estiramentos assimétricos e simétricos em grupos metila (-CH <sub>3</sub> )	Estiramentos
2919 – 2850	Estiramentos assimétricos e simétricos em grupos de metileno (-CH <sub>2</sub> )	Estiramentos
2890	Estiramento de grupos metila (-CH-)	Estiramentos
2000 – 1700	Bandas harmônicas para aromáticos substituídos	-
1760 – 1700	Estiramentos de carbonilas (C = O)	Estiramentos
1600	Insaturações (C=C) em anéis	
1455	Deformação angular de grupos metileno (-CH <sub>2</sub> )	Deformação
1373	Deformação angula de grupos metila (-CH <sub>3</sub> )	Deformação
720	Vibração do tipo “rocking” para cadeias saturadas acima de 4 carbonos, -(CH <sub>2</sub> )n-	-

Fonte: Hou *et al.* (2019)

Para os espectros encontrados do ligante presente no RAP é possível observar o efeito do envelhecimento do ligante asfáltico por meio do índice de carbonila e o índice de sulfóxido, visto que a oxidação tende a culminar no aumento destes grupos funcionais. Nos quatro RAPs analisados nessa pesquisa é possível verificar uma tendência de altos índices de carbonila e sulfóxido e que, assim como nos espectros do ligante asfáltico novo, não houve uma diferenciação para a temperatura de usinagem utilizada.

Quando analisadas as misturas com ligante asfáltico novo e alguma proporção de ligante envelhecido do RAP é possível observar espectros com perfis semelhantes para as amostras com ligante envelhecido, onde foram vistos picos com intensidades relevante nas regiões entre  $1760\text{ cm}^{-1}$  e  $1700\text{ cm}^{-1}$  que indica oxidação devido a presença do ligante envelhecido do RAP. De maneira geral, os espectros com a mistura dos dois ligantes, de todos os materiais fresados analisados, seguiram a tendência esperada de acordo com as pesquisas de Hou *et al.* (2018), Hou *et al.* (2019) e Wang *et al.* (2019) pois eles se situaram entre os picos do ligante envelhecido e do ligante asfáltico novo.

De acordo com Hou *et al.* (2018), Hou *et al.* (2019) e Wang *et al.* (2019) quanto maior o envelhecimento do ligante maiores os picos da ligação C=O (região carbonil) e a ligação S=O (sulfóxido). Já o ligante asfáltico novo possui um C=O e S=O mais baixo. Para a mistura entre esses ligantes essas ligações apresentam valores entre os dois picos, e com base na área dos picos é possível calcular o grau de mistura. Esse aumento de carbonilas com a presença do ligante RAP indica a presença de substâncias oxigenas e tais grupos, decorrentes do processo de envelhecimento do ligante asfáltico, aumentam a polaridade e a viscosidade (MASSON *et al.*, 2021).

No espectro do FTIR o ligante envelhecido presente no RAP tem um pico de absorção maior em ambos os grupos funcionais (carbonila e sulfóxido) assim, ambos os grupos funcionais têm sido amplamente usados para indicar o nível de envelhecimento do ligante asfáltico (PETERSEN; GLASER, 2011). Da mesma maneira, quando o ligante do RAP é misturado com o ligante asfáltico virgem, os picos de carbonila e sulfóxido aumentam e podem proporcionar um melhor entendimento sobre o grau de mistura entre os ligantes. Ambos os índices podem ser usados para medir o grau de mistura, pois como já mencionando quanto maior a quantidade de ligante envelhecido na mistura maior o índice de carbonila e sulfóxido.

Em relação a temperatura de usinagem é possível observar que os espectros sofreram influência desta, assim como da quantidade de ligante envelhecido presente, onde para o RAP 01, na Figura 39 é possível observar que os maiores picos de carbonila e sulfóxido foram para a temperatura de  $170^{\circ}\text{C}$ . Vale destacar que segundo Hettiarachchi *et al.* (2020) a proximidade dos picos de carbonila e sulfóxido das amostras com os dois ligantes em relação aos mesmo picos da amostra apenas com o ligante envelhecido indica uma interação entre os materiais, ou seja, quanto maior os picos de carbonila e sulfóxido maior será a interação entre os ligantes, consequentemente maior o DoB da mistura. Dessa maneira, para o RAP 01 é verificado que aconteceu uma maior interação entre os ligantes na temperatura de usinagem de  $170^{\circ}\text{C}$ , mesma temperatura que foi

encontrado o DoA de 100%. Logo, na temperatura de usinagem onde todo o ligante do RAP está disponível para a mistura aconteceu de fato a maior interação entre os materiais.

Para os RAPs 02, 03 e 04 é visto nas Figuras 41, 42, 43 Figura **40**, respectivamente, a mesma tendência observada para o RAP 01, onde os maiores picos de carbonila e sulfóxido foram encontrados para a temperatura de usinagem de 180°C que também foi a temperatura onde todo o ligante envelhecido estava disponível para interagir com o ligante novo (DoA = 100%). Esse indicativo também foi visto nos resultados do ensaio de módulo dinâmico, já que os maiores resultados para todos os materiais fresados analisados foram vistos na temperatura de DoA 100%, já indicando uma tendência de maior interação entre os ligantes, visto a maior disponibilidade do ligante envelhecido.

Então, de maneira geral, com a temperatura de usinagem foi observado que à medida que o ligante envelhecido estava mais disponível para mistura, ou seja, à medida que aumentou o DoA também houve um aumento dos picos de carbonila e sulfóxido, indicando uma tendência de maior interação entre os ligantes (maior DoB). Além disso, para todos os RAPs em questão houve um aumento dos picos com o aumento do teor de ligante envelhecido presente na mistura.

Todas essas tendências foram semelhantes às encontradas para os resultados de módulo dinâmico, já que houve um aumento do módulo à medida que aumentava a quantidade de RAP e a temperatura de usinagem, com o limite máximo encontrado na temperatura de DoA 100%, como foi o caso do RAP 01 que teve seus melhores resultados para a temperatura de 170°C. A quantificação dessa mistura será mostrada nos tópicos subseqüentes com a metodologia descrita no capítulo anterior.

#### **4.4 Modelo de previsão do DoB**

Como já mencionado foi utilizada a metodologia do estudo de Hettiarachchi *et al.* (2020), com uso das Equações 24, 25, 26 e 27, para determinar o DoB e assim poder realizar a modelagem do parâmetro usando o ensaio do módulo dinâmico. Vale destacar a importância fundamental dessa etapa, pois foi por meio do ensaio de FTIR que foi determinadas as áreas de carbonila e conseqüentemente calculado o DoB, pois de acordo com os autores é possível observar a mistura entre os ligantes envelhecido e novo por meio dos índices de carbonila e de sulfóxidos, já que o envelhecimento do ligante acarreta aumento dos picos da ligação carbonila (C=O) e da ligação sulfóxido (S=O). Logo, o ligante novo tende a apresentar esses índices mais baixos e, esses picos na mistura dos ligantes devem apresentar valores entre os picos do ligante envelhecido e novo (HOU *et al.*, 2019).

As Tabelas 57, 58, 59 e 60 mostram os dados obtidos para os RAPs 01, 02, 03 e 04, respectivamente.

**Tabela 57** - DoB para o RAP 01 segundo a metodologia de Hettiarachchi *et al.* (2020)

RAP	Teor de RAP (%)	Temperatura de usinagem (°C)	DoB (%)
01	25	140	92,0
		150	93,1
		160	93,5
		170	96,0
		180	94,2
	50	140	92,8
		150	93,5
		160	93,8
		170	96,3
		180	94,5
	75	140	93,0
		150	93,6
		160	94,0
		170	96,4
		180	95,1

Fonte: Autor próprio (2023)

**Tabela 58** - DoB para o RAP 02 segundo a metodologia de Hettiarachchi *et al.* (2020)

RAP	Teor de RAP (%)	Temperatura de usinagem (°C)	DoB (%)
02	25	140	93,0
		150	93,2
		160	94,1
		170	95,0
		180	96,2
	50	140	93,1
		150	93,7
		160	94,3
		170	95,2
		180	96,5
	75	140	93,2
		150	93,9
		160	94,5
		170	95,3
		180	96,7

Fonte: Autor próprio (2023)

**Tabela 59** - DoB para o RAP 03 segundo a metodologia de Hettiarachchi *et al.* (2020)

RAP	Teor de RAP (%)	Temperatura de usinagem (°C)	DoB (%)
03	25	140	94,1
		150	94,8
		160	95,3
		170	95,8
		180	97,3
	50	140	94,4
		150	94,9
		160	95,5
		170	96,0
		180	97,6
	75	140	94,5
		150	95,0
		160	95,6
		170	96,3
		180	97,9

Fonte: Autor próprio (2023)

**Tabela 60** - DoB para o RAP 04 segundo a metodologia de Hettiarachchi *et al.* (2020)

RAP	Teor de RAP (%)	Temperatura de usinagem (°C)	DoB (%)
04	25	140	94,8
		150	95,3
		160	96,1
		170	96,7
		180	97,5
	50	140	95,0
		150	95,6
		160	96,2
		170	96,9
		180	98,2
	75	140	95,1
		150	95,9
		160	96,5
		170	96,9
		180	98,3

Fonte: Autor próprio (2023)

De maneira geral, para todos os RAPs estudados é possível perceber que os maiores valores de módulo dinâmico foram para as temperaturas de usinagem onde todo o ligante envelhecido do RAP estava disponível para mistura, ou seja, nas temperaturas em que o DoA foi de 100%. Assim,

essa situação já indicava que nessa temperatura também poderia haver uma maior mistura do ligante envelhecido com o ligante novo, ou seja, um maior DoB. Com os valores encontrados desse parâmetro, seguindo a metodologia de Hettiarachchi *et al.* (2020), foi confirmado que a maior interação entre os ligantes aconteceu na temperatura de usinagem onde a maior quantidade de ligante envelhecido do RAP estava disponível para a mistura. Para Stephens *et al.* (2011) a mistura mais completa entre os ligantes irá acontecer justamente na temperatura mais alta que seja suficiente para amolecer o ligante envelhecido e disponibilizá-lo para a mistura com o ligante novo.

Nas temperaturas de usinagem onde o DoA foi de 100% foi visto os maiores resultados para o Módulo Dinâmico, logo com os dados das tabelas acima de DoB também é visto uma tendência de aumento do Módulo Dinâmico à medida que acontece uma maior interação entre os ligantes novo e envelhecido. Logo, a temperatura de usinagem, assim como em outros estudos (COFFEY *et al.*, 2013; CAVALLI *et al.*, 2017; ABED *et al.*, 2018; HETIARACHCHI *et al.*, 202), apresentou uma relação direta com o parâmetro do DoB.

Coffey *et al.* (2013) avaliaram o DoB de três misturas diferentes, com base na gradação dos agregados e no teor de ligante do RAP e na diferença de rigidez do ligante novo e envelhecido presente no material fresado. Para isso, eles usaram o ensaio de curva mestra no ligante asfáltico recuperado da mistura e concluíram que a mistura com o maior grau de mistura foi aquela que possuía a maior rigidez. Cavalli *et al.* (2017) realizaram MEV com raio-X de dispersão de energia (EDX) para analisar uma mistura com 50% de RAP em três temperaturas e verificaram que na maior temperatura houve uma redução da espessura do ligante envelhecido, indicando uma maior interação desse material com o ligante novo.

Abed *et al.* (2018) usaram o tempo de mistura e a temperatura de usinagem para encontrar uma função do DoB onde os autores concluíram que esse parâmetro pode ser estimado a partir de medidas de rigidez ou resistência, sendo as medidas de rigidez mais precisas. Nessa pesquisa foi encontrado um DoB próximo de 100% para a temperatura de 170°C com um tempo de mistura de 5 min, sendo que esse DoB caiu à medida que a temperatura de usinagem e o tempo de mistura diminuíram. Dessa maneira, de acordo com os autores a redução da temperatura faz com que apenas a camada externa do ligante envelhecido do RAP se torne ativo, não havendo energia suficiente para ativar toda a espessura, indicando um menor grau de mistura.

De acordo com Hettiarachchi *et al.* (2020) a temperatura de usinagem e o método de mistura tem mais influência no DoB do que a quantidade de RAP utilizada. Os autores concluíram ainda que quanto maior a temperatura e tempo de mistura, maior o grau de mistura entre o ligante envelhecido e o ligante novo, porém não foi considerado o conceito de DoA.

Logo, os parâmetros de usinagem influenciam de maneira direta com o grau de mistura, sendo maior o DoB à medida que há um aumento da temperatura de usinagem. Assim, ao analisar os dados dos quatro materiais fresados estudados também é possível ver uma relação do DoB com o DoA, sendo que os resultados de módulo foram aumentando com o aumento da disponibilidade do ligante envelhecido, ou seja, com o aumento do DoA. Stimilli *et al.* (2015) também identificou que esse aumento do grau de mistura é proporcional a quantidade de ligante envelhecido ativado, ou seja, quanto maior o DoA maior também o DoB.

Com os valores de DoB encontrados nas Tabela 57, Tabela 58, Tabela 59 e Tabela 60, foi iniciada a calibração dos modelos, como já mencionado foram realizados 05 modelos com variáveis de entradas diferentes para analisar qual o melhor para poder prever o DoB. Vale ressaltar que a modelagem desses modelos foi realizada no software R e foram usados os parâmetros de entradas apresentados na Tabela 31. A Tabela 61 e Equação 44 mostram os resultados para o modelo 01 do DoB.

**Tabela 61** - Modelo 01 DoB

Variáveis	Coefficientes	Erro Padrão	Estatística T	Valor_P
Intercepto	82,52	0,1936	426,14	$2 \times 10^{-16}$
Teor de RAP	0,008472	0,0008162	10,38	$2 \times 10^{-16}$
Temperatura de Usinagem	0,07234	0,01198	60,39	$2 \times 10^{-16}$
Módulo Dinâmico	0,00002945	0,000002712	10,86	$2 \times 10^{-16}$

**Fonte:** Autor próprio (2023)

$$DoB = 82,52 + 0,008(Teor\ de\ RAP) + 0,07(T.usinagem) + 0,00002(Módulo\ dinâmico) \text{ (equação 44)}$$

Os resultados do modelo 2 são encontrados na Tabela 62 e a equação gerada a partir dos coeficientes encontrados no modelo é vista na Equação 45.

**Tabela 62** - Modelo 02 DoB

Variáveis	Coefficientes	Erro Padrão	Estatística T	Valor_P
Intercepto	82,67	0,1739	475,483	$2 \times 10^{-16}$
Teor de RAP	0,002744	0,0007652	3,586	0,000342
Temperatura de Usinagem	0,06090	0,001166	52,211	$2 \times 10^{-16}$
Temperatura de ensaio	0,05402	0,002213	24,409	$2 \times 10^{-16}$
Frequência de ensaio	-0,0255	0,001930	-13,209	$2 \times 10^{-16}$
Módulo Dinâmico	0,0001504	0,000005482	27,435	$2 \times 10^{-16}$

Fonte: Autor próprio (2023)

$$DoB = 82,67 + 0,003(\text{Teor de RAP}) + 0,06 (T.usinagem) + 0,05 (T.ensaio) - 0,02 (\text{frequência}) + 0,00015 (\text{Módulo dinâmico}) \quad (\text{equação 45})$$

Para o modelo 3 de previsão do DoB que continha como variáveis o teor de RAP, temperatura de usinagem, módulo dinâmico e ângulo de fase, os resultados são mostrados na Tabela 63 assim como na Equação 46.

**Tabela 63** - Modelo 03 DoB

Variáveis	Coefficientes	Erro Padrão	Estatística T	Valor_P
Intercepto	82,76	0,1914	432,329	$2 \times 10^{-16}$
Teor de RAP	0,009594	0,0008081	11,872	$2 \times 10^{-16}$
Temperatura de Usinagem	0,07757	0,001288	60,228	$2 \times 10^{-16}$
Módulo Dinâmico	-0,0002161	0,000005811	-3,719	0,000205
Ângulo de fase	-0,04201	0,004251	-9,881	$2 \times 10^{-16}$

Fonte: Autor próprio (2023)

$$DoB = 82,76 + 0,009(\text{Teor de RAP}) + 0,08 (T.usinagem) - 0,00021 (\text{Módulo dinâmico}) - 0,04(\text{ângulo de fase}) \quad (\text{equação 46})$$

Na Tabela 64 é mostrada as análises do modelo 04, com a verificação se as variáveis de entrada usadas foram significativas par o respectivo modelo. E, a equação gerada para representar esse modelo pode ser vista na Equação 47.

**Tabela 64 - Modelo 04 DoB**

Variáveis	Coefficientes	Erro Padrão	Estatística T	Valor_P
Intercepto	83,52	0,1449	576,554	$2 \times 10^{-16}$
Teor de RAP	0,002142	0,0006282	3,409	0,000662
Temperatura de Usinagem	0,06869	0,0009845	69,778	$2 \times 10^{-16}$
Temperatura de ensaio	0,09161	0,002128	43,055	$2 \times 10^{-16}$
Frequência de ensaio	-0,04297	0,001666	-25,795	$2 \times 10^{-16}$
Módulo Dinâmico	0,00008069	0,000004946	16,315	$2 \times 10^{-16}$
Ângulo de fase	-0,1265	0,003730	-33,917	$2 \times 10^{-16}$

Fonte: Autor próprio (2023)

$$DoB = 83,52 + 0,0021(\text{Teor de RAP}) + 0,069 (T. usinagem) + 0,092 (T. ensaio) - 0,04 (\text{Frequência}) + 0,0000081 (\text{Módulo dinâmico}) - 0,126 (\text{Ângulo de fase}) \quad (\text{equação 47})$$

Para finalizar, foi calibrado o modelo 5 que possui as variáveis de modelagem do corpo de prova (temperatura de usinagem e teor de RAP), e as variáveis retiradas dos ensaios mecânico (frequência e temperatura de ensaio, módulo dinâmico e ângulo de fase) e químico (índice de carbonila). O resultado para esse modelo é observado na Tabela 65 e Equação 48.

**Tabela 65 - Modelo 05 DoB**

Variáveis	Coefficientes	Erro Padrão	Estatística T	Valor_P
Intercepto	71,26	0,1289	512,251	$2 \times 10^{-16}$
Teor de RAP	0,005023	0,0005632	3,201	$2 \times 10^{-16}$
Temperatura de Usinagem	0,08419	0,0008654	65,326	$2 \times 10^{-16}$
Temperatura de ensaio	0,07251	0,00124	42,065	$2 \times 10^{-16}$
Frequência de ensaio	-0,04002	0,000325	-23,487	$2 \times 10^{-16}$
Módulo Dinâmico	0,00009329	0,000003568	14,658	$2 \times 10^{-16}$
Ângulo de fase	-0,1528	0,003162	-32,602	$2 \times 10^{-16}$
Índice de carbonila	0,0475	0,004784	36,487	0,00052

Fonte: Autor próprio (2023)

$$DoB = 71,26 + 0,005(Teor\ de\ RAP) + 0,084(T.usinagem) + 0,072(T.ensaio) - 0,04(Frequência) + 0,0000093(Módulo\ dinâmico) - 0,153(Ângulo\ de\ fase) + 0,048(I.de\ carbonila) \quad (\text{equação 48})$$

Em todas as modelagens feitas para encontrar o melhor modelo de DoB foi possível observar que as variáveis de entrada, ou seja, as variáveis dependentes de todos os modelos foram significativas, visto que seus valores foram inferiores ao valor\_p adotado de 0,05. Também foram realizados o teste de multicolinearidade em cada modelo de DoB calibrado para verificar se as variáveis usadas apresentavam alguma correlação a si. O resultado encontrado para esse teste em todos os casos foi de 1, logo nenhuma das variáveis possui relação com a outra.

Além de analisar as variáveis independentes de cada modelo foi feito o resumo com seus respectivos R<sup>2</sup>, R<sup>2</sup> ajustado, Estatística F e Valor\_p para escolher qual o modelo melhor representa a variável do DoB. A Tabela 66 mostra justamente esses resultados encontrados para cada um dos modelos testadas.

**Tabela 66** – Resumo dos Modelos DoB

	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>R<sup>2</sup> ajustado</b>	<b>Estatística F</b>	<b>Valor – p</b>
Modelo 01 DoB	0,6492	0,6488	1464	2,2 x 10 <sup>-16</sup>
Modelo 02 DoB	0,7205	0,7199	1222	2,2 x 10 <sup>-16</sup>
Modelo 03 DoB	0,7131	0,7125	1167	2,0 x 10 <sup>-16</sup>
Modelo 04 DoB	0,8118	0,8114	1704	2,2 x 10 <sup>-16</sup>
Modelo 05 DoB	0,8521	0,8518	1647	2,2 x 10 <sup>-16</sup>

**Fonte:** Autor próprio (2023)

Com os dados mostrados na Tabela 66 é possível observar que todos os modelos foram significativos para quantificar o DoB por meio de suas variáveis independentes. Porém ao verificar o R<sup>2</sup> é visto que o modelo 04 e 05 apresentam os maiores valores, ou seja, eles que irão apresentar a menor variação dos resultados. Com o R<sup>2</sup> é possível verificar que esse valor vai aumentando à medida que foi acrescentado mais variáveis ao modelo, por exemplo o modelo 01 possui apenas três variáveis (módulo dinâmico, temperatura de usinagem e teor de RAP) enquanto que o modelo 05 possui sete variáveis de entrada (módulo dinâmico, ângulo de fase, temperatura de usinagem, teor de RAP, frequência, temperatura de ensaio e índice de carbonila).

Esse aumento pode ser enganoso, pois como os modelos possuem quantidade de variáveis diferentes é possível que o acréscimo de R<sup>2</sup> tenha acontecido apenas pelo aumento do número de preditores. Logo, esse parâmetro não é aconselhado para analisar modelos com quantidade de

variáveis diferentes já que com a quantidade de preditores maiores pode gerar ruídos aleatórios nos dados e provocar o sobreajuste de modelo. Nesse caso, a Tabela 67 apresenta o  $R^2$  predito, pois com ele é possível analisar modelos com quantidades de preditores variadas e verificar se de fato o modelo possui a capacidade de fazer uma melhor predição do DoB.

**Tabela 67** - Análise do  $R^2$  predito

	$R^2$	$R^2$ ajustado	$R^2$ predito
Modelo 01 DoB	0,6492	0,6488	0,6459
Modelo 02 DoB	0,7205	0,7199	0,7152
Modelo 03 DoB	0,7131	0,7125	0,7115
Modelo 04 DoB	0,8118	0,8114	0,8106
Modelo 05 DoB	0,8521	0,8518	0,8510

**Fonte:** Autor próprio (2023)

Ao verificar o  $R^2$  predito dos modelos na Tabela 67 é possível verificar que de fato aconteceu uma melhoria nos modelos com o acréscimo de variáveis independentes. Essa análise pode ser feita pois ao verificar o  $R^2$  predito ele ajuda a determinar quando o modelo ajusta os dados originais, mas é menos capaz de produzir predições válidas. Dessa maneira, é visto que a sua redução em relação ao  $R^2$  não foi significativa indicando que o acréscimo de variável não gerou um sobreajuste de modelo.

Logo, o Modelo 4 e Modelo 5 foram os que apresentaram melhores resultados, pois além de todas as suas variáveis serem significativas para o modelo eles apresentaram o melhor  $R^2$  em todas as suas variações. Assim, é possível afirmar que dentre os modelos gerados e analisados, o 4 e o 5, são os que melhor irão conseguir, visto que seus resultados apresentarão variações menores. As Equações 46 e 47 são os resultados da modelagem do DoB com as variáveis do módulo dinâmico, ângulo de fase, temperatura de usinagem, teor de RAP, temperatura, frequência do ensaio e índice de carbonila.

Com a geração das equações dos modelos foi finalizada a etapa de calibração e iniciada a etapa de validação. Nessa etapa de validação foi usado apenas os dados do RAP 04 para verificar se os resultados de DoB encontrados a partir das equações dos cinco modelos testados se aproximaram dos dados encontrados da Tabela 60. Logo, foram usados os dados de entrada do RAP 04 para validar os modelos do DoB. A Tabela 68 mostra os dados de DoB encontrados por meio da equação de cada modelo em comparação aos da Tabela 60.

**Tabela 68** - Validação do modelo com o RAP 04

Teor de RAP (%)	Temperatura de usinagem (°C)	DoB % (modelo 1)	DoB % (modelo 2)	DoB % (modelo 3)	DoB % (modelo 4)	DoB % (modelo 5)	DoB % (Hettiarachchi et al. 2020)
25	140	73,2	79,8	82,1	92,9	93,2	94,8
	150	74,6	80,1	82,7	93,6	93,8	95,3
	160	75,2	80,7	83,6	94,3	94,0	96,1
	170	75,9	81,6	84,2	94,9	94,5	96,7
	180	76,1	82,4	85,0	95,6	95,1	97,5
50	140	73,9	80,0	82,7	93,0	93,8	95,0
	150	74,7	80,9	83,2	93,7	94,3	95,6
	160	75,3	81,3	84,4	94,4	95,0	96,2
	170	76,1	82,0	85,1	95,0	95,6	96,9
	180	76,8	82,3	85,5	95,7	96,2	98,2
75	140	74,3	80,7	83,0	93,3	94,3	95,1
	150	75,1	81,5	83,8	94,0	94,8	95,9
	160	75,8	82,4	84,7	94,6	95,3	96,5
	170	76,7	82,9	85,4	95,3	95,9	96,9
	180	77,2	83,6	86,1	95,9	96,4	98,3

Fonte: Autor próprio (2023)

Após a validação é possível ver que o Modelo 4 está validado, pois os resultados encontrados variaram dentro o valor que já esperado, pois com o  $R^2$  do modelo é possível dizer que o modelo explica 82% da variabilidade dos dados de resposta ao redor de sua média. Quando comparado com os valores de DoB encontrados por meio do FTIR seguindo a metodologia de Hettiarachchi *et al.* (2020) a média de variação foi entre 1,3% e 2,5%, sendo que essa maior variação foi para a mistura de 50% de RAP na temperatura de usinagem de 180°C.

O Modelo 5 do DoB também é considerado validado, pois os resultados encontrados variaram dentro do valor esperado, já que com o  $R^2$  do modelo é possível afirmar que o modelo 5 explica 85% da variabilidade dos dados de resposta ao redor de sua média. Quando comparados com os valores de DoB encontrados por meio do FTIR e da metodologia Hettiarachchi *et al.* (2020) a média de variação ficou em 0,8% e 2,0%. Vale destacar que essa variação é menor que a encontrada para o Modelo 4, porém já era esperado devido o  $R^2$  ser maior para o Modelo 5.

Os modelos 1, 2 e 3 apresentaram valores muito distantes do DoB encontrado no ensaio de FTIR, com resultados que variaram de 14% até 29,5%. Essas variações já eram esperadas visto que os modelos em questão apresentaram um  $R^2$  predito inferior aos modelos 4 e 5, indicando que os resultados encontrados por meio das suas respectivas equações iriam apresentar uma maior variabilidade ao redor da sua média.

Assim usando os modelos 4 e 5 e as suas respectivas equações (Equação 47 e 48) fica evidente que as variáveis de entrada do modelo são significativas como foi visto por meio do Valor\_P de cada uma. É importante destacar que o Modelo 5 possui resultados com menor variação, além disso tem as mesmas variáveis encontrados no Modelo 4 apenas com o acréscimo do índice de carbonila obtido do ensaio de FTIR. Logo, para o DoB encontrado por meio deste modelo é necessário realizar os ensaios de Módulo Dinâmico e FTIR.

Já o Modelo 4 possui seis variáveis, onde 4 delas (módulo dinâmico, ângulo de fase, frequência e temperatura de ensaio) são extraídas de um único ensaio que é o Módulo Dinâmico evidenciando a praticidade que pode ser esse modelo para quantificar quanto de ligante envelhecido interage com o ligante novo. Além disso, esse modelo é proveniente de um ensaio mecânico que é mais prático que o ensaio químico em questão e mais difundido no meio da pavimentação.

#### **4.5 Considerações finais**

Diante de todos os ensaios apresentados nesse capítulo é possível verificar que para misturas contendo material fresado, o módulo dinâmico tende a aumentar, sendo esse aumento proporcional a quantidade de RAP adicionado. Esse aumento deve ser analisado de maneira criteriosa, pois o aumento da rigidez pode ser benéfico para a resistência à deformação permanente, porém a mistura pode ficar mais suscetível ao trincamento por fadiga. Logo, para aplicação de misturas, sobretudo com alta quantidade de RAP, é necessário análises com outros ensaios além de módulo dinâmico e, muitas vezes também existe a necessidade da adição de um agente rejuvenescedor.

É importante destacar que nessa pesquisa não foi usado nenhum desses agentes rejuvenescedores pois o objetivo principal era analisar a interação entre o ligante envelhecido do RAP e o ligante novo, e o uso do agente iria tornar essa análise ainda mais complexa.

A análise dos resultados também deixou evidente como tanto módulo dinâmico como o FTIR são influenciados pela temperatura de usinagem e, conseqüentemente pelo DoA. Pois, foi visto que os maiores resultados de módulo dinâmico e os maiores picos de carbonila e sulfóxido do FTIR foram encontrados na temperatura onde o todo o ligante envelhecido do RAP estava disponível para mistura, ou seja, na temperatura que o DoA foi 100%.

Seguindo esse raciocínio o DoB também apresentou maiores resultados quanto mais ligante envelhecido estava disponível, ou seja, foi vista uma relação diretamente proporcional entre o DoA e o DoB. Logo, à medida que se aumentou o DoA maior foi a interação entre os ligantes. Essa tendência foi vista tanto utilizando a metodologia de Hettiarachchi *et al.* (2020) que fez uso do

ensaio de FTIR como também nos modelos encontrado nessa pesquisa para prever o DoB com uso das variáveis de módulo dinâmico, ângulo de fase, temperatura de usinagem, teor de RAP, frequência, temperatura de ensaio e índice de carbonila. Todas as variáveis usadas apresentaram coeficientes significativos para a determinação do DoB ressaltando ainda mais a influência que elas possuem no resultado da mistura final com material reciclado.

Por fim, para análises mais aprofundadas tanto do DoB como do próprio comportamento mecânicos e químico das misturas é preciso realizar outros ensaios que podem ser usados para gerar outros modelos de previsão do DoB com as mesmas variáveis de execução (temperatura de usinagem e teor de RAP), como também podem ser acrescentadas outras variáveis que influenciam na interação dos ligantes.

## 5 CONCLUSÕES

Com os ensaios e resultados é possível verificar a influência dos diferentes tipos de RAPs, pois apesar do material fresado usado ser proveniente da fresagem dos pavimentos cada um possui diferenças, pois nesta pesquisa foram usados quatro materiais diferentes e todos apresentaram resultados distintos. Logo, foi fundamental o estudo de cada material fresado separadamente, pois cada um desses possui características das misturas asfálticas de origem e podem interagir de maneira diferente na nova mistura. Porém, vale destacar que o aumento de rigidez da mistura asfáltica aconteceu nos quatro RAPs usados, sendo esse aumento proporcional a quantidade de material fresado usado, ou seja, a rigidez aumenta com o acréscimo de RAP. Essa situação já era esperada, pois como o ligante envelhecido presente no material fresado é mais rígido a tendência é a mistura final também possuir uma maior rigidez. É importante frisar que esse aumento de rigidez é vantajoso do ponto de vista da resistência à deformação permanente, mas precisa ser analisado quanto a susceptibilidade ao trincamento por fadiga.

A temperatura de usinagem também influenciou nos resultados finais de módulo dinâmico, onde foi possível observar que, de maneira geral, com o aumento da temperatura de usinagem houve um aumento da rigidez da mistura. Isso aconteceu, pois com o aumento da temperatura houve também a ativação do ligante envelhecido presente no RAP, deixando-o disponível para a nova mistura asfáltica. Nas menores temperaturas, como não houve a ativação total do ligante envelhecido parte dele se comportou como black rock. Nos modelos de regressão múltiplas foi corroborado que tanto a temperatura de usinagem como a quantidade de RAP influenciam de fato nos valores de módulo dinâmico das misturas asfálticas estudadas. Além disso foi visto que as variáveis de execução do ensaio (temperatura e frequência) também influenciam significativamente, sendo essa conclusão já esperada visto que são parâmetros normatizados e utilizados para a plotagem das curvas mestras do módulo dinâmico e ângulo de fase.

Com a análise do FTIR também foi possível observar que os grupos funcionais do ligante apresentou picos nas regiões já esperadas para uma amostra que possui hidrocarbonetos em sua composição, já nos ligantes envelhecidos dos materiais fresados é possível verificar picos que identificam a oxidação do material, como os índices de carbonila e sulfóxido. Além disso, esses picos, nas amostras que possuíam misturas do ligante novo e envelhecido, sofreram significativa influência da temperatura de usinagem, visto que suas máximas foram encontradas na temperatura em que todo o ligante envelhecido estava disponível para a mistura.

De maneira geral, nos quatro RAPs foi visto que os maiores valores de módulo foram encontrados na temperatura de usinagem onde todo o ligante envelhecido estava disponível para a mistura, ou seja, na temperatura onde o DoA foi 100%, indicando que é nessa temperatura que

ocorre também uma maior mistura do ligante envelhecido com o novo, indicando que o parâmetro tem uma relação com o DoB. Além disso, como já mencionado, no ensaio do FTIR foi visto que os índices de carbonila e sulfóxido, para as amostras onde a temperatura usada foi a de 100%, apresentaram os picos mais próximos dos espectros contendo apenas o ligante envelhecido. Isso indica mais uma vez que a maior interação entre os materiais aconteceu quando todo o ligante do RAP estava disponível para a mistura.

Os modelos para o parâmetro do DoB corroboraram a tendência de maior interação quando o DoA foi 100%, isso porque em todos as modelagens testadas o maior grau de interação foi visto nas temperaturas de usinagem que houve o maior módulo dinâmico e o maior pico de carbonila. Destaca-se também que em todos os modelos testados foi observado que as variáveis usadas foram significativas e com isso a escolha do modelo aconteceu com aquele que apresentou o maior  $R^2$  predito indicando que os resultados gerados tem uma variação menor.

Os dois modelos selecionados para quantificar o DoB apresentaram os maiores  $R^2$  ( $>0,80$ ), onde sua validação mostrou que os resultados de DoB encontrados com a equação gerada apresentaram pouca variação de resultados, provando que a modelagem foi bem sucedida e que é possível utilizar tanto a equação do Modelo 4 como a equação do Modelo 5 para mensurar o DoB.

Apesar disso, o Modelo 4 ganha destaque por possuir seis variáveis provenientes da moldagem dos corpos de prova (temperatura de usinagem e teor de RAP) e de apenas um ensaio mecânico (módulo dinâmico, ângulo de fase, frequência e temperatura de ensaio), onde todas foram significativas e influenciaram positivamente para a validação bem sucedida do modelo. Assim, frisa-se uma maior aplicabilidade do modelo 4, por depender de somente um ensaio mecânico para obtenção do DoB, podendo ser replicado e aperfeiçoado por outras pesquisas. Além disso, não existe a necessidade de extração e recuperação do ligante para a realização do ensaio químico de FTIR.

Por fim, destaca-se a importância do entendimento e quantificação do parâmetro do DoB, pois será possível produzir misturas com elevado teor de RAP usando uma quantidade ideal de ligante asfáltico. A maioria das misturas feitas hoje com material fresado ou consideram uma interação de 100% do ligante envelhecido e nesse caso o pavimento teria pouco de ligante asfáltico, ou não consideram nenhuma interação, RAP sendo apenas um agregado, e poderia assim gerar misturas com excesso de ligante asfáltico. Em ambas as situações, o pavimento tende a apresentar defeitos como deformação permanente e trincamento por fadiga de maneira precoce.

Logo, a quantificação do DoB e entendimento de quanto ligante envelhecido irá ser efetivamente usado na nova mistura utilizando o ensaio de módulo dinâmico e FTIR tende a

aumentar a resistência aos defeitos encontrados no pavimento, proporcionar misturas asfálticas com elevado teor de RAP e conseqüentemente, reduzir o descarte desse material no meio ambiente.

### **5.1 Sugestões para trabalhos futuros**

Após as análises feitas nesse estudo é visto que essa temática necessita ainda de muita pesquisa para um melhor entendimento a respeito da interação entre os materiais usados em misturas asfálticas contendo material fresado. Segue a seguir algumas sugestões:

- Realização de novos ensaios de Módulo Dinâmico e FTIR para poder ter mais dados de calibração e, principalmente, de validação visto que essa etapa foi feita com apenas um RAP.
- Utilização de materiais fresados de outras regiões, visto que apesar de serem materiais fresados diferentes eles possuíam muitas características em comum, então para uma melhor aplicação desse modelo é importante ele ser implementado com dados ainda mais variados.
- Analisar a variação de outros parâmetros que influenciam na interação do ligante envelhecido com o ligante o novo, como é o caso do tempo de mistura, volume de vazios, grau de compactação, entre outros.
- Considerar nos ensaios e modelagem do DoB o uso de agentes rejuvenescedores visto que na prática muitas das misturas asfálticas recicladas fazem uso desse material para melhorar a trabalhabilidade do material, com isso o DoAv irá influenciar na determinação da quantidade de ligante asfáltico disponível para a mistura.
- Modelagem do parâmetro do DoB com uso de outros ensaios, para facilitar ainda mais a quantificação desse parâmetro e assim poderem ser realizadas misturas com uma quantidade de ligante asfáltico que não tendem a gerar problemas futuros.

## REFERÊNCIAS

- ABDALFATTAH, I. A.; MOGAWER, W. S.; STUART, K. Quantification of the degree of blending in hot-mix asphalt (HMA) with reclaimed asphalt pavement (RAP) using Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDX) analysis. **Journal of Cleaner Production**. v. 294, p. 26-36. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126261>.
- ABED, A.; THOM, N.; LO PRESTI, D. Design considerations of high RAP-content asphalt produced at reduced temperatures. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**. v. 51, n. 4, p. 1–16. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1617/s11527-018-1220-1>.
- ALAVI, M. Z.; HUNG, S.; JONES, D.; HARVEY, J. **Preliminary investigation into the use of reclaimed asphalt pavement in gap-graded asphalt rubber mixes, and use of reclaimed asphalt rubber pavement in conventional asphalt concrete mixes**. Davis and Berkeley, CA. University of California Pavement Research Center. 2016.
- AL-GHALIBI, E. A. M.; MOHAMAD, S. A. Evaluate the durability and effect of water absorption of recycled aggregate used in pavement. **Materials today: Proceedings**. v. 42, n. 5, p. 2561-2565. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.579>.
- AL-QADI, I.; ELSEIFI, M.; CARPENTER, S. **Reclaimed Asphalt Pavement - A Literature Review**. FHWA-ICT-07-001. 2007.
- AL-QADI, I.; CARPENTER, S.; ROBERTS, G.; OZER, H.; AURANGZEB, Q.; ELSEIFI, M.; TREPANIER, J. **Determination of Usable Residual Asphalt Binder in RAP**. 2009.
- 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**. v. 110, p.212-217. 2016.
- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS - **AASHTO M 323 – Standard Specification for Superpave Volumetric Mix Design**. 2017.
- \_\_\_\_\_. **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 M 320 – Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder** American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington, DC. 2010.
- \_\_\_\_\_. **AASHTO TP 79/16. Standard Method of Test For Determining the Dynamic Modulus and Flow Number for Asphalt Mixtures Using the Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT)**. Washington, D.C. 2016.
- \_\_\_\_\_. **AASHTO 304 – 17: Standard Method of Test for Uncompacted Void Content of Fine Aggregate**. Washington, D.C., 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - **ASTM 2172 - 17 - Standard Test Methods for Quantitative Extraction of Asphalt Binder from Asphalt Mixtures.** Washington. 2017.

\_\_\_\_\_. **ASTM D 4124-09 – Standard Test Method for Separation of Asphalt into Four Fractions.** Washington. 2018.

\_\_\_\_\_. **ASTM D 2872 - Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test).** USA, 1997.

\_\_\_\_\_. **ASTM D 2041 -Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures.** USA, 2011.

\_\_\_\_\_. **ASTM D 4791 - Standard Test Method for Flat Particles, Elongated Particles, or Flat and Elongated Particles in Coarse Aggregate.** USA, 2005.

ANTUNES, V.; FREIRE, A. C.; NEVES, J. A review on the effect of RAP recycling on bituminous mixtures properties and the viability of multi-recycling. **Construction and Building Materials.** v. 211, p. 453–469, 2019.

ARRA. **Na Overview of Recycling and Reclamation Methods for asphalt Pavement Rehabilitation.** [S.I]. 1992.

ARRUDA, S. M. Avaliação do Comportamento Mecânico e Autorregenerativo de Misturas Asfálticas Recicladas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande – PB. 2021.

ASHTIANI, M. Z.; MOGAWER, W. S.; AUSTERMAN, A. J. A Mechanical Approach to Quantify Blending of Aged Binder from Recycled Materials in New Hot Mix Asphalt Mixtures. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board.** v. 2672, n. 28, p. 107-118. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1177/0361198118787634>

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 15184 - Materiais Betuminosos: Determinação da Viscosidade em Temperatura Elevada Usando um Viscosímetro Rotacional.** Rio de Janeiro, 2004.

BATISTA, F. A.; **MISTURAS BETUMINOSAS DENSAS A FRIO.** Tese (Doutorado). Departamento de Engenharia Civil. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2004.

BERNUCCI, L.; MOTTA, L.; CERATTI, J.; SOARES, J. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros.** Rio de Janeiro: Petrobrás: ABEDA, 2010.

BOEIRA, F. D. **Estudo da rigidez, da deformação permanente e da fadiga de misturas asfálticas com ligantes convencionais e modificados**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria – RS. 2018.

BONFIM, V.; DOMINGUES, F. A. A. **Utilização de Fresagem e Reciclagem “In Situ” a Frio. Alternativas na Recuperação de Pavimentos Asfálticos**. 29a Reunião Anual de Pavimentação, Volume 3, Cuiabá, MT, p. 602-621. 1995.

BONAQUIST, R. Can I run more RAP? **HMAT: Hot Mix Asphalt Tecnonol.** v. 12, n. 5. 2007.

BOOSHEHRAN, A.; MOGAWER, W. S.; BONAQUIST, R. (2013). How to Construct an Asphalt Binder Master Curve and Assess the Degree of Blending between RAP and Virgin Binders. **Journal of Materials in Civil Engineering.** v. 25, n. 12, p. 1813-1821. 2013. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000726](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000726)

BOWERS, B. F.; HUANG, B.; SHU, X.; MILLER, B. C. Investigation of Reclaimed Asphalt Pavement Blending Efficiency Through GPC and FTIR. **Construction and Building Materials,** v. 50, p. 517–523, 2014a.

BOWERS, B. F.; MOORE, J.; HUANG, B.; SHU, X. Blending efficiency of reclaimed asphalt pavement: An approach utilizing rheological properties and molecular weight distributions. **Fuel,** v. 135, p. 63–68, 2014b.

BOWERS, B. F.; HUANG, B.; HE, Q.; SHU, X.; JIA, X.; MILLER, B. C. Investigation of Sequential Dissolution of Asphalt Binder in Common Solvents by FTIR and Binder Fractionation. **Journal of Materials in Civil Engineering.** v. 27. 2015. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001198](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001198)

BRESSI, S.; CAVALLI, M. C.; PARTL, M. N.; TEBALDI, G.; DUMONT, A. G.; POULIKAKOS, L. D. Particle clustering phenomena in hot asphalt mixtures with high content of reclaimed asphalt pavements. **Construction and Building Materials.** v. 100, p. 207-217. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.09.052>

CASTORENA, C.; PAPE, S.; MOONEY, C. Blending Measurements in Mixtures with Reclaimed Asphalt. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board.** v. 2574, p. 57-63. 2016. DOI: <https://doi.org/10.3141/2574-06>.

CAVALLI, M. C., GRIFFA, M., BRESSI, S., PARTL, M. N., TEBALDI, G., & POULIKAKOS, L. D. Multiscale imaging and characterization of the effect of mixing temperature on asphalt concrete containing recycled components. **Journal of Microscopy.** v. 264, n. 1, p. 22–33. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1111/jmi.12412>

CAVALLI, M. C.; PARTL, M. N.; POULIKAKOS, L. D. Measuring the binder film residues on black rock in mixtures with high amounts of reclaimed asphalt. **Journal of Cleaner Production.** v. 149, p. 665–672. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.055>

CENTOFANE, R.; SPECHT, L. P.; ALMEIDA JUNIOR, P. O. B.; PINHEIRO, R. J.; PEREIRA, D. S. Avaliação do comportamento de misturas asfálticas recicladas a quente com inserção de material fresado. **Revista Matéria.** v. 23, n. 03. 2018.

COFFEY, S.; DUBOIS, E.; MEHTA, Y.; PURDY, C. Determine the Impact of Degree of Blending between Virgin and Reclaimed Asphalt Binder on Predicted Pavement Performance using Mechanistic-Empirical Design Guide (MEPDG). **In: Transportation Research Board (TRB) 92nd Annual Meeting**. Washington, D.C. 2013.

COPELAND, A. Reclaimed Asphalt Pavement in Asphalt Mixtures: State of the Practice. **Report No. FHWA-HRT-11-021**, Federal Highway Administration, McLean, Virginia, 2011.

COSTA, D. B. **Análise do envelhecimento, rigidez e suscetibilidade à presença de água em misturas recicladas com adição de agentes de reciclagem**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande – PB. 2022.

COSTA, D. B.; MELO NETO, O. M.; LUCENA, L. C. F. L.; LUCENA, A. E. F. L.; LUZ, P. M. S. G. Effects of recycling agents and methods on the fracture and moisture resistance of asphalt mixtures with high RAP contents. **Construction and Building Materials**. v. 367, n. 27, e-130312. 2023.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURAS DE TRANSPORTES – DNIT. **Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos**. Rio de Janeiro – RJ. 2006.

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

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

\_\_\_\_\_. **DNIT – ME 084/95 – Agregado miúdo - determinação da densidade real**. Rio de Janeiro, 1995.

\_\_\_\_\_. **DNIT – ME 081 - Agregados - Determinação da Absorção e da Densidade de Agregado graúdo**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – Método de Ensaio, Rio de Janeiro, 1998.

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

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

\_\_\_\_\_. **DNIT 086/94 - Agregado: Determinação de Índice de Forma**. Rio de Janeiro, 1994

\_\_\_\_\_. **DNIT 136/10 – Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral**. Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_. **DNIT 033/21 – Pavimentos flexíveis: Concreto asfáltica reciclado em usina a quente – Especificação de serviço**. Rio de Janeiro. 2021.

DEVULAPALLI, L.; KOTHANDARAMAN, S. K.; SARANG, G. A review on the mechanisms involved in reclaimed asphalt pavement. **International Journal of Pavement Research and Technology**, v. 12, n. 2, p. 185–196, 2019.

DING, Y.; HUANG, B.; SHU, X. Characterizing blending efficiency of plant produced asphalt paving mixtures containing high RAP. **Construction and Building Materials**. v. 126, p. 172–178, 2016.

DING, Y.; HUANG, B.; SHU, X. Blending efficiency evaluation of plant asphalt mixtures using fluorescence microscopy. **Construction and Building Materials**. v. 161, p. 461–467. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.138>.

EDDHAHAK-OUNI, A.; DONY, A.; COLIN, J.; NAVARO, J.; DROUADAINE, I.; BRUNEAU, D. Experimental Investigation of the homogeneity of the blended binder of a high rate recycled asphalt. **Road Materials and Pavement Design**. v. 13, p. 37-41. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1080/14680629.2012.700269>

*EN 12697-1:2012 Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 1: Soluble binder content.* (n.d.).

FRIGIO, F; STIMILLI, A.; VIRGILLI, A.; CANESTRARI, F. Performance Assessment of Plant-Produced Warm Recycled Mixtures for Open-Graded Wearing Courses. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**. v. 2633, p. 16-24. 2017.

GAITAN, L. **Evaluation of the degree of blending of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) binder for warm mix asphalt**. Glassboro: Thesis (Master of Science). College of Engineering, Rowan University, 2012.

GAITAN, L.; MEHTA, Y.; NOLAN, A.; DUBOIS, E.; COFFEY, S.; MCCARTHY, L.; WELKER, A. Evaluation of the Degree of Blending and Polymer Degradation of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) for Warm Mix Asphalt. **The Journal of Solid Waste Technology and Management**. v. 39, n. 2, p. 101–113. 2013. DOI: <https://doi.org/10.5276/JSWTM.2013.101>

GASPAR, M. S.; VASCONCELOS, K. L.; LO PRESTI, D.; BERNUCCI, L. L. B. Procedimento de extração em etapas para avaliação da interação entre ligantes na reciclagem a quente e morna. **Proceedings of the XIX Congresso Latinoamericano del Asfalto**. Medellín, Colômbia. 2017.

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

GASPAR, M. S.; VASCONCELOS, K. L.; LOPES, M. M.; BERNUCCI, L. L. B. Evaluation of binder blending on warm mix asphalt recycling. **Revista Transportes**. v. 28, n. 2, p. 87-99. 2020. DOI: <https://10.14295/transportes.v28i2.2133>.

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

GIVEHCHI, S.; ZOHDIRAD, H.; EBADI, T. Utilization of regression techniques to develop a predictive model for hazard radius from release of topical methane-rich natural gas. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**. v. 44, p. 24-30. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lpi.2016.08.015>.

GOTTUMUKKALA, B.; KUSAM, S. R.; TANDON, V.; MUPPIREDDY, A. R. Estimation of blending of rap binder in a recycled asphalt pavement mix. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 30, n. 8, p. 1–8, 2018.

HAJJ, E.; SALAZAR, L.; SEBAALY, P. Methodologies for Estimating Effective Performance Grade of Asphalt Binders in Mixtures with High Recycled Asphalt Pavement Content. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**. v. 2294, p. 53–63. 2012. DOI: <https://doi.org/10.3141/2294-06>

HE, Y., ALAVI, Z., HARVEY, J., & JONES, D. Evaluating Diffusion and Aging Mechanisms in Blending of New and Age-Hardened Binders during Mixing and Paving. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**. v. 16, p. 64–73. 2016. DOI: <https://doi.org/10.3141/2574-07>

HETTIARACHCHI, C.; HOU, X.; XIANG, Q.; YONG, D.; XIAO, F. A blending efficiency model for virgin and aged binders in recycled asphalt mixtures based on blending temperature and duration. **Resources, Conservation e Recycling**. vol. 161, p. 104-115. 2020.

HOFKO, B.; EBERHARDSTEINER, L.; FÜSSL, J.; GROTHE, H.; HANDLE, F.; HOSPODKA, M.; SCARPAS, A. Impact of maltene and asphaltene fraction on mechanical behavior and microstructure of bitumen. **Materials and Structures**. v. 49, n. 3, p. 829–841. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0541-6>.

HOSSAIN, Z.; GHOSH, D.; ZAMAN, M.; HOBSON, K. Use of the Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test Method to Characterize Polymer-Modified Asphalt Binders. **Journal of Testing and Evaluation**, v. 44, n. 1, 2016.

HOU, X.; XIAO, F.; WANG, J.; AMIRKHANIAN, S. Identification of asphalt aging characterization by spectrophotometry technique. **Fuel**. v. 226, p. 230-239. 2018.

HUANG, B. et al. Laboratory Investigation of Mixing Hot-Mix Asphalt with Reclaimed Asphalt Pavement. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 1929, n. Figure 1, p. 37–45, 2005.

HUANG, S. C.; PAULI, A. T.; GRIME, R. W.; TURNER, F. Ageing characteristics of RAP binder blends – what types of RAP binders are suitable for multiple recycling? **Road Materials and Pavement Design**. v. 15, n.1, p. 113-145. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1080/1680629.2014.926625>.

JIANG, Y.; GU, X.; ZHOU, Z.; NI, F.; DONG, Q. Laboratory Observation and Evaluation of Asphalt Blends of Reclaimed Asphalt Pavement Binder with Virgin Binder using SEM/EDS. **Transportation Research Record**. p. 1-10. DOI: <https://doi.org/10.1177/0361198118782023>.

JIMÉNEZ, B. C. A.; LO PRESTI, D.; AIREY, G. D. Binder design of high RAP content hot and warm asphalt mixture wearing courses. **Road Materials and Pavement Design**. v. 16, n. sup1, p. 460–474, 2015.

KANDHAL, P. S.; FOO, K. Y. **Designing Recycled Hot Mix Asphalt Mixtures Using SuperPAVE Technology**. NCAT Report 96-05, National Center for Asphalt Technology. Auburn: 1997.

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: Journal of the Transportation Research Board**. v. 2673, n. 1, p. 205-2016. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1177/0361198118821366>.

KASEER, F.; GARCIA, C. L.; ARAMBULA-MERCADO, E.; EPPS, M. A.; EPPS, J. Practical Tools for Optimizing Recycled Materials Content and Recycling Agent Dosage for Improved Short-and Long-Term Performance of Rejuvenated Asphalt Mixtures. **In Association of Asphalt Paving Technologists**. Jacksonville, Florida. 2018.

KIM, K. W.; DOG Y. S, Amirkhanian SN. Estimation of RAP's binder viscosity using GPC without binder recovery. **Journal of Materials Civil Engineering**. v. 18, n. 4, p. 1253-1260. 2006.

KRIZ, P.; GRANT, D. L.; VELOZA, B.; GALE, M. J.; BLAHEY, A. G.; BROWNIE, J. H.; MACCARRONE, S. (2014). Blending and diffusion of reclaimed asphalt pavement and virgin asphalt binders. **Road Materials and Pavement Design**. v. 15, n.1, p. 78-112. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1080/14680629.2014.927411>.

LIPHARDT, A.; RADZISZEWSKI, P.; KRÓL, J. Binder blending estimation method in hot mix asphalt with reclaimed asphalt. **Procedia Engineering**. v. 111, p. 502–509. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.07.123>

LIU, Y.; YANG, Z.; LUO, H.; XI, L. Preparation, characterization, and properties of asphalt modified by surface-treated anhydrous calcium sulfate whiskers. **Construction and Building Materials**. v. 384, e-131370. 2023.

LO PRESTI, D.; VASCONCELOS, K.; ORESKOVIC, M.; PIRES, G. M.; BRESSI, S. On the degree of binder activity of reclaimed asphalt and degree of blending with recycling agents. **Road Materials and Pavement Design**. v. 21, p. 2071-2090. 2019.

LO PRESTI, D.; JIMENEZ, B. C. A.; AIREY, G.; HAJJ, E. Towards 100% recycling of reclaimed asphalt in road surface courses: Binder design methodology and case studies. **Journal of Cleaner Production**. v. 131, p. 43-51. 2016. DOI: [https://doi.org/10.1016/j-jclepro.2016.05.093](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.05.093).

LO PRESTI, D.; TEBALDI, G.; KUNA, K.; APEAGYEI, A.; GRENFELL, J.; AIREY, G.; JENKINS, K. **Evaluation of the Indirect Tensile Strength test to characterize Reclaimed Asphalt**. 2015.

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

MANAU, U.; ISLAM, R.; TAREFDER, R. An Effects of recycled asphalt Pavements on the fatigue life of asphalt under different strain levels and loading frequencies. **International Journal of Fatigue**. v. 78, p. 72-80. 2018.

MARTINS, A. T. **Contribuição para a validação do ensaio de resistência à fadiga para ligantes asfálticos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro – RJ. 2014.

MASSON, J. F.; PELLETIER, L.; COLLINS, P. Rapid FTIR method for quantification of styrene-butadiene type copolymers in bitumen. **Journal of Applied Polymer Science**. Ontario, v. 79, p. 1034-1041, 2021.

MCDANIEL, R. S.; SOLEYMANI, H.; ANDERSON, R. M.; TURNER, P.; PETERSON, R. **Recommended Use of Reclaimed Asphalt Pavement in the Superpave Mix Design Method**. NCHRP Web Document 30 (Project D9-12): Contractor's Final Report, National Cooperative Highway Research Program. Washington: 2000.

MELO, R. F. **Modelo de regressão linear múltipla: uma aplicação em dados de imóveis na cidade de Toledo – PR**. Dissertação (Mestrado em Matemática). Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Toledo – PR. 2009.

MIKHAILENKO, P.; ATAEIAN, P.; BAAJ, H. Extraction and recovery of asphalt binder: a literature review. **International Journal of Pavement Research and Technology**. v. 13, n. 1, p. 20–31, 2019.

MOGAWER, W.; BENNETT, T.; DANIEL, J. S.; BONAQUIST, R.; AUSTERMAN, A.; BOOSHEHRIAN, A. (2012). Performance characteristics of plant produced high RAP mixtures. **Road Materials and Pavement Design**. v. 13, p. 183-208. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1080/14680629.2012.657070>

MOHAJERI, M.; MOLENAAR, A. A. A.; VAN DE VEN, M. F. C. Experimental study into the fundamental understanding of blending between reclaimed asphalt binder and virgin bitumen using nanoindentation and nano-computed tomography. **Road Materials and Pavement Design**. v. 15, n. 2, p. 372–384, 2014.

MOLLENHAUER, K.; DE BOCK, L.; OLESEN, E.; BROSSEAUD, Y.; GASPAR, L.; MCNALLY, C.; WIK, O. **Deliverable D5: Synthesis of national and international documents on existing knowledge regarding the recycling of reclaimed road materials in asphalt**. 2010.

NAHAR, S.; MOHAJERI, M.; SCHMETS, A.; SCARPAS, A.; VAN DE VEN, M.; SCHITTER, G. First Observation of Blending-Zone Morphology at Interface of Reclaimed Asphalt Binder and Virgin Bitumen. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**. v. 2370, p. 1-9. 2013. DOI: <https://doi.org/10.3141/2370-01>.

NAVARO, J.; BRUNEAU, D.; DROUADAINE, I.; COLIN, J.; DONY, A.; COUBERT, J. Observation and evaluation of the degree of blending of reclaimed asphalt concretes using microscopy image analysis. **Construction and Building Materials**. v. 37, p. 135–143, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.048>.

NEMATI, R.; DAVE, E. V.; SIAS, J. E. Development of Complex Modulus-Based Rutting Index Parameter for Asphalt Mixtures. **Journal of Transportation Engineering**. v. 146, n.2, 04020026. 2020. DOI: [doi:10.1061/JPEODX.0000171](https://doi.org/10.1061/JPEODX.0000171).

NEWCOMB, D. E.; BROWN, E. R.; EPPS, J. A. **Designing HMA mixtures with High RAP content: A practical guide**. NAPA Quality Improvement Series 124. National Asphalt Pavement Association. Maryland: 2007.

NORTON, A.; REGER, D.; DUBOIS, E.; KEHR, D.; NOLAN, A.; MEHTA, Y. A Study to Evaluate Low Temperature Performance of Reclaimed Asphalt Pavement in Hot Mix Asphalt at Different Degrees of Blending. **The Journal of Solid Waste Technology and Management**. v. 39, n. 4, p. 234-243. 2014. DOI: <https://doi.org/10.5276/JSWTM.2013.234>.

OBAID, A.; NAZZAL, M.; QTAISH, L. A.; KIM, S. S. Effect of RAP Source on Cracking Resistance of Asphalt Mixtures with High RAP Contents. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 31, n. 10, p. 1–7, 2019.

OLIVER, J. W. H. The Influence of the Binder in RAP on Recycled Asphalt Properties. **Road Materials and Pavement Design**. v. 2, n. 3, p. 311-325. 2001. DOI: <https://doi.org/10.1080/14680629.2001.9689906>.

ORESKOVIC, M.; PIRES, G. M.; BRESSI, S.; VASCONCELOS, K.; PRESTI, D. L. Quantitative assessment of the parameters linked to the blending between reclaimed asphalt binder and recycling agent: a literature review. **Construction Building Materials**. v. 234, 117323. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117323>

ORETO, C.; VEROPALUMBO, R.; VISCIONE, N.; BIANCARDO, S. A.; RUSSO, F. Investigating the environmental impacts and engineering performance of road asphalt pavement mixtures made up of jet grouting waste and reclaimed asphalt pavement. **Environmental Research**. v. 198, p. 12-17. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111277>.

PARTL, M. N.; BAHIA, H. U.; CANESTRARI, F.; ROCHE, C.; BENEDETTO, H.; PIBER, H.; SYBILSKI, D. **Advances in Interlaboratory Testing and Evaluation of Bituminous Materials**. Springer Netherlands. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-94-007-5104-0>

PAVIA, D. L.; KRIZ, G. S.; LAMPMAN, G. M.; ENGEL, R. G. **A small scale approach to organic Laboratory techniques**. 3° ed. Brooks Cole, EUA. 2015.

PAVIA, D. L.; LAMPMAN, G. M.; KRIZ, G. S.; VYVYAN, J. R. **Introdução à Espectroscopia**. Cengage Learning, 5° ed. 2020.

PINHEIRO, G. S. **Avaliação do processo de extração e recuperação de ligantes asfálticos e da interação entre ligantes em misturas recicladas a quente**. Dissertação (Mestrado em Ciências). Universidade de São Paulo. São Paulo – SP. 2021.

RAD, F. Y. **Estimating Blending Level of Fresh and RAP Binders in Recycled Hot Mix Asphalt**. Tese (Doutorado em Ciências). Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Wisconsin Madison, 2013.

RAD, F.; SEFIDMAZGI, N.; BAHIA, H. Application of Diffusion Mechanism. Degree of Blending Between Fresh and Recycled Asphalt Pavement Binder in Dynamic Shear Rheometer. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**. v. 2444, n. 1, p. 71-77. 2014. DOI: <https://doi.org/10.3141/2444-08>.

REIS, R. F. **Sistema de medição automatizado e com transmissão de dados para monitoramento de recalques em obras de aterros sanitários**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande – PB. 2018.

RINALDINI, E.; SCHUETZ, P.; PARTL, M. N.; TEBALDI, G.; POULIKAKOS, L. D. Investigating the blending of reclaimed asphalt with virgin materials using rheology, electron microscopy and computer tomography. **Composites Part B: Engineering**, v. 67, p. 579–587, 2014.

ROCHISHNU, E.; RAMESH, A.; RAMAYYA, V. V. Sustainable pavement technologies – performance of high RAP in WMA surface mixture containing nano glass fibers. **Materials today: Proceedings**. v. 43, n. 2, p. 1009-1017. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.643>.

RODRIGUES, S. C. **Modelo de Regressão Linear e suas Aplicações**. Govilhã. 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.

SAHEBZAMANI, H., MOHAMMAD Z. A.; ORANG F.; ALI M. Laboratory and Field Investigation of the Effect of Polymerized Pellets on the fatigue and Low-temperature Performance of Asphalt Mixtures. **Construction & Building Materials**. v. 323, 126527. 2022.

SEGUNDO, I. G. R.; BRANCO, V. T. F.C.; VASCONCELOS, K. L.; HOLANDA, A. S. Misturas asfálticas recicladas a quente com incorporação de elevado percentual de fresado como alternativa para camada de módulo elevado. **Revista Transportes**. v. 24, n. 4, p. 86-84. 2016.

SHIRODKAR, P.; MEHTA, Y.; NOLAN, A.; SONPAL, K.; NORTON, A.; TOMLISON, E. D.; SULLIVAN, P.; SAUBER, R. A study to determine the degree of partial blending of reclaimed asphalt pavement (RAP) binder for high RAP hot mix asphalt. **Construction and Building Materials**. v. 25, n. 1, p. 150–155, 2011.

SHIRODKAR, P.; MEHTA, Y.; NOLAN, A.; DUBOIS, E.; REGER, D.; MCCARTHY, L. Development of blending chart for different degrees of blending of RAP binder and virgin binder. **Resources, Conservation and Recycling**. v. 73, p. 156-161. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.01.018>.

SOLEYMANI, H. R.; MCDANIEL, R.; ABDEIRAHMAN, M. Investigation of the Black Rock Issue for Recycled Asphalt Mixtures. **Journal of the Association of Asphalt Pavement Technologists**. v. 69, 2000.

SONCIN, S. P. **Desempenho de Modelos de Previsão de Desempenho de Pavimentos Asfálticos com Base em Dados de Rede de Rodovias do Estado da Bahia**. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Paulo, SP. 2011.

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.

SREERAM, A.; LENG, Z.; ZHANG, Y. Evaluation of RAP binder mobilisation and blending efficiency in bituminous mixtures: An approach using ATR-FTIR and artificial aggregate. **Construction and Building Materials.** v. 179, p. 245–253, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.154>

STEPHENS, J.; MAHONEY, J.; DIPPOLD, C. **Determination of the PG binder grade to use in a RAP mix.** 2011.

STIMILLI, A.; VIRGILI, A.; CANESTRARI, F. (2015). New method to estimate the “re-activated” binder amount in recycled hot-mix asphalt. **Road Materials and Pavement Design.** v. 16, p. 442-459. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1080/14680629.2015.1029678>.

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

TEBALDI, G.; DAVE, E.; MARSAC, P.; MURAYA, P.; HUGENER, M.; PASETTO, M.; GRAZIANI, A.; GRILLI, A.; MARRADI, A.; WENDING, L. Classification of recycled asphalt (RA) material. **In: 2nd International Symposium on Asphalt Pavements and Environment.** France. 2012.

TORRES, P. R. B. **Estudo de misturas asfálticas recicladas modificadas com a adição de óleo vegetal residual.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande – PB. 2020.

TORRES, P. R. B.; LUCENA, A. E. F. L.; SOUSA, T. M.; KRAU, M. M. T.; LUZ, P. M. S. G.; BARBOSA, L. F. L. Análise do comportamento mecânico de misturas asfálticas recicladas com a adição de óleo vegetal residual. **Revista Transportes.** v. 30, n. 1, e-2585. 2022.

WAKEFIELD, A.; ANDERSON, R. M.; MCKAY, Z.; TIGHE, S. A Review of Solvent Extraction-Recovery Procedures and their Effect on Recovered Asphalt Binder Properties. **In: Canadian Technical Asphalt Association Conference.** Canada. 2018.

WALPOLE, R. E.; MYRES, R. H.; MYRES, S. L.; YE, K. **Probability & statistic for engineers & scientist.** 9 ed. Boston: Prentice Hall. 2012.

WELLNER, F.; FALLA, G. C.; MILLOW, R.; BLASI, A. **High-content RA asphalt mixture design.** AllBack2Pave Project, Deliverable. 2015.

WEST, R.; WILLIS, J. R.; MARASTEANU, M. **Improved Mix Design, Evaluation, and Materials Management Practices for Hot Mix Asphalt with High Reclaimed Asphalt Pavement Content.** NCHRP Report 752, Transportation Research Board. Washington: 2013.

WEST, R.; COPELAND, A. **Information Series 139: High RAP asphalt pavements. Japan practice - Lessons learned.** National Asphalt Pavement Association. Lanham: 2015.

- WORZALA, E.; LENK, M.; SILVA, A. An exploration of neural networks and its application to real estate valuation. **The Journal of Real Estate Research**. v. 10, n. 2, p. 185-201. 2005.
- VASSAUX, S.; GAUDEFRY, V.; BOULANGÉ, L.; SORO, L. J.; PÉVÈRE, A.; MICHELET, A.; MOUILLET, V. Study of remobilization phenomena at reclaimed asphalt binder/virgin binder interphases for recycled asphalt mixtures using novel microscopic methodologies. **Construction and Building Materials**. v. 165, p. 846-858. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.055>.
- VASSAUX, S.; GAUDEFRY, V.; BOULANGÉ, L.; PEVERE, A.; MICHELET, A.; BARRAGAN-MONTERO, V.; MOUILLET, V. Assessment of the binder blending in bituminous mixtures based on the development of an innovative sustainable infrared imaging methodology. **Journal of Cleaner Production**. v. 215, p. 821-828. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.105>.
- VENKATESH, B.; LAKSMAN, N.; PURANDARA, B.K.; REDDY, V.B. Analysis of observed soil moisture patterns under different land covers in Western Ghats, India. **Journal of Hydrology**, v.397, p.281-294, 2011.
- XU, J.; HAO, P.; ZHANG, D.; YUAN, G. Investigation of reclaimed asphalt pavement blending efficiency based on micro-mechanical properties of layered asphalt binders. **Construction and Building Materials**. v. 163, p. 390–401, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.030>.
- XU, Y.; CHOU, Z.; LI, Y.; JI, J.; XU, S. Effect of blending degree between virgin and aged binder on pavement performance of recycled asphalt mixture with high RAP content. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2019. 2019.
- 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.
- YU, S.; ZHANG, C.; ZHANG, W. Evaluation of the Blending Effectiveness of Reclaimed Asphalt Pavement Binder. **Journal of Materials in Civil Engineering**. v. 29, n. 12, p. 207-230, 2017.
- YU, S.; SHEN, S.; ZHOU, X.; LI, X. Effect of Partial Blending on High Content Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) Mix Design and Mixture Properties. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**. v. 2672, n. 28, p. 79-87. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1177/0361198118780703>.
- YU, X.; LI, D.; LENG, Z.; YAO, H.; WANG, S. Weathering characteristics of asphalt modified by hybrid of micro-nano tire rubber and SBS. **Construction and Building Materials**. v. 389, e-131785. 2023
- ZAUMANIS, M.; MALLICK, R. B. Review of very high-content reclaimed asphalt use in plant-produced pavements: state of the art. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 16, n. 1, p. 39–55, 2015.

ZAPPE, A. P. S. **Avaliação de diferentes fontes de material fresado com ligantes não-convencionais na reciclagem à quente**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre – RS. 2020.

ZHANG, K.; WEN, H.; HOBBS, A. Laboratory Tests and Numerical Simulations of Mixing Superheated Virgin Aggregate with Reclaimed Asphalt Pavement Materials. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**. v. 2506, p. 62-71. 2015. DOI: <https://doi.org/10.3141/2506-07>.

ZHANG, J.; SUN, C.; LI, P.; JIANG, H.; LIANG, M.; YAO, Z.; ZHANG, X.; AIREY, G. Effect of different viscous rejuvenators on chemical and mechanical behavior of aged and recovered bitumen from RAP. **Construction and Building Materials**. v. 239, p. 11-17. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117755>.

ZHAO S, BOWERS BF, HUANG B, SHU X. Characterizing rheological properties of binder and blending efficiency of asphalt paving mixtures containing RAS through GPC. **Journal of Material Civil Engineering**. v. 26, n. 5, p. 941-6. 2014.

ZHAO, S.; HUANG, B.; SHU, X.; WOODS, M. E. Quantitative Characterization of Binder Blending: How Much Recycled Binder Is Mobilized During Mixing? **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**. v. 2506, p. 72-80. 2015. DOI: <https://doi.org/10.3141/2506-08>.

ZHAO, S.; HUANG, B.; SHU, X.; WOODS, M. E. Quantitative evaluation of blending and diffusion in high RAP and RAS mixtures. **Materials and Design**. v. 89, p. 1161-1170. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.10.086>.